ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DOTTORATO DI RICERCA IN

ARCHITETTURA E CULTURE DEL PROGETTO

Ciclo 38

Settore Concorsuale: 08/C1 - DESIGN E PROGETTAZIONE TECNOLOGICA DELL'ARCHITETTURA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/13 - DISEGNO INDUSTRIALE

NUOVI SIGNIFICANTI PER IL TRASFERIMENTO NEGLI AMBIENTI VIRTUALI. AFFORDANCE, GESTUALITÀ E CONDIVISIONE DELLA CONOSCENZA NELLA REALTÀ ESTESA.

Presentata da: Diego Pucci

Coordinatore Dottorato

Matteo Cassani Simonetti

Supervisore

Michele Zannoni

Co-supervisore

Roberto Saponelli

Esame finale anno 2026

Alma Mater Studiorum Università di Bologna
Dottorato di Ricerca in Architettura e Culture del Progetto - 38° Ciclo

Nuovi significanti per il trasferimento negli ambienti virtuali.

Affordance, gestualità e condivisione della conoscenza nella realtà estesa.

Presentato da:
Diego Pucci

Supervisore:
Professor Michele Zannoni, Università di Bologna

Co-supervisore:
Professor Roberto Saponelli, Sacmi Imola

Settore Concorsuale:
08/C1 – DESIGN E PROGETTAZIONE TECNOLOGICA DELL'ARCHITETTURA

Settore Scientifico Disciplinare:
ICAR/13 – DISEGNO INDUSTRIALE

Coordinatore Dottorato:
Matteo Cassani Simonetti

Finanziato dall'Unione europea- Next Generation EU, Missione 4, Componente 2, Investimento 3.3 (D.M. 117/2023) CUP J33C22001280009

Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU
Ministero dell'Università e della Ricerca
Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA
ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

A tutti coloro
che ho conosciuto,
con cui ho condiviso
e ai nuovi rapporti...

A tutti coloro
che mi hanno insegnato,
mostrato vie alternative,
protetto e incoraggiato...

A tutti coloro
che mi hanno e a cui ho
strappato un sorriso...

A tutti.

Abstract

Il progetto in sintesi

Il progetto di ricerca presentato in questa tesi di dottorato ha come obiettivo indagare attraverso le metodologie del design, l'utilizzo di strumenti digitali nella fruizione di contenuti virtuali e interattivi nel campo dell'apprendimento e del trasferimento di conoscenze. Sono, dunque, oggetto di studio e sviluppo, modelli teorici e applicati inquadrati nel perimetro della realtà estesa (extended reality – XR), per il design di servizi di virtual training e virtual learning dedicati alla documentazione, o comunicazione, tecnica dei prodotti industriali. Il fine è quello di individuare strategie e flussi atti a semplificare la realizzazione dei contenuti, ottimizzando e facilitando il compito svolto dai tecnici, ottenendo allo stesso tempo procedure virtuali caratterizzate da una buona utilizzabilità, che risultino significative per l'utente finale che le utilizza. A questo proposito, si è reso necessario un lavoro di approfondimento sull'elemento cardine delle esperienze dematerializzate, ovvero l'interazione e le percezioni che ne derivano.

Il lavoro è svolto all'interno di una borsa cofinanziata nel perimetro del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, secondo il DM 352 del 09/04/2022 per l'attivazione di dottorati innovativi, da parte dell'azienda Sacmi S.C., la cui sede di riferimento è situata a Imola e presso la quale sono state svolte parte delle attività necessarie allo sviluppo del progetto, partendo dall'analisi dei processi correnti con l'obiettivo di individuare il framework di contesto, arrivando alla messa a disposizione di strumenti per il test delle esperienze designate, passando per l'offerta di interviste e casi di studi pratici sui quali poter raccogliere informazioni e dati utili all'elaborazione di considerazioni e sviluppi.
La ricerca, si articola lungo tre direttrici principali sulle quali si è aggregata l'elaborazione teorico-pratica:

_l'importanza della gestione dei dati nei sistemi industriali, in particolare della centralità del rapporto tra disponibilità delle informazioni, nuove dinamiche di cooperazione e strutture organizzative ibride;

_il ruolo della multimodalità come dinamica virtuosa nel triggering percettivo, fonte di livelli di immersività e presenza maggiori nelle esperienze virtuali, da cui ne derivano fruizioni e assimilazioni più efficaci;

_la trasformazione del concetto di affordance da proprietà astratta di un prodotto fisico, a proprietà astratta di un prodotto virtuale, con forte accento sulla capacità di scambio e trasferimento di informazioni e sapere.

Contenuti

Scomposizione della ricerca

Abstract 7
Contenuti 9
Lista delle abbreviazioni 13

Prima Sezione 15
1. I sipari delle realtà 17
1.1 Dissolvenze 17
1.2 Spazio e processo di ricerca 21
1.3 Simulazione: quando il digitale abilita 26

2. Metamorfosi del digitale 31
2.1 Strumenti per recitare la virtualità 32
2.2 Immedesimazione e suggerimenti virtuali 40
2.3 Coinvolgimenti multisensoriali 42

Intervallo - Prima Sezione 45
Bibliografia - Prima Sezione 47

Seconda Sezione 59
3. Lo scambio 61
3.1 As Is 61
3.2 L'importanza dei dati 66
3.3 Obiettivo a tendere 68
3.4 Una soluzione intermedia 70

4. Messa in scena 77
4.1 Metodi e sperimentazioni 78
4.2 Progetto Proxima 81
4.3 Training sicurezza 86
4.4 Simulazioni virtuali e aptica 89
4.5 Procedure di manutenzione 96

Intervallo - Seconda Sezione 99
Bibliografia - Seconda Sezione 101

Terza Sezione 109
5. Confini impalpabili 111
5.1 Framework sperimentale 111
5.2 Elaborazione e traduzione progettuale 118
5.3 Procedure sperimentali e raccolta dati 125
5.4 Controtest e convergenza 133

6. Trans[In]formazione 141
6.1 Risultati e Outcome 142
6.2 Osservazione e valutazioni 145
6.3 Confini ed estensioni future 149

Bibliografia - Terza Sezione 151

Allegati 157
Test Gruppo 1 (G1) 159
Test Gruppo 2 (G2) 160
Test Gruppo 3 (G3) 161
Codice 01 163
Codice 02 164
Casi di Studio 167-237

Riconoscimenti 239

Lista delle abbreviazioni

Libretto

AI / Artificial Intelligence
ANT / Actor Network Theory
AR / Augmented Reality
ATUI / Adaptive Tangible User Interfaces
BCI / Brain Computer Interface
CAD / Computer-Aided Design
CAM / Computer-Aided Manufacturing
CCMS / Component Content Management System
CDE / Common Data Environment
CMS / Content Management System
DPI / Dispositivo di Protezione Individuale
ERM / Eccentric Rotating Mass
ERP / Enterprise Resource Planning
HCI / Human Computer Interface
HLI / Human-Line Interaction
ID / Integrated Development Environment
LMS / Learning Management System
LOTO / Lockout/Tagout (procedura di manutenzione)
MBSE / Model-Based Systems Engineering
MICS / Made in Italy Circolare e Sostenibile
ML / Machine Learning
MR / Mixed Reality
PBR / Physically Based Rendering
PIM / Product Information Management
PLC / Programmable Logic Controller
PLM / Product Lifecycle Management
PNRR / Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza
PWM / Pulse Width Modulation
RTI / Reflectance Transformation Image
SCADA / Supervisory Control and Data Acquisition
sEMG / Surface Electromyography
TUI / Tangible User Interfaces
UI / User Interface
VR / Virtual Reality
WCA / Wearable Cognitive Assistance
XR / Extended Reality

Prima Sezione
Contesto problematico e stato dell'arte

01.

Il tema digitalizzazione è nel contesto contemporaneo del progetto argomento ricorrente e fertile, foriero di dibattiti in molteplici ambiti. Tanto la transizione da una società materiale ad una orientata ai servizi, quanto l'etica in materia di trattamento dei dati o la valutazione degli impatti energetici delle tecnologie, sono solo alcuni degli esempi capaci di rappresentare l'estensione delle implicazioni derivanti dall'uso, oramai necessario,
degli strumenti digitali.

Nel corso degli ultimi due anni un grande contributo attivatore di questi dibattiti è stato fornito dal rilascio delle prime intelligenze artificiali in ambito consumer e dall'amplificazione mediatica che questa nuova rivoluzione digitale ha comportato.
Il dibattito sull'uso della AI è connotato da molteplici criticità in termini di sostituzione dell'attività umana, di raccolta e uso di informazioni e, soprattutto, nell'impiego delle risorse, ha contribuito ulteriormente alla necessità di non sottovalutare tali questioni, anzi, di favorirne l'approfondimento sia in termini normativi, sia in termini di alfabetizzazione. Tuttavia, l'argomento principale di approfondimento della ricerca qui esposta riguarda le tecnologie immersive che grazie alla ripresentazione del concetto di metaverso, hanno guadagnato le luci della ribalta rappresentando forse il tema di spicco del mondo hi-tech prima che l'AI diventasse centrale ed essenziale nello sviluppo di processi di innovazione. Sebbene questa tesi non affronti in maniera diretta la tematica più ampia dell'intelligenza artificiale, entrerà in modo tangenziale nell'elaborato, in quanto ormai componente pervasiva e trasversale a molteplici ambiti del progetto.

All'inizio di questo percorso di ricerca, l'uso delle tecnologie immersive e dell''AI era prevalentemente oggetto di sviluppo nel contesto industriale, campo di approfondimento di questa ricerca. Allo stesso tempo, come già anticipato, i due macrotemi individuati, condividono gran parte del contesto socioeconomico di riferimento, intrecciandosi per effetti e implicazioni.
Partendo da tale intersezione, grazie all'ampliamento del focus sul tema vincolato della realtà estesa, si è reso necessario un lavoro di approfondimento che mirasse all'esplorazione e alla divulgazione riguardo l'impiego delle tecniche immersive, cercando di evitare un rigetto da parte del mercato prima ancora che le potenzialità di queste soluzioni possano trovare applicazione nei vari settori industriali. Proprio in questo contesto di crisi e opportunità si articolano le possibilità di intervenire progettualmente con metodologie design-driven al fine di indagare e individuare problemi e domande di ricerca che consentano di osservare e sperimentare pratiche utili all'esplorazione di strumenti, tecnologie e applicazioni, conducendo allo sviluppo o all'eventuale identificazione di framework progettuali capaci di rendere efficacemente e proficuamente utilizzabili le tecnologie immersive, riorientando il loro utilizzo da mezzo prevalente pubblicitario, decorativo ed energivoro ad uno di carattere maggiormente divulgativo e consapevolmente ottimizzato nell'utilizzo delle risorse.

Da qui emerge la prima domanda di ricerca.

RQ1: Nell'ambito di transizione al digitale, possono le tecnologie immersive fungere da agente di transizione e trasformazione?

1. I sipari delle realtà

I confini si allargano e i mondi si moltiplicano

Il progetto di ricerca si sviluppa a partire da una riflessione sugli aspetti psico-cognitivi e percettivi legati al crescente interesse per le possibili applicazioni progettuali legate alla realtà virtuale. Tale interesse è in forte ascesa e il numero sempre più elevato di prodotti che ne sfruttano le dinamiche lo dimostra (AR/VR Spending by Region 2020). Analizzando il contesto proposto, è possibile considerare la realtà estesa come uno degli esiti più promettenti del processo di dematerizzazione degli artefatti verso una dimensione progettuale sempre più immateriale e propensa al design dei processi e dei servizi (Maldonado, 1994). Questa crescente progettualità e possibilità tecnologica trova terreno fertile in un'epoca in cui le nuove generazioni, stimolate anche dai social network, cercano sempre più dimensioni alternative alla realtà in cui vivono, al tempo stesso, le generazioni precedenti, invece, hanno sviluppato un atteggiamento diverso e maggiormente propositivo rispetto al digitale e alle nuove tecnologie, facendo ricorso a smart device e tracker che, attraverso la rilevazione dei parametri fisiologici, consentono il monitoraggio di aspetti importanti relativi al benessere.

Si materializza così il primo quesito da cui questo progetto muove:
in quale realtà viviamo oggi?

La crescente ibridazione tra spazi fisici e spazi digitali ha reso la nostra esistenza sempre più difficile da circoscrivere all'interno dei confini del mondo "materiale". L'accelerazione tecnologica e la penetrazione pervasiva degli ambienti virtuali nelle esperienze quotidiane stanno contribuendo a una trasformazione dei comportamenti, dei modi d'uso, di percepire e interfacciarsi con la realtà.
Il sistema di riferimento non è più esclusivamente "antropocentrico", lascia spazio a nuove relazioni e visioni che prendono forma nell'interazione con i sistemi immersivi sia con le intelligenze artificiali quali agenti non-umani, aprendo uno scenario coerente con la prospettiva del more-than-human design (Giaccardi & Redström, 2020). In questo contesto, gli esseri umani appaiono paradossalmente più connessi e al tempo stesso più isolati: rarefatti nella presenza fisica, moltiplicati nelle proiezioni digitali, immersi in ambienti in cui la distinzione tra esperienza diretta e mediata diventa opaca. Il design, come disciplina che media tra persone, tecnologie e ambienti, si trova a esplorare nuove modalità di coesistenza tra umano e non-umano, fisico e digitale, ridefinendo la propria azione progettuale.

1.1 Dissolvenze

Dare una risposta assoluta e definitiva alla domanda concretizzata precedentemente non è possibile. Ciò che invece rientra nella fattibilità è provare a riassumere in questo paragrafo alcuni concetti e momenti significativi utili a tratteggiare dei contorni provvisori a quello che è stato il contesto di riferimento che ha svolto il ruolo di premessa a questo lavoro di ricerca. La società attuale in cui viviamo è espressione del "big data boom" (Brynjolfsson & McAfee, 2011), che ha contribuito alla generazione di una molteplicità di etichette, quali l'era della "data economy" o della "società dell'informazione", che meglio non potrebbero rappresentare i tempi contemporanei.

Entrambi i concetti condividono e testimoniano l'esistenza e l'importanza dell'informazione, intesa come insieme di elementi descrittivi quantitativi e qualitativi che contribuiscono alla conoscenza di un'entità o di un fenomeno.
I dati condivisi sui social network, i cookie utilizzati durante la navigazione in Internet, il costante tracciamento GPS della posizione o l'obliterazione dei biglietti del treno sono esempi, seppur di natura e modalità differenti, di pratiche estremamente tangibili, oggi diffuse, comuni e condivise.

Da questa breve sintesi emerge una questione fondamentale riguardante l'oggettività e la scientificità degli approcci totalmente basati sui dati, su elementi che spesso possono essere ricondotti a valori astratti e intangibili o a serie numeriche incomprensibili se non si possiede la giusta chiave interpretativa per valutarli e collocarli in un contesto. Questo aspetto comporta di fatto il coinvolgimento esclusivo dei competenti nel settore, identificati come "technical audience", escludendo invece il "non-technical audience" (D'Ignazio, 2017). L'aspetto formale dei dati rappresenta una delle questioni a cui questo lavoro si dimostra maggiormente sensibile: infatti, la qualità di inespressività del dato non solo lo rende poco coinvolgente a discapito della sua comprensibilità, ma rischia anche di risultare respingente, impedendo il coinvolgimento attivo della comunità non-tecnica.

Nel quadro appena descritto, il ruolo del designer trova la sua collocazione nel concetto identificato come "Big Data Divide" (Andrejevic, 2014), ovvero "l'asimmetria relazionale tra chi raccoglie, archivia ed elabora grandi quantità di dati e i soggetti oggetto della raccolta". Il designer, dunque, può agire in due direzioni: la prima riguarda l'alfabetizzazione degli utenti, mentre la seconda concerne la comunicazione dei dati, nella quale è auspicabile porre l'emozione al centro del lavoro di visualizzazione (Agostinho et al., 2019). All'interno di questa visione diventa possibile, iniziare a parlare di creative-data, intendendo con questo la caratterizzazione di elementi resi percepibili attraverso la sovrapposizione di un livello emozionale che ne legittimi il significato e, soprattutto, la comprensibilità.
Allo stesso tempo, questo significato può essere sfruttato per stimolare un maggiore grado di consapevolezza negli utenti che, empatizzando e coinvolgendosi, predispongono un percorso preferenziale per l'assimilazione del messaggio. Affinché quest'ultimo sia efficace, non deve puntare a essere memorizzato dal singolo individuo, ma deve tendere a estendersi alla comunità, affinché sia quest'ultima a generare azioni e impatti positivi (Colitti et al., 2023).

La nostra epoca è attraversata da un processo di progressiva dematerializzazione dell'esperienza, che investe tanto le modalità di percezione del mondo quanto le pratiche quotidiane dell'agire, manifestandosi come realizzazione della transizione da società organica e industriale a sistema informativo polimorfo (Haraway, 1990). Il digitale non è più uno strato supplementare della realtà, ma ne costituisce un ambiente integrato, performativo e trasformativo (Floridi, 2014). In questa cornice, l'ambito videoludico si impone come un contesto privilegiato per osservare le dinamiche di rarefazione della presenza e di ridefinizione dell'identità. Le piattaforme di gioco contemporanee costruiscono ambienti immersivi dotati di coerenza spaziale e logica, dove il giocatore non solo agisce, ma abita e si relaziona (Bohné et al., 2023; Hodent, 2017).
Il grado di realismo raggiunto dai motori grafici rende sempre più labile la distinzione tra esperienza simulata e vissuta, rafforzando il senso di "presenza" anche in assenza di corporeità (Calleja, 2011; Quiroga & Hernández, 2021). Parallelamente, il Quantified Self, movimento basato sull'auto-misurazione continua delle funzioni corporee e delle performance personali, rappresenta un altro fronte di smaterializzazione, dove l'identità viene tradotta in dati e parametri, sintetizzando la complessità del sé a visualizzazioni grafiche ed algoritmi di ottimizzazione (Malakuczi et al., 2023; Wolf, 2010).

Questa tendenza rappresenta un caso emblematico di smaterializzazione del corpo, dove l'informazione sostituisce la sensazione, e la salute diventa una questione di tracciabilità continua, trasformando il corpo, da presenza tangibile a dashboard. A ciò si affianca la dissoluzione della vita mediata, nella quale l'individuo sperimenta simultaneamente molteplici versioni di sé all'interno di ambienti digitali. Piattaforme come Instagram, TikTok o BeReal costruiscono spazi sociali ibridi in cui l'immagine diventa il principale vettore relazionale. L'identità è costantemente negoziata e performata attraverso l'interfaccia, in un gioco tra autenticità e costruzione (Goffman, 2023; Marwick, 2013).
La possibilità di vivere vite parallele, frammentate e asincrone, è oggi resa accessibile a milioni di persone attraverso strumenti quotidiani, economici e intuitivi.
Un esempio eloquente è offerto dai filtri in realtà aumentata e dalle esperienze ibride come Pokémon Go o Snapchat. In apparenza ludici, questi strumenti hanno operato una silenziosa democratizzazione della realtà aumentata (AR), estendono la possibilità di manipolare il reale a livello percettivo, modificando ambienti, volti e movimenti. Si tratta di tecnologie che, secondo Manovich (2020), attivano un nuovo regime di visibilità: non più rappresentazione, ma "composizione aumentata" dell'esperienza, in cui i confini tra realtà e immaginazione si dissolvono.
In questo scenario la distinzione tra reale e virtuale perde rilevanza, mentre si afferma un'esperienza continua e fluida della presenza, attraversata da strati tecnologici invisibili ma onnipresenti.
La dematerializzazione, quindi, non implica la sparizione del materiale, bensì una sua ricodifica in forma esperienziale, visuale, interattiva. Il design, di fronte a questo scenario, è chiamato a interrogare non solo i linguaggi e le forme della rappresentazione digitale, ma anche le eventuali implicazioni di questa trasformazione. Come suggerisce Anthony Dunne (2008), occorre progettare non più per l'oggetto, ma per l'interazione potenziale, ovvero l'"esperienza latente" contenuta in ogni artefatto connesso.

Ritornando al tema principale degli approcci immersivi, alla luce delle tematiche sopracitate, è necessaria una riflessione legata ai passaggi storici e tecnologici che ci hanno portato alla fase di transizione in atto. Una prima accelerazione si è potuta osservare con le prime sperimentazioni militari degli anni Sessanta condotte da Ivan Sutherland (1968), successivamente un altro grande impulso si è verificato grazie all'evoluzione degli schermi e il conseguente gradiente di "alte definizioni".
Dai mondi del calcolo, dei videogiochi e delle interazioni reale-digitale provengono, invece, i sistemi di real-time rendering, real-time tracking ed emotion tracking, fondamentali per la strutturazione e la diffusione dei prodotti della realtà estesa (XR). In particolare, la grande mole di dati che è possibile raccogliere attraverso la sensorizzazione dei wearable, offre importanti informazioni su come reagiamo agli stimoli esterni. Alcuni esempi sono forniti dai sistemi per il tracking delle emozioni, già utilizzati in ambito marketing, così come l'uso del tracking di precisione sfruttato per assistere gli atleti nel miglioramento delle loro prestazioni. Sebbene si tratti di sistemi ad oggi noti, meritano di essere indagati e compresi ulteriormente per poter essere sfruttati al meglio nei flussi di progettazione e sviluppo dei prodotti-servizi.

All'interno di questa prima panoramica, inoltre, non si può evitare un accenno alla controversa tematica contemporanea dei Metaversi. Nonostante si sia trattato di un evento episodico, il grande interesse e il fermento che è stato alimentato nei mercati con ingenti investimenti da parte di diverse aziende del panorama Hi-Tech ha contribuito ad aprire molti scenari possibili di progetto. Il concetto di metaverso, pur non essendo nuovo, ha conosciuto una fase di grande visibilità negli ultimi anni in seguito all'interesse delle big tech nel promuovere mondi virtuali persistenti.

Da Second Life fino alle recenti piattaforme immersive, proposte da Meta, l'ambizione di costruire spazi alternativi alla realtà materiale ha generato un vasto dibattito.
Eppure, nonostante gli investimenti, molti di questi progetti non hanno trovato una reale adozione. Le cause sono molteplici: l'accessibilità limitata, i modelli d'interazione poco inclusivi, la bassa interoperabilità tra piattaforme e, soprattutto, la mancanza di un bisogno reale. Tuttavia, i metaversi non vanno scartati in toto, in alcuni casi mostrano il loro potenziale attraverso simulazioni collaborative svolte in ambienti immersivi (Öhlén et al., 2022); un esempio è il Digital Twin di Stoccolma utilizzato da Ericsson's per ottimizzare gli orientamenti delle antenne 5G. Forse il futuro dei metaversi non si colloca nel loro essere "nuove realtà", bensì strumenti operativi di progettazione, formazione, e co-creazione remota. Le possibilità offerte da questi nuovi contesti progettuali immateriali diventano campo di indagine per i designer, specialmente in un momento di transizione in cui il repentino cambio delle tecnologie rispetto all'alfabetizzazione digitale forzata, dettata dai fattori globali esterni che stanno caratterizzando gli ultimi anni, ha comportato un reale cambio dei comportamenti delle persone.
Risulta dunque interessante utilizzare come chiavi di lettura emerse dal dibattito sulla dematerializzazione degli artefatti, i termini "fuga mundi" e "creatio mundi" introdotti da Tomas Maldonado (1994), per identificare due condizioni contrapposte che potrebbero conseguire alla diffusione di questi mondi paralleli. Se la prima denota alienazione aprendo a campi problematici in molti casi non coerenti, la seconda è più propositiva ed ha un potenziale di innovazione molto elevato, su cui investire e sperimentare. Ci si chiede, quindi, quale sia la strada su cui sviluppare una ricerca che affronti questo campo di innovazione definendone le valenze progettuali. In accordo con Theodore Zeldin che sostiene che la vita reale abbia senso fintanto che c'è interazione (2015), un punto di riflessione iniziale di questa ricerca include come l'utilizzo di questi ambienti virtuali, in contesti in cui gli aspetti sociali e la collettività che si generano nel digitale, sviluppino nuovi processi di interazione tra le persone.
Nello specifico l'istruzione e la didattica, campi maggiormente condizionati dalla pandemia, proprio per la loro natura sono ambiti in cui maggiormente queste tecnologie possono portare una reale trasformazione. Parallelamente, le circostanze aziendali e lavorative dove, la moltitudine di informazioni estrapolate dagli utenti e dai prodotti tramite l'Internet of Things (IoT), la Data Analysis e più in generale dalle tecnologie abilitanti, potrebbero essere integrate in sistemi, strumenti e servizi capaci di migliorare la condivisione delle conoscenze all'interno delle organizzazioni.

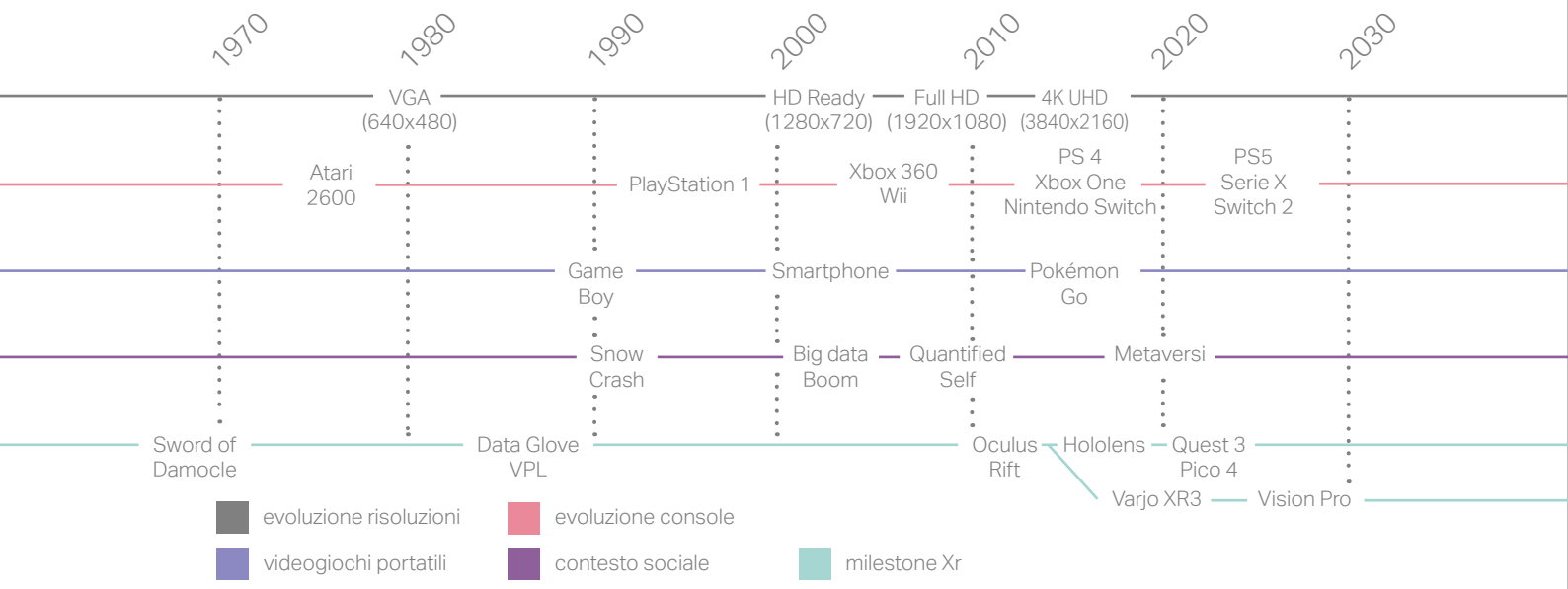


Fig. 1 Visualizzazione sintetica dell'evoluzione del panorama delle tecnologie immersive

1.2 Spazio e processo di ricerca

Le aziende del territorio, spesso espressione delle eccellenze del Made in Italy, anche se distinte da percorsi di evoluzione differenti dettati dalla varietà degli ambiti in cui operano e dalle peculiari capacità di fare fronte agli imprevisti e ai cambiamenti, risultano caratterizzate da un ricco capitale umano assunto e formato in lunghi anni da ognuna di loro e dall'esperienza acquisita da molteplici eventi che ne hanno caratterizzato la loro storia industriale. Un evento che, non si può non menzionare è la quarta rivoluzione industriale, caratterizzata da un cambiamento tecnologico radicale, mirato a rendere le imprese più connesse, intelligenti e agili. Tale paradigma è stato ridotto in molte circostanze a rappresentare limitatamente la rosa di strumenti "abilitanti", perdendo invece il significato di integrazione diffusa delle tecnologie nella produzione industriale, a cui oggi si ambisce con la nuova terminologia "5.0". La recente propagazione di nuove soluzioni tecniche, in particolar modo quelle digitali, hanno rivoluzionato il modo in cui le aziende operano, favorendo una costante compressione dei tempi di sviluppo e produttività maggiori. L'incremento di tali risultati, tuttavia, non corrisponde proporzionalmente ad un miglioramento in termini di riduzione degli impatti sia sull'ambiente, che sulla salute dei lavoratori, protagonisti designati, invece, da questa quinta rivoluzione. In tal senso, si rende necessario un ripensamento delle organizzazioni e dei processi in ottica trasformativa, introducendo un elevato grado di integrazione tra le parti, in modo da garantire una visione sistemica del progetto (Celaschi et al., 2024).
Nello scenario identificato le tecnologie digitali, non ricoprono più solo il ruolo di strumenti di supporto puntuale, ma trasformandosi in agenti di trasferimento, sia espressivo che relazionale, rendono da un lato più comprensibili dati e informazioni, dall'altro veicolano il sapere derivato dall'accumulo di esperienza. Il tema della digitalizzazione, si dimostra estremamente contemporaneo, soprattutto oggi, quando molti progetti ed iniziative, sia locali che europee, promuovono tale direzione. In questa prospettiva, alcuni esempi sono forniti dai SDG 9, 8 e 4 afferenti alle linee guida dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (United Nations, 2015), che pongono al centro la necessità di coniugare trasformazione digitale, tecnologie avanzate, formazione specializzata, inclusione sociale e tutela ambientale. Questi obiettivi sono ripresi anche dai programmi europei come lo "Human-centred and ethical development of digital and industrial technologies" (Horizon Europe Calls 2024 - Destination 6, 2024), dedicato alla digitalizzazione orientata alla persona e, contestualmente, dal documento "Next Generation Virtual Worlds: Societal, Technological, Economic and Policy Challenges for the EU" che identifica nei mondi virtuali un nuovo spazio di innovazione etica e partecipativa (European Commission. Joint Research Centre., 2023). Queste visioni, recepite anche a livello nazionale, trovano una declinazione specifica nella Smart Specialisation Strategy la quale individua nelle tecnologie immersive, nei processi di simulazione e nella gestione intelligente dei dati, gli ambiti prioritari per la competitività e la sostenibilità del sistema produttivo italiano (Agenzia per la coesione territoriale, 2014).
La sfida corrente a cui i gruppi, come SACMI, si trovano a fronteggiare oggigiorno consiste proprio nel mettersi nelle condizioni di far sì che gli strumenti tecnologici possano accompagnare integralmente i processi, abilitando in modo persistente e diffuso i flussi di sviluppo. Si tratta di un lavoro di frontiera che riguarda la raccolta di informazioni e la predisposizione di metodi comuni e trasversali al gruppo che consentano di indirizzare i progetti su binari virtuosi.

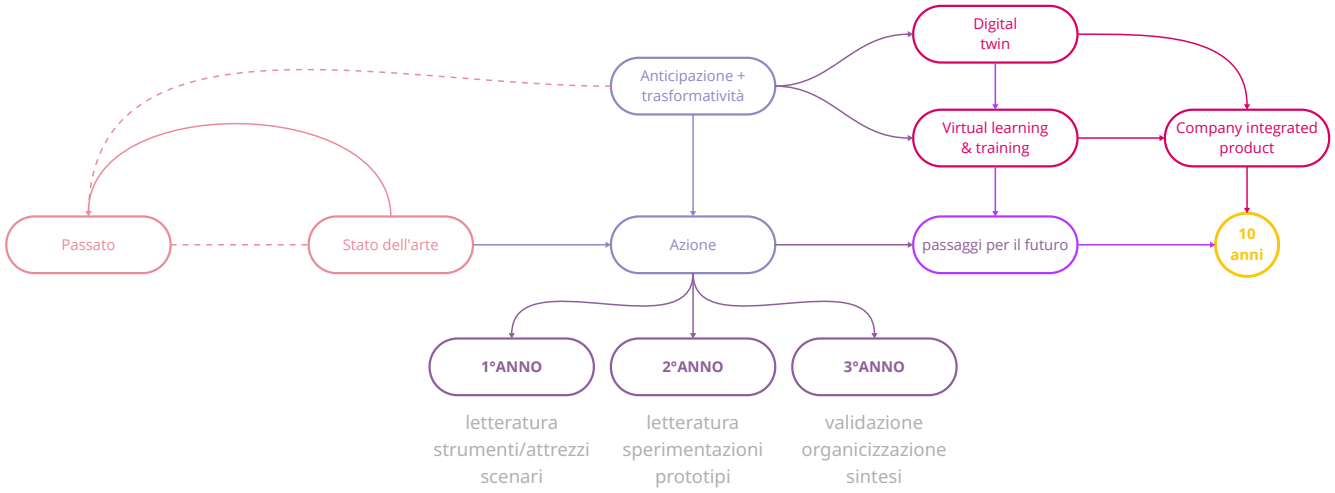
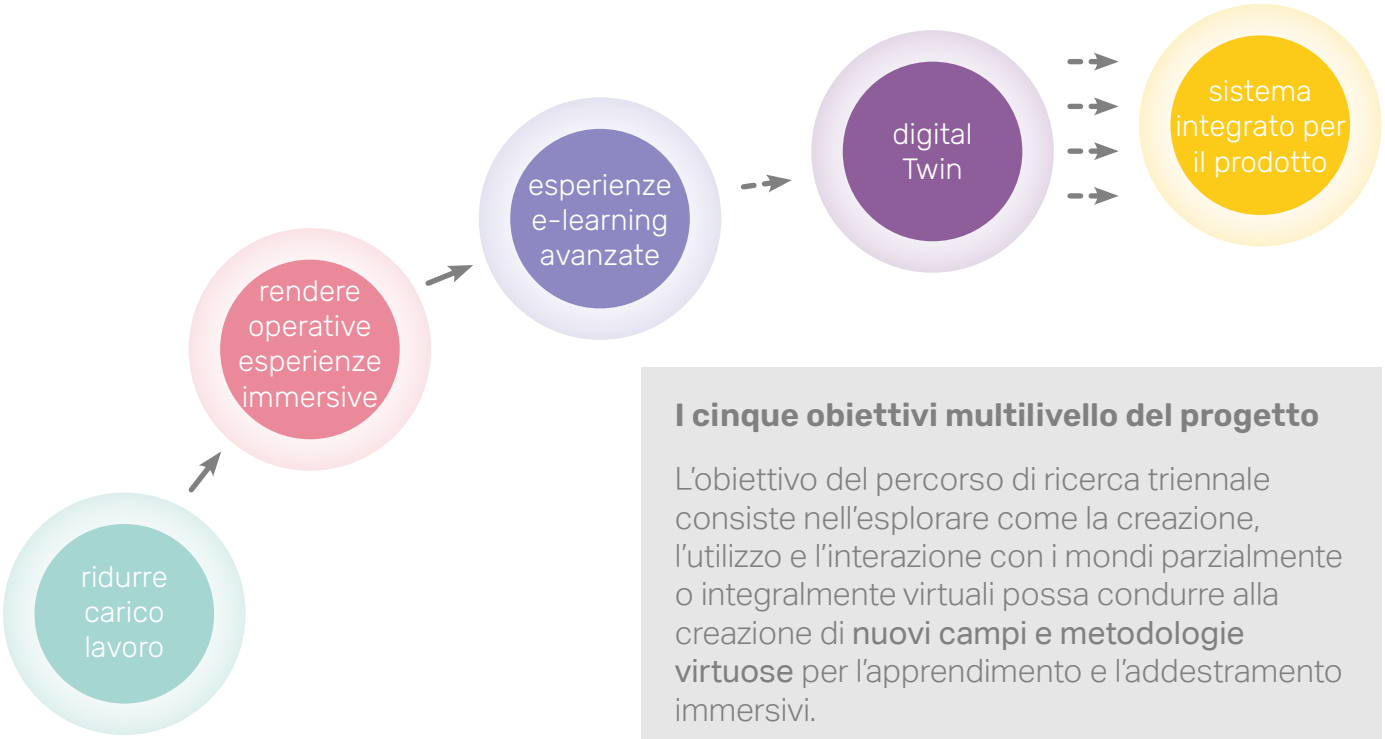


Fig.2 Rodmap iniziale di progetto

Per quanto concerne l'articolazione del lavoro, la realizzazione di una roadmap di contestualizzazione a priori, si è dimostrata uno strumento di orientamento prezioso, grazie al quale è stato possibile a più riprese ritrovare le tracce di ricerca da intraprendere. In particolare, la schematizzazione in questione ha consentito di osservare lo sviluppo della ricerca, nei differenti momenti di riflessione, mettendola in prospettiva ad un contesto proiettato in futuri di medio termine nei quali è risultato più facile normalizzare l'assenza di riscontri immediati.

Lo sguardo rivolto ai futuri, però, ha permesso di identificare l'adozione di un Sistema per Prodotto Integrato Aziendale, quale obiettivo auspicabile per il lungo periodo, potendo conseguentemente individuare a cascata gli obiettivi intermedi per operare la trasformazione, fondamentali per direzionare il lavoro nell'arco del percorso triennale.



I cinque obiettivi multilivello del progetto

L'obiettivo del percorso di ricerca triennale consiste nell'esplorare come la creazione, l'utilizzo e l'interazione con i mondi parzialmente o integralmente virtuali possa condurre alla creazione di **nuovi campi e metodologie virtuose** per l'apprendimento e l'addestramento immersivi.

Fig.3 Scomposizione degli obiettivi del progetto di ricerca

La riduzione del carico operativo, la resa delle esperienze estese più operativa, lo sviluppo di esperienze avanzate di Virtual Learning e la creazione di Digital Twin, sono i gradini propedeutici individuati, da raggiungere, attraverso la digitalizzazione dei processi e l'introduzione di metodologie innovative per l'insegnamento e la formazione virtuale. Questi livelli si collocano all'interno di un quadro più ampio in cui la realtà estesa (XR) rappresenta l'ambiente tecnologico di riferimento a supporto di un approccio in cui la formazione, la simulazione e la rappresentazione digitale convergono in un unico ecosistema orientato al miglioramento dell'efficienza della conoscenza condivisa e della sostenibilità organizzativa.
Nel quadro delineato, il percorso triennale è stato strutturato attraverso l'integrazione di approcci metodologici differenti e complementari, capaci di sostenere riflessioni progettuali orientate alla trasformazione dei processi e delle organizzazioni. In primo luogo, l'Advanced Design che caratterizza tutto il lavoro del gruppo di ricerca all'interno del quale questo progetto è stato sviluppato, ha contribuito alla messa in prospettiva degli obiettivi definendo una cornice anticipatoria.
Ne deriva una dimensione esplorativa rivolta a futuri di medio-lungo termine, nei quali le tecnologie digitali non sono considerate esclusivamente per le loro applicazioni immediate, ma come leve strategiche per l'evoluzione dei sistemi socio-tecnici (Celaschi, 2017). Inoltre, in continuità con i framework e le figure delineate dal contributo teorico dell'Advanced Design Unit, il lavoro ha subito l'influenza del Transitional Industrial Design e del Digital Advanced Design praticati e affinati durante lo svolgimento del progetto PNRR MICS – Spoke 1, caratterizzandone il percorso nella visione del progetto come dispositivo di mediazione capace di mettere in evidenza criticità, resistenze e potenzialità dei processi industriali osservati, e permettendo di sperimentare modalità di transizione graduale piuttosto che rotture radicali (Manzini, 2015). In questo senso la progettazione intenzionale di azioni e artefatti digitali concepiti come veicoli transitori verso nuove modalità operative e sistemiche segue la traiettoria delineata dalla shelf innovation. Gli interventi in questione non sono stati pensati come soluzioni definitive, ma come dispositivi intermedi capaci di rendere tangibili scenari futuri, attivando processi di apprendimento e familiarizzazione progressiva con nuovi strumenti e linguaggi digitali (Bertola & Teixeira, 2003).

Fig.4
Focalizzazione del contesto della ricerca

Infine, il paradigma Research through Design ha svolto un ruolo trasversale rendendo le attività di contribuzione alla realizzazione di demo e prototipi, elementi centrali del processo di sviluppo della ricerca. La produzione di artefatti sperimentali ha contribuito a rendere l'atto progettuale uno strumento di indagine e riflessione critica (Zimmerman, Forlizzi, & Evenson, 2007). L'interazione sinergica tra questi approcci ha dato luogo a un percorso non lineare, in cui anticipazione, sperimentazione e contestualizzazione si sono alimentate reciprocamente, contribuendo alla costruzione di una comprensione progressiva e situata dei fenomeni indagati.
Addentrandosi nel merito dell'aspetto teorico, l'approfondimento verticale si è sviluppato da un livello più generale relativo ai Wicked Problems, che permeano il contesto attuale, approdando alle specifiche delle applicazioni in XR, attraverso un processo di concentrazione progressiva della ricerca: dalla complessità sistemica delle questioni contemporanee, alla sperimentazione di strumenti digitali concreti. In questa sequenza, la dematerializzazione e la digitalizzazione si configurano come passaggi mediani necessari per raggiungere la piena integrazione tecnologica del paradigma 5.0, che funge da punto di convergenza tra efficienza produttiva, benessere umano e sostenibilità ambientale. La progressione connota un percorso non lineare ma circolare, in cui teoria e pratica si alimentano reciprocamente, trasformando ogni sperimentazione in occasione di sintesi e apprendimento. Prendendo in esame il percorso effettivamente svolto, a partire dallo studio dello stato dell'arte, durante il quale sono state individuate le diverse traiettorie di approfondimento sia teorico che pratico da inseguire, la ricerca si è dipanata secondo l'alternanza di momenti divergenti, che hanno condotto all'applicazione di Proof of Concept e dimostrazioni

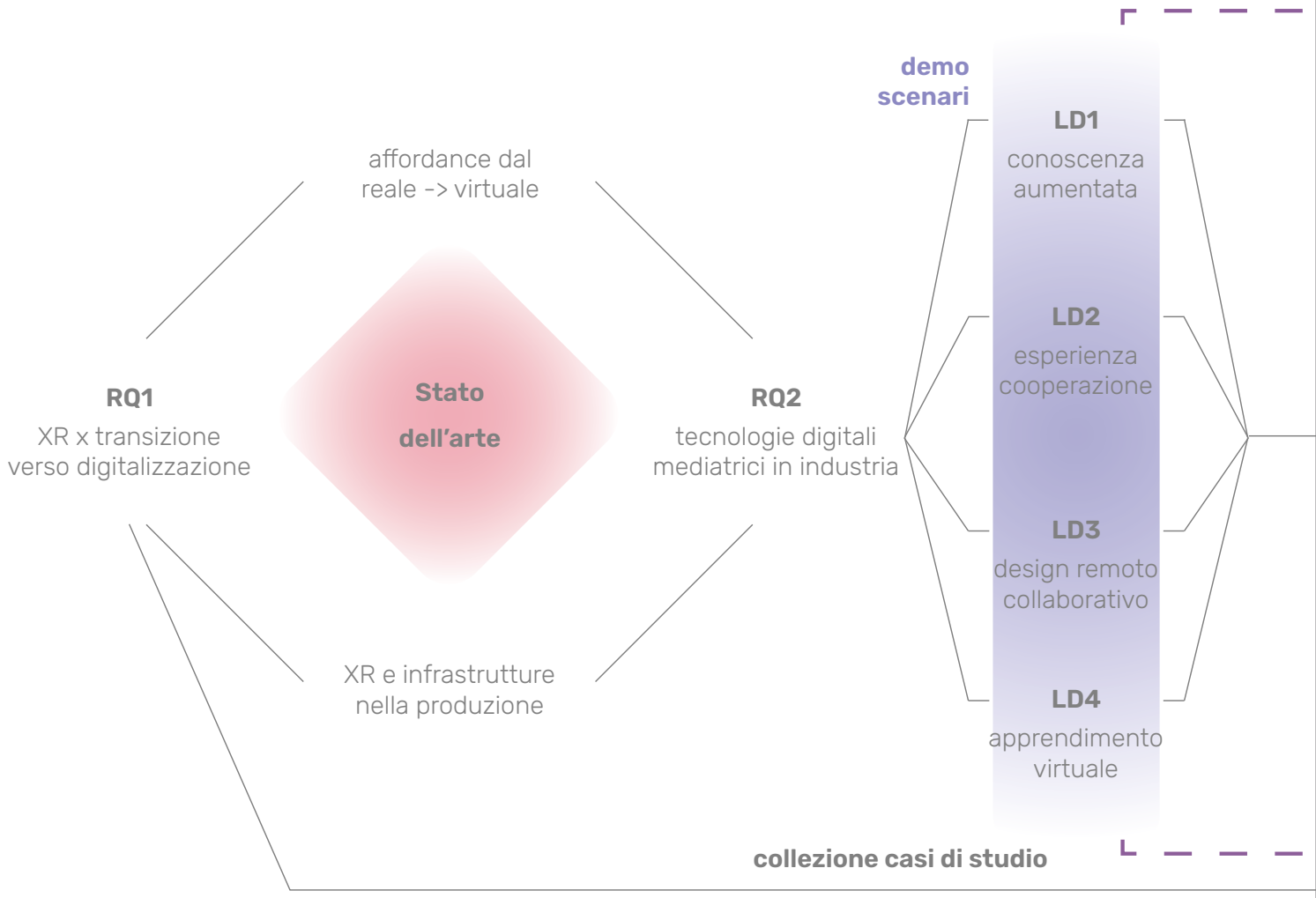
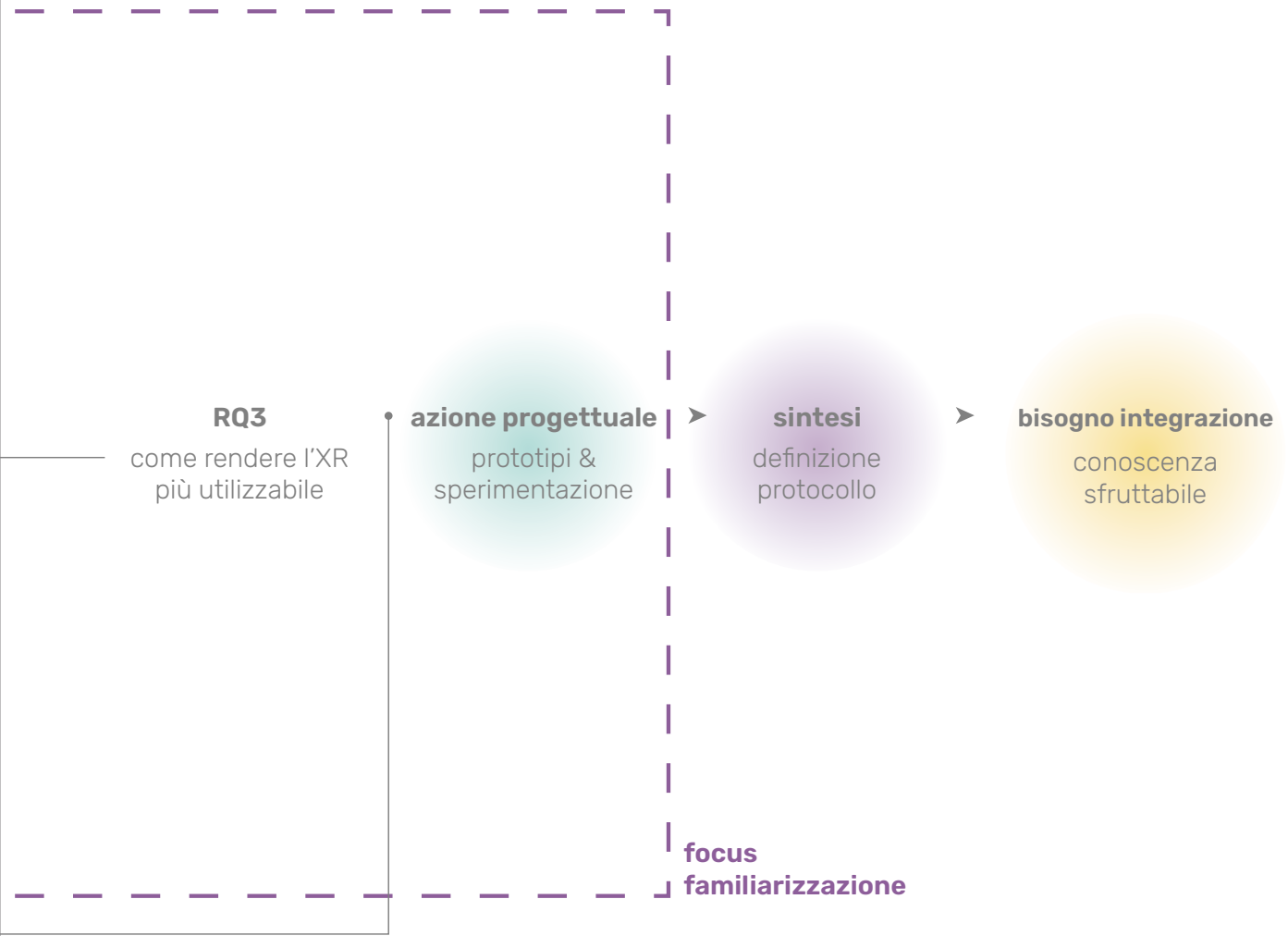


Fig.5 Schema delle fasi metodologiche percorse durante il progetto di ricerca

quali momenti di osservazione, e convergenza, tramite l'articolazione di domande di ricerca progressivamente più specifiche, con le quali innescare la fase divergente successiva. Contestualmente è stata portata avanti una ricerca riguardante i casi di studio che ha offerto numerosi e interessanti spunti relativi a tecnologie e impieghi di frontiera, dimostrando l'incessante lavoro di sviluppo dietro agli strumenti che, insieme all'intelligenza artificiale, ridisegneranno la società nei prossimi anni. Connotazione trasversale a tutto il progetto, è l'attitudine design-driven, ovvero l'osservazione da punti di vista insoliti o differenti dall'usualità e il costante tentativo di digerire le informazioni prima della restituzione, in modo da facilitarne la comprensione; veicolando il carattere di mediazione tipico della disciplina. In questo senso, oltre alle interviste, di grande importanza le mappature, estremamente utili per direzionare il lavoro e renderlo comunicabile verso l'esterno.
Completando il quadro generale di contesto e metodologia della ricerca, si propone una breve panoramica del flusso dei temi affrontati e dei momenti sperimentali svolti.

La prima fase ha visto l'indagine orientata alle tecnologie e alle esperienze immersive, successivamente approfondite, indagandone gli aspetti percettivi e il ruolo dei sensi. Il lavoro è poi proseguito con lo studio nell'ambito del Virtual Learning, le contestuali attività di intervista e la collaborazione all'interno dell'impresa. Tutto ciò ha contribuito alla definizione dell'acquisizione e dell'interiorizzazione quali nodi centrali del processo in analisi, indirizzando il focus verso il macro-tema della conoscenza e dei suoi processi di trasferimento. In questa direzione, un grande impulso è stato offerto dai Proof of Concept attraverso i quali sono state testate le potenzialità e le criticità di software e sistemi con cui veicolare nuove modalità di lavoro.



Ripartendo dal nucleo concettuale dell'assimilazione, è stata effettuata una scomposizione in termini di componenti esperienziali e umane. Nel primo caso sono state rianalizzate le attività legate all'ambito della documentazione tecnica, distinguendo i benefici, frutto dell'utilizzo degli ambienti reali, da quelli riscontrabili in scenari virtuali.
Grazie a questa sintesi e stato possibile individuare un interstizio nel quale il supporto della realtà estesa può favorire la comunicazione e la collaborazione producendo valore (Nguyen & Bednarz, 2020).
Relativamente alle componenti umane, si è reso necessario operare un'ulteriore frammentazione, a valle della quale sono stati presi in considerazione i fattori: corporeo, psicologico e relazionale (sia tra individui, sia con l'ambiente esterno). In questo senso il tema trasversale è diventato quello dell'interazione, non solo necessario per mettere a sistema gli elementi appena descritti, bensì per armonizzare le componenti di partenza (comunicazione e collaborazione). Conseguentemente è scaturito uno sviluppo derivato dall'esame sui temi dell'affordance e della presenza, naturali punti di incontro tra uomo e ambiente circostante, che hanno sottolineato l'importanza della multimodalità degli stimoli, conducendo a sperimentazioni in ambito aptico (Rakkolainen et al., 2021).
In questo frangente, agendo in ottica di convergenza tra gli esiti raccolti, sono stati definiti alcuni scenari sperimentali di sviluppo che coadiuvassero gli aspetti informativi, conoscitivi e collaborativi in contesti di realtà estesa a coinvolgimento e presenza aumentati (Rauschnabel et al., 2022). Questo lavoro si è dimostrato particolarmente utile in relazione al desiderio di studiare come le persone interagiscano con la realtà estesa, per identificare quali pratiche e modalità permettessero di creare esperienze realmente immersive e cognitivamente stimolanti. Attraverso l'analisi delle procedure di best practice e lo studio della progettazione su misura di queste esperienze, è stata condotta una revisione sull'importanza dei dati e delle informazioni, rappresentati questa volta da mockup digitali e su come questi debbano essere gestiti in maniera più fluida e condivisa, al fine di risparmiare energia, tempo e costi, impattando positivamente anche sui lavoratori.
Come ulteriore esito delle demo sviluppate in accordo agli scenari, si è distinta la criticità legata alla familiarizzazione degli utenti con le strumentazioni e le dinamiche insite nell'utilizzo di ambienti virtuali, rappresentando un'interruzione del ciclo di retroazione che pregiudica l'efficacia della componente comunicativa e informativa delle esperienze immersive. Pertanto, la fase finale di sperimentazione, è stata orientata a valutare la fattibilità di trasferire informazioni di carattere operativo, all'interno di ambienti e procedure complesse, tramite input aptici. Ne deriva, in conclusione, la creazione di primi strumenti a servizio dei progettisti che lavorano in ambito immersivo, per operare sull'esperienza e sull'interfaccia, affinché si possano restituire all'utente una quantità di feedback più prossima a quelli ricevuti da uno strumento in utilizzo in uno spazio reale.

1.3 Simulazione: quando il digitale abilita

Individuato e descritto l'inquadramento del progetto di ricerca, segue una prima sintesi derivante dalle possibilità offerte dalle tecnologie digitali ne circoscritto ambiente industriale. In un mercato sempre più vasto e competitivo, il fattore tempo riveste un ruolo estremamente importante nella progettazione, produzione e fruizione degli artefatti. In generale, anticipare i concorrenti significa conquistare porzioni significative di mercato, in questo contesto, velocizzare i processi di ideazione, simulazione, comunicazione e decisione è cruciale e richiede sforzi considerevoli. Le metodologie e gli strumenti di digitalizzazione dei processi, contribuiscono a rispondere a tali esigenze: da un lato, affiancare il digitale a un prodotto o a un servizio ne estende l'uso e il coinvolgimento dell'utente; dall'altro, disporre di modelli informatizzati permette lavorazioni, modifiche e condivisioni, sufficientemente rapide richiedendo un dispendio limitato di risorse.

Il paradigma dell'industria 4.0, e la sua più attuale estensione verso gli scenari 5.0, si fonda sulla capacità di combinare mondi fisici e virtuali in ecosistemi ibridi, dove dati modelli e intelligenza artificiale concorrono a creare continuità tra le fasi progettuali e quelle operative (Leng et al., 2022; Xu et al., 2021). Gli strumenti digitali abilitanti, tra cui il reverse engineering, i Digital Mockup, le simulazioni numeriche e la realtà virtuale, agiscono come agenti in grado di amplificare la conoscenza dell'oggetto e del processo, rendendo l'intervento umano in ottica di prevenzione, più informato e controllato.
Il primo tema affrontato, riguarda l'acquisizione della realtà quale parte rilevante dell'interaction design e delle pratiche di visualizzazione, poiché consente di creare corrispondenza tra il mondo reale e la sua rappresentazione virtuale (Natkin & Yan, 2005; Whitton et al., 2005). Il processo di dematerializzazione, anche se datato nella concezione è tuttora in corso, influenza non solo i sistemi prodotto-servizio, ma tutte le fasi e le attività delle culture del progetto e dello sviluppo. Ad esempio, i termini Digital Mock-up e Digital Twin identificano un paio di esempi di approcci ai contenuti digitali che possono essere costruiti in ambito industriale e di ricerca, al fine di ottenere elementi da analizzare, verificare, e manipolare in modo semplice, rapido e non invasivo sull'insieme del lavoro da compiere (Siltanen & Heinonen, 2020).
Il digital mockup, in particolare, rappresenta la base per la costruzione di flussi progettuali dematerizzati. Esso consente di creare un modello tridimensionale completo del prodotto o dell'impianto, capace di simulare forma, funzionalità e comportamento. La sua funzione principale è verificare ingombri, garantire la compatibilità tra le componenti e ridurre il numero di prototipi fisici necessari. Questa tecnica, ereditando dalle pratiche del Reverse Engineering, la possibilità di acquisire geometrie reali tramite scansione 3D e di riportarle all'interno del ciclo di progettazione digitale, può essere estesa ad ambienti o prodotti già esistenti.
L'evoluzione del Mockup consiste nel Digital Shadow, ovvero, una rappresentazione dinamica che mantiene un collegamento costante con i dati reali provenienti dal sistema fisico, consentendo di monitorarne il funzionamento. Se il mockup è una fotografia statica del progetto, il digital shadow è un flusso continuo di informazioni aggiornate in tempo reale, in grado di riflettere le condizioni operative del prodotto. La sua applicazione è particolarmente utile in contesti industriali complessi, dove l'interazione tra elementi fisici e digitali deve essere costantemente monitorata e validata. L'oramai celebre Digital Twin, invece, costituisce un vero e proprio gemello virtuale dell'oggetto fisico, essendo in grado di replicarne in modo accurato il comportamento, la risposta e lo stato operativo. L'integrazione tra modello digitale e sensori permette di eseguire simulazioni predittive, valutazioni di performance e test di manutenzione senza interrompere il ciclo produttivo, delineandosi come sistema adattivo che apprende dai dati e aggiorna costantemente le proprie previsioni (Sepasgozar, 2021).

Restando in ambito predittivo costituiscono il corpo degli strumenti digitali abilitanti anche le simulazioni numeriche, tra cui gli esempi più noti afferiscono agli approcci Computer Aided Engineering (CAE), utilizzati in campo fluidodinamico o strutturale. In sostanza, partire da un modello matematico confezionato e validato, secondo appropriate interazioni di convergenza, consente la valutazione del comportamento degli oggetti in contesti specifici senza la necessità del prodotto reale finito. In questo senso, la simulazione si configura come una forma di conoscenza esperienziale mediata dal digitale. Altra caratteristica significativa è la possibilità di integrare questi approcci con sistemi di apprendimento automatizzati, i quali consentono di affinare iterativamente i modelli sulla base dei risultati raccolti, determinando importanti incrementi di efficacia.
Questa combinazione di dati, calcolo e AI porta alla creazione di modelli Sim-to-Real, nei quali l'addestramento virtuale di macchine e robot trova una delle applicazioni nel mondo reale più dirette (MIT Technology Review, 2025; Zhao et al., 2020).

Gli esempi provenienti dall'industria mostrano come la simulazione predittiva rappresenti ormai un passaggio centrale del processo progettuale, consentendo di prevedere fallimenti, ottimizzare sequenze operative e pianificare campagne di manutenzione, senza tralasciare la funzione formativa. I Virtual Manufacturing Laboratories (Bal, 2012) e i sistemi di realtà aumentata applicati alla didattica tecnica (Alshaer, 2023) rappresentano alcuni casi pratici in cui l'approccio simulativo è impiegato per potenziare l'apprendimento pratico, permettendo di sperimentare scenari di rischio, senza esporre l'utente a pericoli reali. In questo modo, la simulazione diventa ponte tra conoscenza teorica e esperienza operativa, abilitando un trasferimento di competenze più rapido ed efficace (Komulainen & Løvmo, 2014; Viacheslavovich & Aleksandrovich, 2019).

L'ultimo strumento accennato consiste nella realtà estesa, la quale costituisce oggi uno degli approcci più promettenti per la trasformazione dei processi di progettazione e formazione. In continuità, quindi, con i modelli virtuali tridimensionali e l'orientamento simulativo precedentemente descritti, essa consente di costruire spazi fittizi che riproducano fedelmente ambienti fisici, permettendo all'utente di esplorare, manipolare e comprendere sistemi complessi in modo esperienziale. A differenza delle rappresentazioni statiche, la XR genera presenza e coinvolgimento, elementi che migliorano la comprensione e l'apprendimento derivati dalle esperienze virtuali (J. Lee et al., 2018).

Approfondendo il piano progettuale, gli strumenti immersivi permettono di validare soluzioni in fase preliminare, di simularne ergonomia e sicurezza, valutandone la disposizione dei componenti o la visibilità all'interno di macchinari complessi. La possibilità di "abitare" il progetto consente di evidenziare criticità altrimenti invisibili nelle rappresentazioni fruibili bidimensionalmente. In aggiunta, l'integrazione con i Digital Twin apre alla possibilità di collaborare in remoto in ambienti virtuali condivisi, dove più utenti hanno la possibilità di intervenire simultaneamente sullo stesso modello, visualizzando modifiche e aggiornamenti in tempo reale (Biener et al., 2023).
Si delinea dunque come particolarmente interessante, anche se indubbiamente complesso nella gestione, il tema della visualizzazione dei dati e delle informazioni in ambiente immersivo. In questi termini, un esempio di realtà virtuale volta a migliorare la comprensibilità nel campo della visualizzazione dei dati, emerge da una ricerca australiana condotta con l'obiettivo di esplorare il concetto di Data Visceralisation (Lee et al., 2021).

La domanda di fondo è: come può essere potenziato il significato dei dati?

La risposta ipotizzata dal gruppo di ricerca riguarda un'esperienza che evochi sensazioni viscerali nell'utente, per facilitare la comprensione intuitiva di misurazioni e quantità fisiche. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati ricreati sei scenari basati su dataset reali, nei quali sperimentare diverse tipologie di rappresentazione, attraverso l'uso di analogie e comparazioni di valori in relazione a scale o misurazioni familiari agli utenti finali.

Questo scenario sottolinea, dunque, la mediazione e il pragmatismo del ruolo del design, che deve portare alla luce tale significato e scegliere con attenzione le dinamiche di espressione. L'esempio riportato è sintomatico dell'enorme potenziale dei nuovi sistemi XR nel supportare i designer nell'immaginare esperienze sempre più significative. La trasformazione in atto, quindi, non riguarda soltanto la tecnologia, ma il modo di pensare il progetto. Gli strumenti individuati ampliano la capacità di visualizzare scenari alternativi e di testare ipotesi, mettendo gli attori dei processi, siano essi ingegneri, operatori o designer, nelle condizioni di collaborare proficuamente su un terreno comune, configurandosi come facilitatori.

2. Metamorfosi del digitale

Dalla finzione alla realtà

L'espansione dei mondi virtuali e delle tecnologie immersive sta ridisegnando il rapporto tra esseri umani, strumenti, ambienti, portando il design a confrontarsi con una dimensione di esperienza sempre più complessa, ibrida e multisensoriale. L'interazione con gli artefatti digitali non si esaurisce più nella mediazione visiva, ma si estende a un campo percettivo ampliato, in cui il corpo è protagonista e la percezione diventa veicolo di conoscenza. La realtà estesa, nelle sue declinazioni di realtà virtuale, aumentata e mista, non rappresenta soltanto un'evoluzione tecnologica, bensì un terreno culturale e progettuale, capace di ridefinire la nozione stessa di presenza e di interfaccia. In questo scenario, il design assume il compito di indagare e orchestrare la relazione tra linguaggi digitali, forme di interazione e sistemi sensoriali, conferendo significati e continuità tra mondo fisico e mondo simulato.

La riflessione sul concetto di affordance diventa così il punto di partenza per comprendere le modalità con cui l'utente riconosce, interpreta e agisce negli ambienti virtuali. Le esperienze immersive mettono alla prova la capacità del progetto di creare contesti coerenti, nei quali la percezione di possibilità d'azione, costruita attraverso forme, suoni, gesti e feedback, genera fluidità e partecipazione. La qualità di un sistema immersivo dipende, dunque, non solo dalla precisione tecnica o dal realismo grafico, ma dalla capacità di costruire relazioni di significato creando ambienti che parlino al corpo attraverso segnali visivi, uditivi, olfattivi o tattili che ne facilitino la comprensibilità.

La progressiva integrazione di tecnologie per la restituzione multisensoriale, dal suono direzionale alla simulazione tattile, fino alla riproduzione di stimoli olfattivi e termici, conferma come l'interazione sia da metabolizzare sempre più come un fenomeno incarnato. I sistemi di feedback aptico, in particolare, costituiscono una frontiera di sperimentazione interessante, restituendo al corpo la possibilità di toccare il virtuale, ricreando una dimensione di "fiducia percettiva" che il canale visivo, da solo, non è in grado di garantire. A riprova di ciò, le ricerche retrostanti tali dispositivi, si stanno sempre più concentrando sull'introduzione di grammatiche tattili che aprano nuove forme di linguaggio, comunicazione e apprendimento.

I progetti e le sperimentazioni esaminate nei capitoli successivi mostrano come il design, inteso come pratica di mediazione tra umano e tecnologia, stia progressivamente assumendo un ruolo cruciale nel guidare questa transizione. La sfida non consiste più soltanto nel rendere accessibili le interfacce o migliorare l'efficienza dei sistemi, ma costruire ambienti capaci di includere sensorialità, emozioni e cognizioni, favorendo una comprensione più naturale degli spazi virtuali. L'obiettivo è quello di sviluppare esperienze in cui l'azione della tecnologia si risolva nella notifica, restituendo centralità all'azione umana e continuità tra presenza fisica e presenza aumentata. In questo orizzonte, l'azione progettuale si configura come sforzo generativo per nuovi contesti e spazi esperienziali in cui il corpo diventa interfaccia e il significato nasce e si esprime tramite il movimento e il tocco.

2.1 Strumenti per recitare la virtualità

Negli ultimi anni, il settore della realtà estesa (XR) ha conosciuto una crescita considerevole, consolidandosi come comparto promettente dell'economia digitale. Secondo alcune stime, il valore globale del settore ha raggiunto nel 2024 i 128,8 miliardi di euro e si prevede una crescita che su arco decennale potrebbe raggiungere circa 2500 miliardi, generando volumi ingenti di posti di lavoro specializzati (Aslop, 2024; Extended Reality (XR) Market Size | Forecast Analysis 2033, 2024). Questa espansione non è imputabile solo alla diffusione dei visori o dei dispositivi di tracciamento, ma alle progressive integrazioni delle tecnologie immersive nei processi di progettazione, formazione e comunicazione anche in ambito industriale. In altri termini, la realtà estesa può essere considerata come un'infrastruttura abilitante in grado di trasformare il modo in cui i dati e le informazioni vengono visualizzate, interpretate e condivise, potenziando la collaborazione tra competenze differenti.
La spinta tecnologica, in questo ambito, è accompagnata da un progressivo aumento dell'interesse verso applicazioni specialistiche e professionali, in contrasto quindi, con le fasi embrionali in cui la VR era considerata un'esperienza prevalentemente ludica. La recente attenzione riservata al metaverso prima e l'evoluzione dei dispositivi indossabili poi, hanno riportato in primo piano la dimensione esperienziale e sensoriale dell'interazione uomo-macchina, generando una domanda crescente di ambienti immersivi che fossero accessibili, scalabili e sostenibili. In questo contesto, la ricerca assume il compito di indagare come le tecnologie XR possano diventare strumenti progettuali capaci di amplificare l'intelligenza collettiva e facilitare la transizione verso ecosistemi digitali più consapevoli e condivisi.

La storia della realtà virtuale è costellata da momenti chiave che ne hanno determinato la maturazione tecnologica e culturale. Nel 1968, all'Università dello Utah venne sviluppato il primo head-mounted display stereoscopico, soprannominato "Sword of Damocles" per la struttura meccanica sospesa al soffitto necessaria a sostenerne il peso (Sutherland, 1968). Da allora gli approcci immersivi hanno visto un continuo sviluppo seguendo la tipica curva esponenziale, negli anni Ottanta, la neo istituita VPL Research sviluppa il DataGlove, introducendo per la prima volta il controllo gestuale, tramite sensori in fibra ottica integrati all'interno di un guanto (Zimmerman et al., 1986), mentre la comparsa del Virtual Boy di Nintendo nel 1995, anche se dismesso l'anno seguente a causa di limitazioni tecniche e ricezione commerciale tiepida, rappresenta il primo tentativo commerciale di portare la VR nel mercato consumer (Zagal & Edwards, 2024).
L'avvento degli anni Duemila è segnato dal lancio tramite Kickstarter del progetto Oculus Rift, il quale raccogliendo 2,4 milioni di dollari nel 2012, fa sì che possa essere considerato il punto di partenza dell'imminente democratizzazione seguente, culminata dall'acquisizione da parte del gruppo Meta, ai tempi Facebook. Il momento in questione, inoltre, apre l'era delle esperienze immersive coniuganti realismo, interattività e portabilità attraverso dispositivi standalone sia per la realtà virtuale sia per quella aumentata. Tra i casi emblematici si annoverano: la famiglia Microsoft HoloLens caratterizzata dall'introduzione della logica collaborativa tramite telepresenza (Leonard & Fitzgerald, 2018) e la piattaforma Meta Quest che ha reso definitivamente l'esperienza wireless largamente accessibile al grande pubblico. Oggigiorno, la frontiera più avanzata del settore è costituita dall'interesse crescente per le interfacce neurali o brain-computer interfaces (BCI) non invasive, che rappresentano il passaggio dall'interazione mediata da dispositivi esterni a forme di comunicazione dirette tra volontà e ambiente digitale (Lahtinen, 2024).

Dalla ricerca desk e dalla raccolta di casi studio è emerso come il panorama che circonda le soluzioni e il mercato delle tecnologie digitali per il settore industriale sia estremamente articolato.

A fronte della grande entropia riscontrata, nel tentativo di catalogare e riordinare quanto raccolto, è stato condotto un lavoro di raggruppamento iniziato dall'individuazione dei macrotemi ricorrenti, in seguito messi a sistema in modo da individuare tra i campi quattro intersezioni caratteristiche che suggerissero altrettanti tag trasversali e rappresentativi: organizzazione, simulazione, applicazione e tecnologia.

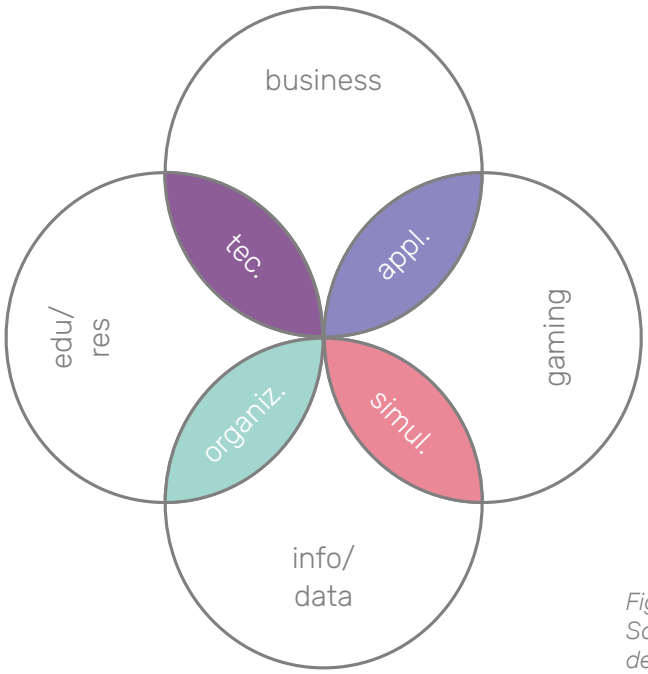


Fig.6
Schema delle relazioni tra gli ambiti dei casi di studio e cluster emergenti

Nell'intento di chiarire la classificazione dei progetti inclusi nei differenti cluster e proseguire nella costruzione dell'ambito della ricerca, si accennano alcuni esempi caratterizzanti ogni tipologia.

Le esperienze ricondotte al tag organizzazione dimostrano come sistemi digitali e piattaforme, fornendo infrastrutture organizzate e potendo incorporare esperienze immersive e modelli tridimensionali, possano agire come strumenti di governance e coordinamento nei processi complessi, favorendo collaborazione e condivisione nella gestione della conoscenza. I criteri di selezione degli esempi sono concentrati principalmente su tre dimensioni fondamentali. In primo luogo, è stata valutata la capacità delle piattaforme di integrare nativamente strumenti di visualizzazione tridimensionale e collaborazione sincrona, privilegiando soluzioni che permettessero l'interazione simultanea di team distribuiti geograficamente. In secondo luogo, si è considerata l'interoperabilità con ecosistemi CAD/CAE consolidati, poiché l'adozione industriale richiede continuità con i flussi di lavoro esistenti piuttosto che rivoluzioni radicali. Ultima, è stata la presenza di funzionalità di strutturazione dei dati e tracciabilità delle modifiche, elementi essenziali per settori regolamentati come quello manifatturiero, automotive e aerospaziale. Questi indicatori hanno orientato la selezione verso soluzioni mature, già validate in contesti enterprise, escludendo prototipi accademici o applicazioni consumer non scalabili a livello industriale.
In quest'ottica, Teamcenter, suite software di Siemens, rappresenta un punto di riferimento nell'evoluzione del Product Lifecycle Management verso dimensioni immersive e collaborative (Software PLM | Siemens Teamcenter, s.d.). Lanciato originariamente nel 2002 come piattaforma di gestione dati di prodotto (PDM), Teamcenter ha progressivamente integrato capacità di visualizzazione evolute che ne hanno trasformato la natura da repository documentale ad ambiente operativo tridimensionale.

L'architettura modulare consente ai team di ingegneri di lavorare su Digital Twin sincronizzati in tempo reale, visualizzando non solo geometrie ma anche metadati di processo, vincoli di assemblaggio e annotazioni tecniche sovrapposte ai modelli 3D. Questa capacità risulta particolarmente efficace nelle fasi di Design Review e Virtual Prototyping, dove la possibilità di esplorare un assieme complesso in scala 1:1 attraverso visori VR riduce drasticamente il ricorso a prototipi fisici costosi.
L'integrazione con Cortona3D estende queste funzionalità alla generazione automatica di documentazione tecnica interattiva, trasformando modelli CAD in manuali di manutenzione navigabili in realtà aumentata. Tuttavia, l'efficacia del sistema dipende criticamente dalla disponibilità di Digital Twin completi e accurati, una condizione raramente soddisfatta. (Cao et al., 2013).
Inoltre, l'investimento richiesto, tanto economico quanto in termini di riconfigurazione organizzativa, limita l'adozione alle grandi imprese con processi di sviluppo prodotto già digitalizzati. Tuttavia, Teamcenter rimane il benchmark di riferimento per comprendere come le tecnologie XR possano trasformare la collaborazione ingegneristica da sequenziale a simultanea, da locale a distribuita, da gerarchica a reticolare.

Analogamente, Windchill con Vuforia (Gestione dei processi di assistenza | PTC, s.d.; Ricci & Scarcelli, 2022) ed Enovia con 3DExperience (3DExperience Enovia, 2022), supportano l'integrazione dei Digital Twin e più in generale la gestione e il controllo su tutti i prodotti virtuali generati con software afferenti ai medesimi ecosistemi, includendo strumenti di co-design e simulazione in ambienti cloud-based e permettendo la gestione di progetti distribuiti e la formazione simultanea di gruppi anche dislocati geograficamente (Zhang et al., 2024). Tutti i sistemi menzionati, quindi, sono capaci di supportare continuativamente le fasi di progettazione e ingegnerizzazione, contribuendo alla riduzione degli errori e dei tempi di sviluppo, facendo sì che i processi di scelta di un ambiente anziché dell'altro dipendano prevalentemente dalla compatibilità della natura e dai programmi abitualmente utilizzati per la realizzazione dei Mockup 3D già a disposizione, al fine di poterne massimizzare lo sfruttamento. Tali esperienze mostrano come queste metodologie non sostituiscano il lavoro umano, ma lo rendano più efficiente in termini di dispersione, contribuendo a ridefinire buone pratiche di lavoro organizzato e introducendo modalità di partecipazione che superano la sequenzialità dei processi tradizionali, favorendo paradigmi più reticolari e sistemici.

Il cluster relativo alla simulazione raccoglie casi in cui: software, Mockup digitali e realtà estesa sono utilizzati come piattaforme, di addestramento, previsione o validazione.
La cernita ha seguito criteri specifici orientati alla validazione tecnica e al trasferimento di competenze. Centrale è stata l'identificazione di soluzioni che integrassero motori fisici accurati e rendering fotorealistico, elementi indispensabili per garantire la trasferibilità delle competenze acquisite in ambiente virtuale verso contesti operativi reali (principio Sim-to-Real). Inoltre, oggetto di analisi riguarda la capacità di integrare dati operativi reali (sensori IoT, digital twin dinamici, parametri fisiologici) all'interno delle simulazioni, trasformandole da esercitazioni statiche a scenari adattivi capaci di replicare la complessità del mondo fisico. In considerazione è stata contata l'eventuale presenza o possibilità di implementare di sistemi di valutazione automatizzabili, estremamente importanti per quantificare l'efficacia delle esperienze e contemporaneamente utili alla comprensione delle difficoltà riscontrati dagli utenti.
Emergono, dunque, soluzioni che coniugano rendering ad alta fedeltà, motori fisici e integrazione con dati operativi per creare ambienti di prova a rischio nullo. Il motore grafico Unity, ad esempio, presenta una famiglia di soluzioni, tra cui Industry, Reflect e Simulation, dedicate alla realizzazione di ambienti virtuali ed esperienze immersive, con utilizzo specifico nel virtual commissioning consentendo di validare cinematismi,

collisioni, layout e sequenze di montaggio prima dell'avvio reale, riducendo rilavorazioni e tempi di sviluppo (Unity Industry Product Walkthrough, s.d.). Non da meno Unreal Engine, il quale grazie a strumenti come Twinmotion, supporta simulazioni architettoniche e impiantistiche con visualizzazione fotorealistica e logiche di imitazione e valutazione riguardo affollamento, vie di fuga e visibilità di segnali/strumenti (Twinmotion Is a Cutting-Edge Real-Time Visualization Tool, s.d.). Il valore risiede nella possibilità di abitare lo spazio progettato e verificare requisiti funzionali ed ergonomici in modo iterativo e interattivo.

Un caso di studio emblematico di come la realtà virtuale possa rivoluzionare la formazione tecnica in contesti ad alta criticità è rappresentato dal sistema Airbus End-to-End Training. Sviluppato inizialmente per ridurre i costi e i rischi associati all'addestramento su aeromobili reali, il sistema ha progressivamente integrato l'intera catena formativa, dalla familiarizzazione iniziale con i sistemi di bordo fino alla simulazione di scenari di emergenza multi-operatore. L'architettura si basa su repliche digitali certificate degli aeromobili, dove ogni componente, pannello e interfaccia è modellato con fedeltà geometrica e funzionale, permettendo ai tecnici di manutenzione di esercitarsi su procedure rare o pericolose, come interventi su sistemi idraulici pressurizzati o rimozione di pannelli in quota, senza alcun rischio per persone o equipaggiamenti. Particolarmente innovativa è l'integrazione di scenari dinamici guidati da intelligenza artificiale, capaci di introdurre guasti randomizzati, condizioni ambientali variabili e interazioni con altri operatori virtuali, replicando la complessità cognitiva e operativa delle situazioni reali. Il sistema è in grado di tracciare le performance individuali attraverso metriche quantitative, tempi di esecuzione, sequenze corrette, ed errori commessi, fornendo feedback immediato e personalizzato che accelera la curva di apprendimento. Dal punto di vista economico, Airbus ha documentato riduzioni fino al 40% nei tempi formativi e abbattimenti significativi dei costi legati all'immobilizzazione di aeromobili per scopi didattici. Tuttavia, la complessità tecnica del sistema richiede partnership consolidate con fornitori tecnologici specializzati e investimenti iniziali considerevoli, rendendo questo modello più accessibile a grandi organizzazioni con volumi formativi elevati, piuttosto che a operatori di nicchia o indipendenti.
Una conferma di questa dinamica è fornita dalla Boeing e dal suo Maintenance Synthetic Trainer proprietario, che concorre in modo del tutto simile in materia di apprendimento in ambiente controllato dove sperimentare e provare secondo il principio di "imparare facendo". (End-to-End Training | Airbus, 2024; services.boeing.com/training-solutions/maintenance-training/maintenance-synthetic-trainer, s.d.).

Allo stesso modo, nel settore medicale, SurgicalAR e Simtryx coprono due momenti complementari dello stesso ecosistema: la pianificazione/azione in sala e la formazione/valutazione. Il primo porta in realtà aumentata i modelli 3D ricostruiti da TAC/RM, allineandoli all'anatomia del paziente per la navigazione intra-operatoria, consentendo al chirurgo di mantenere lo sguardo sul campo, consultare strutture sovrapposte e annotazioni, facilitando i flussi di pianificazione preoperatoria e didattica (AR Surgical Planning for every dimension in any specialty, s.d.). Il secondo, invece, si concentra sulla simulazione clinica in XR, offrendo scenari interattivi per il nursing e il lavoro di squadra, sfruttando pazienti virtuali guidati da AI e metriche in tempo reale per esercitare decision-making e comunicazione in dinamiche multiutente (Simtryx | AI & Spatial Simulations for Healthcare, s.d.). In sintesi, il raggruppamento evidenzia come il coordinamento tra scenari realistici, misurazioni e monitoraggio chiudono il ciclo tra apprendimento teorico e pratico. L'integrazione di motori grafici, dati di esercizio e AI abilitano un apprendimento continuo (Sim-to-Real) che delinea una traiettoria condivisa caratterizzata dalla validazione virtuale come modalità di supporto per la progettazione, per l'apprendimento e per il trasferimento della conoscenza.

Per quanto concerne i casi in materia di applicazione, l'insieme include progetti orientati alla messa a terra delle potenzialità e delle dinamiche di visualizzazione e interazione con i sistemi immersivi.
In questo cluster, il processo di vaglio si è concentrato sull'identificazione di soluzioni che trasformassero la tecnologia XR da dimostrazione concettuale a strumento operativo il più concreto possibile. In questo senso, ha rivestito una grande importanza la semplicità concettuale dei prodotti software indagati, privilegiando soluzioni proponenti modelli concettuali intuitivi che ne permettessero un'adozione facile anche da parte di utenti non tecnici. La capacità di generare valore ha rappresentato un altro parametro di attenzione, rivelatosi tuttavia complesso nella misurazione per via dell'intangibilità delle proprietà di efficienza operativa e della qualità degli output prodotti; semplificando, è stata operata l'esclusione di soluzioni puramente dimostrative prive di riscontro pratico. Un peso significativo ha avuto la versatilità applicativa, indirizzando la scelta verso piattaforme utilizzabili o potenzialmente utilizzabili in contesti eterogenei, dal design industriale alla divulgazione culturale, anziché soluzioni verticali iper-specializzate. Infine, particolare attenzione è stata riservata all'aspetto collaborativo, includendo strumenti in proiezione capaci di facilitare la co-creazione sincrona e asincrona, elemento cruciale per l'integrazione delle tecnologie XR in workflow di team distribuiti e multidisciplinari.

Qui la XR si configura come interfaccia capace di connettere contesti, gesti e informazioni, traducendo contenuti complessi in esperienze accessibili, orientate al coinvolgimento dell'utente. Nel dominio dell'intrattenimento, soluzioni come NBA Tabletop sperimentano la fruizione remota e aumentata degli eventi, mostrando i campi e le azioni ricostruite in scala, sovrapponendo statistiche e traiettorie in tempo reale che ne determinano maggior grado di comprensione e partecipazione (Apple Vision Pro, 2025).
Sul versante arte e cultura, Da Vinci Eye rende portabile la tecnica della sovraimpressione in AR per il ricalco e lo studio, le opere diventano guide trasparenti all'esecuzione, facilitando l'apprendimento dei rapporti proporzionali e dei gesti (The Da Vinci Eye App, s.d.).
La galleria Frameless invece offre un'altra prospettiva, proponendo ambienti immersivi a scala architettonica in cui le opere si estendono oltre il quadro, trasformandosi in paesaggi percorribili (FRAMELESS | The Ultimate Immersive Art Experience, s.d.).
Dall'unione delle possibilità precedentemente descritte, una terza direzione si concretizza nell'ambito progettuale e del disegno, dove sistemi come Gravity Sketch offrono la possibilità di modellare tridimensionalmente in scala 1:1 tramite collaborazione sincronizzata, accorciando l'iter tra schizzo e prototipo, favorendo la comunicazione tra design e ingegneria (Home - Gravity Sketch, s.d.).

Su una linea simile, si colloca anche ShapesXR quale soluzione distintiva nell'ecosistema degli strumenti di prototipazione immersiva, posizionandosi strategicamente nelle fasi iniziali del processo progettuale dove velocità di iterazione e comunicazione risultano più critiche della precisione geometrica assoluta. Fondata negli Stati Uniti e lanciata commercialmente nel 2021, la piattaforma si focalizza specificamente su design di interfacce utente, esperienze di spatial computing e concettualizzazione architettonica tridimensionale, differenziandosi da tool di modellazione organica per concentrarsi su workflow di UX/UI design trasportati in ambiente immersivo (ShapesXR — Bring ideas to life in 3D and XR, s.d.). Il paradigma operativo si basa su primitive geometriche e componenti modulari preassemblati: panel UI, elementi architettonici parametrici e placeholder 3D che permettono ai progettisti di assemblare rapidamente scene complesse e flussi interattivi senza necessità di competenze di modellazione poligonale avanzata.
Questa semplificazione risulta efficace per studiare customer journey in tre dimensioni prima di affrontare lo sviluppo ingegneristico dettagliato.

Le pipeline di export verso Unity e Unreal Engine permettono di trasferire le scene concettuali create in ambienti dedicati dove possono essere rifinite, ottimizzate e integrate con logiche interattive complesse e asset finali.
La dipendenza da hardware VR standalone (Meta Quest o Pico) per il suo utilizzo costituisce una barriera all'adozione non trascurabile, specialmente in contesti equipaggiati principalmente con workstation desktop tradizionali. Ciononostante, il posizionamento di ShapesXR risponde a un'esigenza reale, ovvero di comprimere il time-to-feedback nelle fasi iniziali dove decisioni hanno impatto massimo sui costi di sviluppo successivi. In questo senso, la piattaforma non compete con strumenti di modellazione parametrica o CAD industriale, ma li implementa occupando uno spazio precedentemente coperto inadeguatamente da schizzi 2D e mockup su carta che escludono la dimensione spaziale e percettiva caratteristica intrinseca dei progetti immersivi.

In conclusione, altre soluzioni come Canvastique 3D, dedicato alla realizzazione di rendering virtuali in tempo reale a partire da texture catturate nel mondo reale, e Flow Immersive che traduce dati e procedure in composizioni visive immersive, consentono di minimizzare la distanza tra progettazione fisica e sviluppo dei prototipi in virtuale (Canvastique3D, s.d.; Flow — Turn Data Into an Experience Over Your Table, s.d.).
In sintesi, dal cluster applicativo emergono le potenzialità relative all'opportunità di rendere spaziali e significative le informazioni, di collaborare in tempo reale e di tradurre contenuti in pratiche esperienziali, aspetti che consentono all' XR di poter intervenire nel progetto sia come modalità espressiva, sia come modalità di lavoro vero e proprio.

In ultima istanza, il cluster tecnologico evidenzia piattaforme e dispositivi che hanno ridefinito la base infrastrutturale della realtà estesa. La scelta dei dispositivi ha seguito una logica di rappresentatività dei diversi segmenti di mercato e livelli di maturità tecnologica. Criterio primario è stata l'identificazione di soluzioni che rappresentassero punti di discontinuità tecnologica, innovazioni hardware che ridefinissero gli standard prestazionali o di usabilità delle categorie. Si è inoltre privilegiato un approccio comparativo, includendo dispositivi posizionati su diverse fasce di prezzo e complessità per valutare il bilanciamento tra performance, accessibilità economica e facilità d'uso.
Buona attenzione è stata riservata all'ecosistema di sviluppo e supporto, cercando di favorire piattaforme con SDK maturi, community attive e disponibilità di contenuti applicativi, fattori importanti per l'adozione su larga scala. Infine, per i sistemi di interazione avanzata, si è considerato il livello di invasività e la potenzialità di creare impatti positivi, privilegiando soluzioni non invasive e compatibili con utilizzi intuitivi, aspetti cruciali per rendere utilizzabili questi sistemi in applicazioni professionali.

Il Varjo XR-3 rappresenta l'apice attuale della qualità visiva in ambito XR professionale, rispondendo a esigenze applicative dove la fedeltà percettiva costituisce requisito non negoziabile. Lanciato nel 2021 dalla finlandese Varjo Technologies, il dispositivo si distingue per un'architettura ottica ibrida che combina display micro-OLED ad altissima risoluzione nella regione foveale (retina centrale) con pannelli LCD periferici, replicando la distribuzione non uniforme dell'acuità visiva umana. Questo espediente consente di raggiunge una risoluzione equivalente a 60 pixel per grado nell'area centrale, superando ampiamente la soglia di riconoscibilità dei singoli pixel e permettendo la lettura di testi piccoli e l'ispezione di dettagli su piccola scala senza artefatti visibili. Sul fronte della realtà mista, il sistema di video pass-through utilizza telecamere stereoscopiche da 12 megapixel con correzione della distorsione in tempo reale, producendo una sovrapposizione del mondo virtuale su quello reale con latenza inferiore ai 15 millisecondi e allineamento spaziale sub-millimetrico. Queste caratteristiche rendono il Varjo XR-3 particolarmente adatto per applicazioni di design review automotive, dove la valutazione di superfici

stilistiche, giunzioni e riflessi richiede precisione visiva paragonabile alla visione naturale, e per simulazioni di training piloti, dove la leggibilità di strumentazione complessa risulta critica. Tuttavia, queste prestazioni comportano compromessi significativi: il peso totale di 980 grammi e l'elevato costo ne limitano l'adozione a contesti enterprise con budget limitati, e la dipendenza da workstation grafiche di fascia alta (GPU Nvidia RTX serie professionale) ne aumenta ulteriormente il costo di adozione. Inoltre, l'architettura tethered (connessione via cavo a PC) riduce la libertà di movimento rispetto a soluzioni standalone. Nonostante questi limiti, questo modello ha trovato riscontro presso case automobilistiche di fascia alta come Volvo e Porsche, produttori aerospaziali, ad esempio in Lockheed Martin, e studi di architettura, contesti dove il costo della tecnologia risulta trascurabile rispetto ai benefici derivanti dalla capacità di validare virtualmente decisioni progettuali che, se errate, genererebbero costi di modifica ordini di grandezza superiori (Kappler et al., 2022; Varjo XR-3 - The First True Mixed Reality Headset | Varjo, s.d.).
Il dispositivo rappresenta quindi non tanto una soluzione di massa, quanto un benchmark tecnologico che definisce lo stato dell'arte e anticipa caratteristiche che, con il progredire della miniaturizzazione e riduzione dei costi, potrebbero diffondersi anche in segmenti più accessibili.

Non si può evitare un accenno anche all'Apple Vision Pro che, nonostante presenti limiti maggiori rispetto all'attesa che ha creato, costituisce comunque uno spartiacque sia dal punto di vista del design e vestibilità del prodotto, sia nella concezione di spatial computing, favorita dall'interessante integrazione tra pass-through, realtà mista e interazione grazie al tracciamento delle mani e oculare (Apple Vision Pro, s.d.).
Nel segmento standalone, invece il Meta Quest 3 e il Pico 4 rappresentano forse gli esiti più riusciti, manifestando un buon equilibrio fra costo, qualità visuale e facilità di adozione, che ha consentito al panorama XR di risultare più fruibile (Meta Quest 3, s.d.; Vivi il gioco con PICO 4 AUSTERE VR All-in-One | PICO Italy, s.d.).
In questa categorizzazione, tuttavia, non mancano esempi di occhiali specializzati nelle componenti aumentate e miste della realtà, con particolare riferimento ai Magic Leap 2 e Vuzix Blade 2 quali strumenti probabilmente più pronti all'utilizzo operativo in contesti chirurgici, nel primo caso, e costruttivi in officina per il secondo (Magic Leap 2 | Augmented Reality | Optics Technology, s.d.; Vuzix Blade 2TM Smart Glasses, s.d.).
Oltre ai sistemi per la visualizzazione, rientrano nella categoria anche i sistemi per l'interazione, cioè quell'insieme di dispositivi e tecniche che trasformano gesto, postura, sguardo e stato fisiologico in comandi e feedback, rendendo l'esperienza XR operativa e non solo percettiva. In questa direzione emerge la necessità di "toccare il virtuale", nel quale i progetti come FlexiVol e InflatableBots sperimentano superfici e attuatori morbidi, deformabili e pneumatici che restituiscono resistenza, forma e contatto, riducendo il divario tra ologrammi e azioni simulate e percezione corporea (Bouzbib et al., 2025; Gomi et al., 2024). In parallelo si affacciano interfacce neurali non invasive che interpretano segnali mio-/neuro-elettrici per controllori a mani libere, in questo caso gli apparecchi NaQi Logic, Mudra Link e WiseEar risultano particolarmente rappresentativi in quanto esplorano le potenzialità degli input "sottili" (micromovimenti, attività muscolare, segnali auricolari), aprendo alla diffusione di comandi discreti e contestuali (Mudra Band, s.d.; NaQi Platform, s.d.; Wisear - Let Your Mind Be In Control, s.d.). Nel complesso, è possibile dedurre e ipotizzare una trasformazione della realtà estesa da schermo spaziale a ecosistema sensibile, dove l'intenzione e il tocco diventino linguaggi progettuali, migliorando precisione, accessibilità e continuità d'uso di questi sistemi.
Queste soluzioni, quindi, testimoniano l'avanzamento della tendenza allo human–computer integration, in cui il corpo umano diventa parte attiva del sistema tecnologico, delineando un futuro in cui la realtà estesa non sarà più un'esperienza esterna al corpo, ma una sua estensione sempre più naturale, trasparente e adattiva.

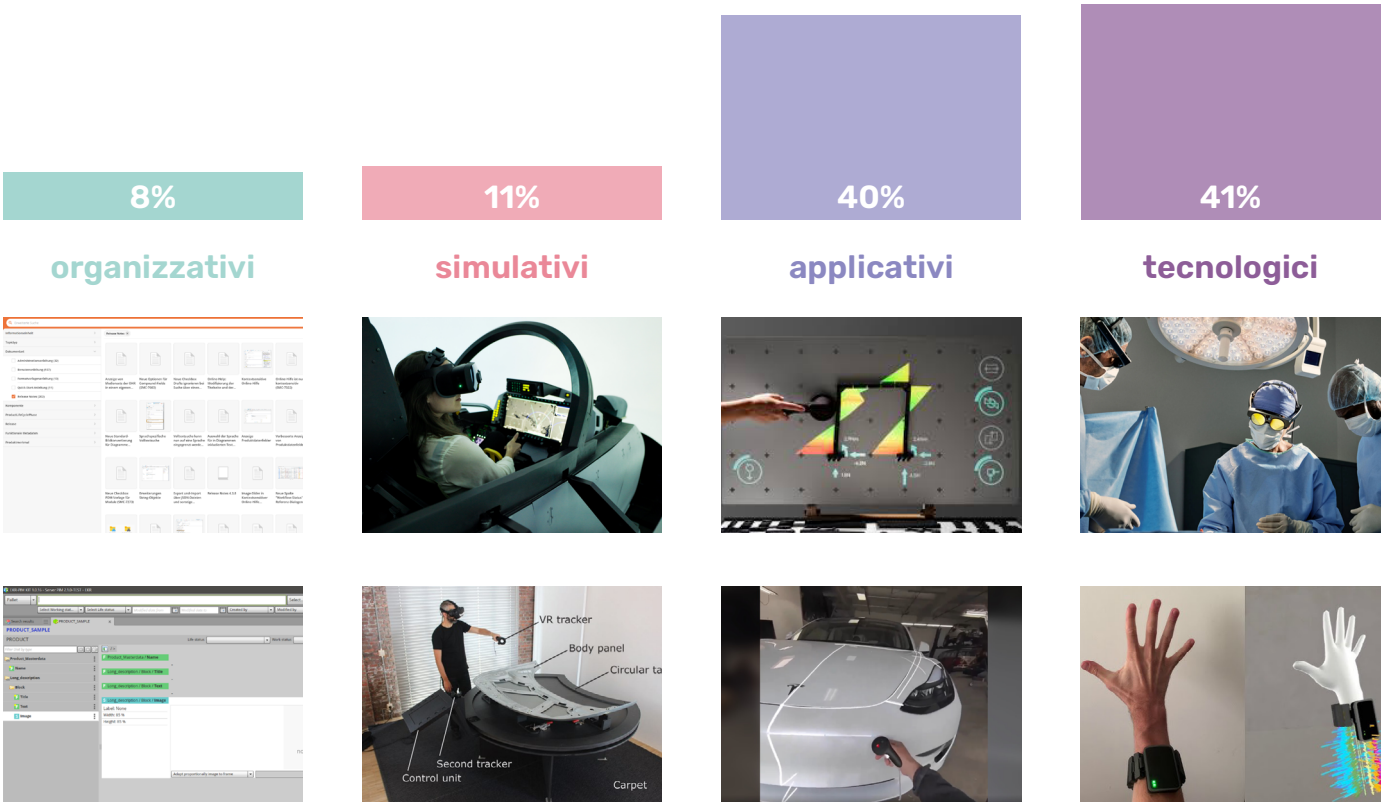


Fig. 7 Sintesi della classificazione dei casi di studio

L'analisi dei 150 casi di studio sintetizzati dal bacino derivato dal processo di raccolta triennale restituisce un quadro rappresentativo dell'evoluzione recente delle tecnologie immersive e interattive, aiutando a delineare alcuni trend significativi in ambito tipologico e di sviluppo. La maggior parte dei progetti appartiene alla categoria tecnologica (41%), seguita da quella applicativa (40%), mentre gli esempi a carattere simulativo e organizzativo risultano minoritari (rispettivamente 11% e 8%).
Tale distribuzione suggerisce che il focus attuale della ricerca e del mercato sia orientato prevalentemente verso lo sviluppo di dispositivi e piattaforme abilitanti, con una contestuale e progressiva apertura verso la realizzazione di applicazioni esperienziali e formative. Dal punto di vista cronologico, è interessante registrare come la distribuzione temporale dei progetti mostri un picco nel 2023, anno che concentra oltre il 30% dei casi analizzati. Questo dato riflette l'accelerazione post-pandemica nella digitalizzazione dei processi produttivi e formativi, oltre alla crescente accessibilità delle tecnologie XR e dei sistemi di intelligenza artificiale.

Estendendo la riflessione, emerge come il successo di un'esperienza immersiva non dipenda esclusivamente dalla qualità dell'hardware o dal realismo visivo, ma dalla capacità di costruire un'interazione coerente, accessibile e significativa. In questa prospettiva, il concetto di affordance assume un ruolo cruciale, poiché la comprensione intuitiva di ciò che un sistema permette di fare diventa la discriminante tra un'esperienza virtuale e un'esperienza immersiva realmente efficace.
Le interfacce devono quindi saper comunicare attraverso segnali percettivi chiari, traducendo le complessità tecnologiche in gesti familiari, riconoscibili e naturali.
La transizione delle tecnologie immersive da strumenti di rappresentazione ad ambienti di esperienza diffusa diventa terreno fertile per lo sviluppo di dibattiti e sperimentazioni nel campo dell'interaction design, quale disciplina che vede arricchirsi di un carattere, in questo caso, trasformativo.

2.2 Immedesimazione e suggerimenti virtuali

Quanto concluso, precedentemente, porta a riflettere su quali leve i designer per gli ambienti immersivi possono attivare e dove possano intervenire al fine di proporre esperienze pertinenti allo scopo e funzionali a chiarire il ruolo e il compito dell'utente.
Negli spazi virtuali, infatti, la percezione dello spazio e la consapevolezza del corpo assumono una configurazione inedita. In questi termini, l'immersività si fonda sulla possibilità di "incorporare" lo spazio simulato all'interno del proprio schema corporeo, originando una forma di presenza che oltrepassa la distinzione tra reale e digitale (Hayles, 1999). Tale condizione di "embodiment" è ciò che permette alla realtà virtuale e alle altre forme di esperienza immersiva di generare la sensazione di essere fisicamente presenti in un ambiente simulato, anche in assenza di contatto reale (Gallese & Guerra, 2012; Grodal, 2009).
Le ricerche confermano che la cognizione spaziale è intrinsecamente incarnata: l'individuo percepisce e interpreta l'ambiente in base alle proprie possibilità d'azione (Tversky, 2001) e nella realtà virtuale, questo principio sembra amplificarsi poiché la corteccia motoria risponde alle affordance digitali come se fossero fisiche (Laarni et al., 2015).
In questa prospettiva, la tecnologia diventa estensione sensoriale del corpo e abilita nuove forme di collaborazione tra umano e non-umano (Cortese, 2024; Vignali et al., 2024).
La percezione spaziale, nel virtuale si configura come esito strettamente connesso alla cognizione situata siccome l'utente, non sperimenta l'ambiente solo come osservatore, bensì come agente immerso in una rete di azioni e reazioni (Kilteni et al., 2012).
In questo contesto, entra in gioco il concetto di flow, che si verifica quando la simulazione, offrendo un'adeguata gamma di possibilità motorie ed elevato coinvolgimento, produce un senso di continuità e presenza spaziale (Quiroga & Hernández, 2021).

Da questo momento in poi, la gamma di possibilità motorie verrà identificata secondo le seguenti dimensioni: quella delle affordance, rappresentante l'insieme delle azioni eseguibili; quella dei significanti, riferendosi ai segni ed elementi che le rendono percepibili; passando dai nudge, intendendo le "spinte gentili" che orientano le scelte senza imporle; infine il piano dei trigger, considerati come inneschi temporali e contestuali che attivano le azioni. Nella fattispecie, le affordance e i significanti virtuali possono essere intesi come ponte percettivo tra l'utente e l'ambiente digitale (Bhargava et al., 2020).
In termini psicologici e progettuali, è possibile assimilare l'affordance percepita come risultato dell'intersezione tra contesto, proprietà dell'oggetto e sensibilità dell'utente. Pertanto nel mondo virtuale, dove le proprietà fisiche sono sostituite da rappresentazioni, la comprensione intuitiva di "ciò che si può fare" diventa cruciale per poter mantenere nell'utente lo stato di flusso (Grabarczyk & Pokropski, 2016; Csíkszentmihályi, 1990). Nel contesto delineato le affordance vanno intese come entità relazionali, non essendo caratteristiche solo ed esclusivamente proprie degli oggetti, ma dinamiche poiché emergono dall'attività percettiva e motoria del soggetto che ne fa utilizzo (Regia-Corte et al., 2013). In un certo senso è come se fossero al tempo stesso sia oggettive che soggettive, in quanto dipendono sia dalle proprietà dell'ambiente sia dalle capacità d'azione dell'individuo (Osiurak et al., 2017).

Ritornando nell'inquadramento dell'ambito immersivo, un buon design dei significanti consente all'utente di intuire immediatamente le possibilità offerte dallo spazio virtuale, ne deriva che l'efficacia dell'esperienza non risieda nella complessità visiva, ma, al contrario dalla chiarezza percettiva dei segnali che rendono leggibili le affordance, poiché il corpo, pur muovendosi in un ambiente simulato, agisce in base a regole riconosciute come plausibili (Shin, 2017). Al fine di perseguire la chiarezza auspicata, durante lo sviluppo di esperienze in XR, si rende necessario tenere in considerazione e progettare le interazioni

su due piani, la prima riguarda le possibilità d'azione, mentre la seconda, la capacità di evocare emozioni congruenti con il contesto simulato. Dalla coerenza tra queste dimensioni si determina la profondità dell'immersione (Steffen et al., 2019).
Nei mondi virtuali ogni gesto, dal sollevare un oggetto al premere un pulsante fluttuante, deve trovare una corrispondenza percettiva e semantica; è qui che la progettazione dell'interfaccia assume un valore strategico, poiché consiste nel costruire sistemi di significato capaci di guidare l'azione. In questo senso, la VR non è soltanto una tecnologia di visualizzazione, ma una grammatica dell'interazione che trasduce concetti astratti in esperienze corporee (Zannoni, 2024).
Nonostante i continui progressi, gli ambienti virtuali celano nella mancanza di fisicità, criticità ancora considerevoli, visto che nella vita reale, fatta di pressioni, forze di taglio e vibrazioni, è ciò che conferisce all'esperienza realismo e fiducia. In generale, l'assenza di feedback fisici può comportare la riduzione dell'agency dell'utente e comprometterne la precisione dei gesti. Per questo motivo la ricerca si sta fortemente orientando verso l'integrazione di dispositivi aptici e indossabili, in grado di simulare stimoli tattili e migliorare la consapevolezza corporea nello spazio immersivo (Gibbs et al., 2022). Un tentativo pratico che ricalca questa esigenza è rappresentato dal contatto "pelle a pelle", su cui è basato il wrist button dei visori Meta Quest, il quale contribuisce a ristabilire un legame percettivo diretto tra corpo e interfaccia (Fang & Harrison, 2021); nonostante questo esempio sia significativo, non risulta sufficiente ad esaurire il tema progettuale, sottolineando come in questa direzione sia ancora necessaria l'evoluzione di sensori indossabili più sofisticati al fine di ridurre ulteriormente il divario tra reale e virtuale (Doolani et al., 2020). Tuttavia, la convergenza tra visione e tatto rappresenta una ricca frontiera di ricerca, specialmente per nuovi paradigmi di interfaccia multisensoriale, poiché nelle piattaforme XR, l'accumularsi di informazioni visuali comporta l'aumento della complessità cognitiva nell'esecuzione dei compiti, ciò richiede una progettazione dei feedback multimodali attenta e dedicata (Grgic et al., 2016). In questo senso, l'aptica si ritaglia il ruolo di linguaggio emergente che integra, al panorama visivo, segnali tattili capaci di evocare il reale (Paterson, 2020).

Alla luce di quanto visto, se l'affordance degli oggetti virtuali si comporta come quella reale è perché viene elaborata attraverso il canale visivo secondo le esperienze e le modalità d'uso pregresse dell'utente. I significanti virtuali sono, in un certo senso, flessibili e plasmabili dalle aspettative; più un'esperienza riproduce schemi di azione noti, maggiore è la sua credibilità (Blom, 2013). Tuttavia, la dipendenza dall'esperienza anteriore può rappresentare un limite nel dominio della rappresentazione virtuale di sistemi complessi, in cui più oggetti e azioni si combinano all'interno di processi che potrebbero essere anche inediti all'utente, in questo scenario, progettare significanti univoci e interazioni universali risulta estremamente difficile (Masson-Carro et al., 2020).
La criticità, inoltre, aumenta quando l'interazione coinvolge sequenze articolate di gesti o ambienti multiutente, richiedendo al progettista di trasdurre la complessità in segnali comprensibili ed evitare ambiguità percettive (Osiurak & Badets, 2016). Nei sistemi XR contemporanei, la dimensione dell'affordance diventa una questione di progettazione cognitiva, non si tratta solo di rendere l'interazione possibile, ma di renderla significativa, costruendo ambienti che facilitino l'intendimento intuitivo di ciò che è permesso e atteso, senza sovraccaricare l'utente (Grgic et al., 2016). A questo punto, si aprono altri temi legati ai confini spaziali e temporali: dove inizia e finisce un gesto e come circoscriverne lo spazio d'azione quando le regole del mondo fisico non si applicano più? (Brereton et al., 2003). In questo dualismo tra ambiguità e perseguimento della continuità, il design delle esperienze immersive deve interessarsi alla costruzione di linguaggi capaci di restituire senso all'interazione e trasformare il digitale in un luogo di presenza e significato.

2.3 Coinvolgimenti multisensoriali

In continuità con quanto sostenuto precedentemente, la buona fruizione delle dinamiche esperienziali negli scenari immersivi passa attraverso le sensazioni dell'individuo, in questo senso, la realtà estesa offre la possibilità di fungere da territorio di convergenza sensoriale in cui la percezione non sia soltanto visiva, ma si espanda coinvolgendo simultaneamente anche tatto, udito, olfatto e gusto. La sfida progettuale si configura nel ricostruire artificialmente il senso di presenza attraverso la combinazione di stimoli che inducano l'impressione di coerenza percettiva. Come osservano Witmer e Singer (1998), la presenza scaturisce dal bilanciamento tra immersione tecnologica e realismo percettivo. Il concetto è successivamente ampliato dalla ricerca scientifica, che riconosce alla multisensorialità la capacità di coniugare l'esperienza virtuale a quella personale ed emotiva dell'utente(Bordegoni et al., 2023; Rakkolainen et al., 2021, Kors et al., 2016).

Le sperimentazioni nel campo appena delineato, suggeriscono che ogni canale sensoriale contribuisce a definire una specifica dimensione dell'esperienza. L'udito, ad esempio, supporta la costruzione dello spazio attraverso suoni direzionali o spaziali, capaci di veicolare profondità e distanza, in particolare studi specifici dimostrano come variazioni minime nel timbro o nell'intensità acustica influenzino la percezione del movimento e la conseguente risposta emotiva (Broderick et al., 2018; Panteliodi & Hudson, 2024).
L'olfatto e il gusto, invece, sono ambiti di sperimentazione emergenti, in cui sistemi come FeelReal o Omara, che rilasciando microdosi di composti aromatici sincronizzati con la scena virtuale, mirano a potenziare l'immedesimazione e la memoria sensoriale (Niedenthal et al., 2023; Ovr technology | Enhance Your Gaming Experience Now, s.d.; Qvarta | FeelReal Sensory Mask, s.d.).

Nonostante gli sforzi distribuiti su tutte le declinazioni della sensorialità, oltre alla vista, incontrastata nel campo dell'XR, l'aspetto tattile è attualmente quello che richiama maggiore interesse. Toccare significa confermare la presenza dell'oggetto, pertanto l'uso di tale capacità agisce come soglia di verifica del reale, da cui ne consegue che negli ambienti virtuali, venendo meno questa componente, l'immersività dell'intera scena rischia di deteriorarsi. La necessaria sospensione del contatto fisico ha reso evidente l'urgenza di trovare configurazioni alternative che restituissero all'utente altre forme di tattilità mediata. Da questa esigenza si è sviluppata un'importante area di ricerca dedicata alla progettazione di interfacce capaci di simulare sensazioni tattili, che riducessero la discrepanza tra il mondo reale atteso e quello immateriale effettivamente esperito. Le soluzioni basate sull'aptica, oltre al tentativo di compensare l'assenza del feedback materiale, spesso vengono utilizzate per migliorare la fiducia percettiva dell'utente e determinare maggiore precisione dei gesti. L'integrazione di diversi canali sensoriali, visivo, sonoro, tattile, definisce quindi un paradigma di interazione multisensoriale, in cui l'utente diventa parte attiva di un ecosistema percettivo (MacLean et al., 2017).

Il campo dell'aptica si articola in numerose declinazioni che combinano ricerca neuroscientifica, ingegneria meccanica ed elettronica. Trattandosi di una disciplina vasta, può essere utile suddividerla in quattro sotto-aree principali: human haptics, machine haptics, computer haptics e multimedia haptics (El Saddik, 2007).
La prima studia la fisiologia naturale del tatto e i processi cognitivi associati; la seconda riguarda la costruzione di dispositivi meccanici che riproducono o amplificano il tatto; la terza si occupa della simulazione software dei segnali tattili; la quarta, infine, esplora le connessioni tra tatto e media digitali. Sebbene la ricerca abbia coinvolto tutti e quattro gli ambiti, quello multimediale e quello strumentale, rivelatisi particolarmente interessanti, sono stati maggiormente esplorati.

Allo stesso modo, in termini applicativi, possono essere distinte tre modalità di restituzione: pseudo-aptica, aptica passiva e aptica ibrida.

La pseudo-aptica si basa su illusioni tattili generate da interazioni cross-modali, in cui il cervello integra segnali visivi o acustici per "percepire" sensazioni tattili inesistenti (Lécuyer, 2009). Altri studi, mostrano come variazioni minime nella velocità di cursori o nella sincronia audio-visiva possono produrre la sensazione di resistenza o di consistenza materiale (Collins & Kapralos, 2019; Degraen et al., 2020).
L'aptica passiva prevede l'impiego di dispositivi che generano stimoli tattili mediante attuatori meccanici, termoelettrici o vibrotattili. Tra le tecnologie più diffuse rientrano i sistemi force feedback, che restituiscono resistenza o opposizione ai movimenti (Park et al., 2022), e le superfici dinamiche, come le celle di Peltier, in grado di simulare variazioni di temperatura (Gabardi et al., 2018). Altri dispositivi sfruttano microattuatori elettro-osmotici che producono pressioni localizzate generando bolle di fluido sotto una membrana flessibile (Shen et al., 2023).
L'aptica ibrida, al contrario, coadiuva al segnale artificiale la presenza di oggetti fisici o tangibili all'interno della scena virtuale, restituendo feedback diffusi e coerenti in tutta la cellula di simulazione. Alcuni casi rappresentativi sono i simulatori che integrano parti reali, come leve, pulsanti o utensili, sincronizzati con l'ambiente digitale (Campenhout et al., 2020; Chen et al., 2024; Dyck et al., 2020). Questa soluzione, pur meno flessibile, garantisce un realismo immediato e può contribuire a ridurre la complessità tecnica dell'ambiente.

Analizzando il panorama attuale del mercato connesso all'aptica, emerge la tendenza ad un'espansione costante, trainata dalla domanda di esperienze immersive più realistiche nei settori del gaming, dell'industria, della robotica e dell'intrattenimento.
Tra i dispositivi più significativi TeslaSuit, consiste in una tuta a corpo intero che combina motion capture e force feedback, consentendo di percepire pressioni e resistenze distribuite sul corpo (Teslasuit | Meet Our Haptic VR Suit and Glove with Force Feedback, 2022). Altri dispositivi analoghi sono OWO Skin o HaptiX Gloves, i quali pur condividendo l'obiettivo finale sono caratterizzati da approcci alla problematica differenti (HaptX, s.d.; Owo, s.d.).
Anche il campo medico e terapeutico rappresentano campi di sviluppo particolarmente fertili, alcuni esemplari di guanti tattili vengono utilizzati nella riabilitazione motoria e nella chirurgia robotica oppure come strumenti di comunicazione per chi dispone di difficoltà uditive (Novich & Eagleman, 2015). In questi contesti, il feedback aptico si trasforma in strumento di apprendimento corporeo e di inclusione.
Un altro ambito è rappresentato dalla ricerca, dove la direzione intrapresa dagli sviluppi odierni mira alla miniaturizzazione e all'alleggerimento dei dispositivi senza perderne risoluzione, anzi incrementandola, quando possibile. Tra i progetti più promettenti, si menzionano: Fluid Reality, il quale utilizza micro-pompe elettro-osmotiche per creare pattern tattili complessi (Shen et al., 2023), e il sistema DynaButtons che introduce pulsanti morbidi e analogici con risposta di forza variabile (Rae-Grant et al., 2024).
Entrambe le soluzioni mirano a superare i limiti di latenza e rigidità tipici degli attuatori meccanici tradizionali. Interessante è anche il sistema ViPins, che combina array di micro-pin per la resa di texture tridimensionali fini, con l'obiettivo di migliorare la risoluzione e la percezione di materiali complessi (Wu et al., 2025). Allo stesso tempo, l'evoluzione dei materiali morbidi e conduttivi apre la strada ai soft actuators, dispositivi flessibili che imitano le proprietà elastiche dei tessuti biologici (Flavin et al., 2024).

Sul piano applicativo, il concetto di aptica comunicativa, propone l'uso del tatto come linguaggio autonomo, in cui mediante pattern vibrotattili codificati, l'utente può ricevere messaggi, istruzioni o segnali senza ricorrere al linguaggio verbale (Dall'Osso, 2021).

Si delinea, in questo modo, uno scenario nel quale diventa possibile insegnare un linguaggio tattile basato su sequenze di stimolazioni (Brown et al., 2005; J. Wang et al., 2016).

In questo contesto, l'utilizzo dell'AI si sta facendo sempre più massivo, contribuendo sensibilmente alla progettazione dei sistemi e, soprattutto, dei segnali (Seifi et al., 2015). In proiezione, però potrebbe non essere utopico immaginare sequenze vibratorie responsive alle gestualità e magari personalizzate al variare dell'utente, in questo senso, l'aptica non mira più a imitare il reale, ma ad espandere le capacità sensoriali dell'essere umano (Eagleman & Perrotta, 2023). Questa visione ben si innesta in una prospettiva in cui il futuro dell'interazione uomo-macchina risiede nell'integrazione sensoriale e dove il confine tra input e output tenda a dissolversi, dove l'utente non riceve un feedback, ma ne diventa parte. Questo approccio di integrazione uomo-computer costituisce una possibilità simbiotica in cui corpo e macchina cooperano nella costruzione del senso.

Intervallo - Prima Sezione
Distaccamento e sedimentazione

Il percorso di contestualizzazione e perimetrazione riportato attraversa differenti dimensioni della realtà estesa, dall'evoluzione storica, utile a comprendere le possibili future dinamiche di adozione, a quella percettiva, necessaria a stabilire le fondamenta su cui costruire la ricerca, arrivando agli esiti più avanzati rappresentati delle forme di interazione multisensoriale, che rivelano come le tecnologie immersive rappresentino oggi molto più che un'innovazione tecnica, costituendo un territorio di sperimentazione progettuale nel modo in cui interagiamo con i sistemi digitali.

La continua ottimizzazione degli hardware, che ha condotto fino agli attuali visori standalone e interfacce neurali emergenti, testimonia un processo di democratizzazione progressiva all'accesso e una contemporanea e profonda trasformazione del rapporto tra corpo, spazio aumentato e informazione. In particolare, il contesto industriale, ambito privilegiato di questa indagine, si configura come laboratorio in cui la dematerializzazione dei processi non sostituisce l'esperienza umana, ma la amplifica, supportando le pratiche di progettazione e formazione. La transizione dal paradigma 4.0 al più recente 5.0 sottolinea l'urgenza di perseguire un equilibrio tra efficienza produttiva, benessere umano e sostenibilità ambientale; in questo scenario, le tecnologie XR si collocano come possibili agenti trasformativi capaci di abilitare flussi di lavoro più consapevoli e ottimizzati, a condizione che il loro impiego sia orientato da metodologie design-driven e da una sensibilità progettuale attenta alla dimensione esperienziale e percettiva dell'interazione (Muscolo & Malakuczi, 2023).

L'analisi dei casi di studio e delle tecnologie abilitanti ha messo in luce come il valore della realtà estesa non risieda esclusivamente nella qualità grafica o nella potenza computazionale, ma nella capacità di costruire esperienze significative, accessibili e operative. I Digital Mockup, i Digital Twin, le simulazioni numeriche e, più in generale, gli ambienti collaborativi costituiscono un ecosistema integrato in cui dati, modelli e intelligenza artificiale concorrono a creare una continuità tra le fasi progettuali e quelle operative. Tuttavia, l'efficacia di tali strumenti dipende dalla buona pianificazione delle affordance virtuali e dalla coerenza percettiva insita agli ambienti simulati. La sensazione di presenza quale elemento fondante dell'immersività, infatti, emerge dall'integrazione tra stimoli visivi, sonori e tattili capaci di evocare schemi di azione riconoscibili e familiari. Le sperimentazioni condotte nell'ambito delle interfacce multisensoriali e dei feedback aptici dimostrano come il tatto possa fungere da linguaggio comunicativo autonomo, capace di trasmettere informazioni procedurali e operative senza sovraccaricare il canale visivo, aprendo prospettive interessanti per il miglioramento dell'accessibilità e la riduzione della curva di apprendimento nell'utilizzo degli ambienti immersivi.

In sintesi, questa prima sezione evidenzia come le tecnologie immersive, se progettate con consapevolezza metodologica e sensibilità percettiva, possano effettivamente agire come agenti di transizione e trasformazione. Affinché tale potenziale si realizzi pienamente, però, è necessario superare l'approccio prevalentemente tecnologico e strumentale, che ha caratterizzato gran parte della narrativa recente sul metaverso e sulla realtà estesa, orientando invece gli sviluppi verso applicazioni concrete e centrate sui bisogni reali degli utenti e delle organizzazioni.

La strada verso un'integrazione diffusa della XR nei processi industriali e formativi passa attraverso la costruzione di framework progettuali condivisi, la standardizzazione delle pratiche di interazione e, soprattutto, la promozione di una cultura digitale critica. In questa prospettiva, il design assume un ruolo cruciale di mediazione tra complessità tecnologica e comprensibilità umana, trasformando dati astratti in esperienze tangibili, processi articolati in narrazioni accessibili, e strumenti sofisticati in interfacce intelligibili.

Bibliografia - Prima Sezione

Ispirazioni e referenze

Agostinho, D., D'Ignazio, C., Ring, A., Thylstrup, N. B., & Veel, K. (2019). Uncertain Archives: Approaching the Unknowns, Errors, and Vulnerabilities of Big Data through Cultural Theories of the Archive. *Surveillance & Society, 17*(3/4), 422–441. https://doi.org/10.24908/ss.v17i3/4.12330

Alshaer, A. (2023). Virtual Reality in Training: A Case Study on Investigating Immersive Training for Prisoners. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14*(10). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141021

Andrejevic, M. (2014). Big Data, Big Questions| The Big Data Divide. *International Journal of Communication, 8*(0), Articolo 0.

Bal, M. (2012). Virtual Manufacturing Laboratory Experiences for Distance Learning Courses in Engineering Technology. *2012 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings*, 25.1461.1-25.1461.12. https://doi.org/10.18260/1-2--22218

Bertola, P., & Teixeira, J. C. (2003). Design as a knowledge agent. *Design Studies, 24*(2), 181–194. https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00036-4

Bhargava, A., Lucaites, K. M., Hartman, L. S., Solini, H., Bertrand, J. W., Robb, A. C., Pagano, C. C., & Babu, S. V. (2020). Revisiting affordance perception in contemporary virtual reality. *Virtual Reality, 24*(4), 713–724. https://doi.org/10.1007/s10055-020-00432-y

Biener, V., Ofek, E., Pahud, M., Kristensson, P. O., & Grubert, J. (2023). Extended Reality for Knowledge Work in Everyday Environments. In A. Simeone, B. Weyers, S. Bialkova, & R. W. Lindeman (A c. Di), *Everyday Virtual and Augmented Reality* (pp. 21–56). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05804-2_2

Blom, K. J. (2013). Virtual Affordances: Pliable user expectations. *IEEE VR Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments (PIVE).* https://www.academia.edu/479653/Virtual_Affordances_pliable_user_expectations

Bohné, T., Heine, I., Mueller, F., Zuercher, P.-D. J., & Eger, V. M. (2023). Gamification Intensity in Web-Based Virtual Training Environments and Its Effect on Learning. *IEEE Transactions on Learning Technologies, 16*(5), 603–618. IEEE Transactions on Learning Technologies. https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3208936

Bordegoni, M., Carulli, M., & Spadoni, E. (2023). Multisensory Interaction in eXtended Reality. In M. Bordegoni, M. Carulli, & E. Spadoni (A c. Di), *Prototyping User eXperience in eXtended Reality* (pp. 49–63). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39683-0_4

Bouzbib, E., Sarasate, I., Fernandez, U., Fernandez, I., López-Amo, M., Ezcurdia, I., & Marzo, A. (2025, aprile). FlexiVol: A Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'25).* https://doi.org/10.1145/3706598.3714315

Brereton, M., Bidwell, N., Donovan, J., Campbell, B., & Buur, J. (2003). Work at hand: An exploration of gesture in the context of work and everyday life to inform the design of gestural input devices. In R. Biddle & B. Thomas (A c. Di), *User Interfaces 2003: Proceedings of the Fourth Australasian User Interface Conference (AUIC2003)* (pp. 1–10).

Australasian User Interface Conference (4th), Australia, New South Wales, Darlinghurst. Australian Computer Society. http://delivery.acm.org/10.1145/830000/820088/p1-brereton.pdf?key1=820088&key2=4838136421&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=42082606&CFTOKEN=69868648

Broderick, J., Duggan, J., & Redfern, S. (2018). The Importance of Spatial Audio in Modern Games and Virtual Environments. *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, 1–9. https://doi.org/10.1109/GEM.2018.8516445

Brown, L. M., Brewster, S. A., & Purchase, H. C. (2005). A first investigation into the effectiveness of Tactons. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*, 167–176. https://doi.org/10.1109/WHC.2005.6

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2011). *The Big Data Boom Is the Innovation Story of Our Time.* Calleja, G. (2011). *In-Game: From Immersion to Incorporation.* MIT Press.

Campenhout, L., Camp, M., & Vancoppenolle, W. (2020). Exploring Tangible VR as a Tool for Workplace Design. *Companion Proceedings of the 2020 Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 33–36. https://doi.org/10.1145/3380867.3426202

Cao, J., Chen, X., & Xu, D. (2013). Design and implementation of virtual maintenance training system based on Cortona 3D. *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 1229–1232. https://doi.org/10.1109/QR2MSE.2013.6625790

Celaschi, F. (2017). Advanced design-driven approaches for an Industry 4.0 framework: The human-centred dimension of the digital industrial revolution. *Strategic Design Research Journal, 10*(2), 97–104.

Celaschi, F., Pucci, D., Pasini, V., Josserand, M., & Zannoni, M. (2024). Ultracentenari alla prova del 5.0 Sostenibili senza perdere la tradizione. *Sistema & Impresa, N.8.* https://portale.este.it/rivista/1/numero/110/articolo/1523?isModalitaLettura=1

Chen, Y.-S., Theodore, G., Huang, J.-Y., Hsieh, C.-E., Han, P.-H., & Hung, Y.-P. (2024). FlowZen: Using Hybrid-Haptic and Particle for Enhancing Immersive Experience via Continuous Illusion of Wind. *ACM SIGGRAPH 2024 Immersive Pavilion*, 1–2. https://doi.org/10.1145/3641521.3664400

Colitti, S., Vignali, V., & Pucci, D. (2023, dicembre 1). *Visualising tangible and intangible heritage through creative data.* Leaving Nothing Behind, Bologna.

Collins, K., & Kapralos, B. (2019). Pseudo-haptics: Leveraging cross-modal perception in virtual environments. *The Senses and Society, 14*(3), 313–329. https://doi.org/10.1080/17458927.2019.1619318

Csíkszentmihályi, M. (1990). *Flow.* Harper Perennial.

Dall'Osso, (2021). *Sviluppo di processi di comunicazione aptici tra uomo e macchina* [Doctoral Thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna]. https://doi.org/10.48676/unibo/amsdottorato/9762

Degraen, D., Reindl, A., Makhsadov, A., Zenner, A., & Krüger, A. (2020). Envisioning Haptic Design for Immersive Virtual Environments. *Companion Publication of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 287–291. https://doi.org/10.1145/3393914.3395870

D'Ignazio, C. (2017). Creative data literacy: Bridging the gap between the data-haves and data-have nots. *Information Design Journal*, *23*(1), 6–18. https://doi.org/10.1075/idj.23.1.03dig

Doolani, S., Wessels, C., Kanal, V., Sevastopoulos, C., Jaiswal, A., Nambiappan, H., & Makedon, F. (2020). A Review of Extended Reality (XR) Technologies for Manufacturing Training. *Technologies*, *8*(4), Articolo 4. https://doi.org/10.3390/technologies8040077

Dunne, A. (2008). *Hertzian Tales: Electronic Products, Aesthetic Experience, and Critical Design*. MIT Press.

Dyck, F., Stöcklein, J., Eckertz, D., & Dumitrescu, R. (2020). Mixed Mock-up – Development of an Interactive Augmented Reality System for Assembly Planning. In J. Y. C. Chen & G. Fragomeni (A c. Di), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction* (pp. 37–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49695-1_3

Eagleman, D. M., & Perrotta, M. V. (2023). The future of sensory substitution, addition, and expansion via haptic devices. *Frontiers in Human Neuroscience*, *16*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1055546

El Saddik, A. (2007). The Potential of Haptics Technologies. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, *10*(1), 10–17. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. https://doi.org/10.1109/MIM.2007.339540

Fang, C. M., & Harrison, C. (2021). Retargeted Self-Haptics for Increased Immersion in VR without Instrumentation. *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1109–1121. https://doi.org/10.1145/3472749.3474810

Flavin, M. T., Ha, K.-H., Guo, Z., Li, S., Kim, J.-T., Saxena, T., Simatos, D., Al-Najjar, F., Mao, Y., Bandapalli, S., Fan, C., Bai, D., Zhang, Z., Zhang, Y., Flavin, E., Madsen, K. E., Huang, Y., Emu, L., Zhao, J., … Rogers, J. A. (2024). Bioelastic state recovery for haptic sensory substitution. *Nature*, *635*(8038), 345–352. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08155-9

Floridi, L. (2014). *The Fourth Revolution: How the Infosphere is Reshaping Human Reality*. OUP Oxford.

Gabardi, M., Leonardis, D., Solazzi, M., & Frisoli, A. (2018). Development of a miniaturized thermal module designed for integration in a wearable haptic device. *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 100–105. https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2018.8357160

Gallese, V., & Guerra, M. (2012). Embodying Movies: Embodied Simulation and Film Studies. *Cinema: Journal of Philosophy and the Moving Image*, *3*, 183–210.

Giaccardi, E., & Redström, J. (2020). Technology and More-Than-Human Design. *Design Issues*, *36*(4), 33–44. Design Issues. https://doi.org/10.1162/desi_a_00612

Gibbs, J. K., Gillies, M., & Pan, X. (2022). A comparison of the effects of haptic and visual feedback on presence in virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, *157*, 102717. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2021.102717

Goffman, E. (2023). The Presentation of Self in Everyday Life. In *Social Theory Re-Wired* (3ª ed.). Routledge.

Gomi, R., Suzuki, R., Takashima, K., Fujita, K., & Kitamura, Y. (2024). InflatableBots: Inflatable Shape-Changing Mobile Robots for Large-Scale Encountered-Type Haptics in VR. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–14. https://doi.org/10.1145/3613904.3642069

Grabarczyk, P., & Pokropski, M. (2016). Perception of Affordances and Experience of Presence in Virtual Reality. *AVANT. Pismo Awangardy Filozoficzno-Naukowej, 2*, 25–44.

Grgic, J. E., Still, M. L., & Still, J. D. (2016). Effects of Cognitive Load on Affordance-based Interactions. *Applied Cognitive Psychology, 30*(6), 1042–1051. https://doi.org/10.1002/acp.3298

Grodal, T. (2009). *Embodied Visions: Evolution, Emotion, Culture, and Film*. Oxford University Press.

Haraway, D. (1990). A Manifesto for Cyborgs: Science, Technology, and Socialist Feminism in the 1980s. In *Feminism/Postmodernism*. Routledge.

Hayles, N. K. (1999). *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*. University of Chicago Press. https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/H/bo3769963.html

Hodent, C. (2017). *The Gamer's Brain: How Neuroscience and UX can Impact Video Game Design* (1ª ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315154725
Kappler, E., Figueroa Jacinto, R., & Arndt, S. (2022). Evaluation of Visual Acuity and Perceptual Field of View Using the Varjo XR-3 Headset in a Virtual Environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 66*(1), 2193–2197. https://doi.org/10.1177/1071181322661195

Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 21*(4), 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124

Komulainen, T. M., & Løvmo, T. (2014). *Large-scale training simulators for industry and academia*. https://oda.oslomet.no/oda-xmlui/handle/10642/2436

Kors, M. J. L., Ferri, G., van der Spek, E. D., Ketel, C., & Schouten, B. A. M. (2016). A Breathtaking Journey. On the Design of an Empathy-Arousing Mixed-Reality Game. *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '16*, 91–104. https://doi.org/10.1145/2967934.2968110

Laarni, J., Ravaja, N., Saari, T., Böcking, S., Hartmann, T., & Schramm, H. (2015). Ways to Measure Spatial Presence: Review and Future Directions. In M. Lombard, F. Biocca, J. Freeman, W. IJsselsteijn, & R. J. Schaevitz (A c. Di), *Immersed in Media: Telepresence Theory, Measurement & Technology* (pp. 139–185). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_8

Lahtinen, T. (2024). Brain-Computer Interface Integration With Extended Reality (XR): Future, Privacy And Security Outlook. *Proceedings of the European Conference on Cyber Warfare and Security*, 265–271. https://doi.org/doi.org/10.34190/eccws.23.1.2284

Lécuyer, A. (2009). Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 18*(1), 39–53. https://doi.org/10.1162/pres.18.1.39

Lee, B., Brown, D., Lee, B., Hurter, C., Drucker, S., & Dwyer, T. (2021). Data Visceralization: Enabling Deeper Understanding of Data Using Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *27*(2), 1095–1105. https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3030435

Lee, J., Bang, J., & Suh, H. (2018). Identifying Affordance Features in Virtual Reality: How Do Virtual Reality Games Reinforce User Experience? In D. D. Schmorrow & C. M. Fidopiastis (A c. Di), *Augmented Cognition: Intelligent Technologies* (pp. 383–394). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91470-1_31

Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, *65*, 279–295. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017

Leonard, S. N., & Fitzgerald, R. N. (2018). Holographic learning: A mixed reality trial of Microsoft HoloLens in an Australian secondary school. *Research in Learning Technology*, *26*. https://doi.org/10.25304/rlt.v26.2160

MacLean, K. E., Schneider, O. S., & Seifi, H. (2017). Multisensory haptic interactions: Understanding the sense and designing for it. In *The Handbook of Multimodal-Multisensor Interfaces: Foundations, User Modeling, and Common Modality Combinations—Volume 1* (Vol. 14, pp. 97–142). Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. https://doi.org/10.1145/3015783.3015788

Malakuczi, V., Saviano, M., Muscolo, S., Cipollone, P., Gironi, C., & Angelini, M. (2023). *Digital synesthesia in product design. Building a vocabulary of physical interactions for a sensible quantified self.* Gent. https://iris.uniroma1.it/handle/11573/1691665

Maldonado, T. (1994). *Reale e virtuale.* Feltrinelli Editore.

Manovich, L. (2020). *Cultural Analytics.* MIT Press.
Marwick, A. E. (2013). *Status Update: Celebrity, Publicity, and Branding in the Social Media Age.* Yale University Press.

Manzini, E. (2015). Design in the transition phase: A new design culture for the emerging design. *Design Philosophy Papers, 13*(1), 57–62. https://doi.org/10.1080/14487136.2015.1085683

Masson-Carro, I., Goudbeek, M., & Krahmer, E. (2020). What triggers a gesture? Exploring affordance compatibility effects in representational gesture production. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *46*(10), 1164–1182. https://doi.org/10.1037/xhp0000760

Muscolo, S., & Malakuczi, V. (2023). Design perspectives for the future of work in Industry 5.0 environment: The digital and physical space in Augmented Reality uses. In K. Vaes & J. Verlinden (A c. Di), *Connectivity and creativity in times of conflict.* Academia Press. https://doi.org/10.26530/9789401496476-054

Natkin, S., & Yan, C. (2005). *Analysis of Correspondences between Real and Virtual Worlds in General Public Applications* (p. 332). https://doi.org/10.1109/CGIV.2005.18

Nguyen, H., & Bednarz, T. (2020). User Experience in Collaborative Extended Reality: Overview Study. In P. Bourdot, V. Interrante, R. Kopper, A.-H. Olivier, H. Saito, & G. Zachmann (A c. Di), *Virtual Reality and Augmented Reality* (pp. 41–70). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62655-6_3

Niedenthal, S., Fredborg, W., Lundén, P., Ehrndal, M., & Olofsson, J. K. (2023). A graspable olfactory display for virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, *169*, 102928. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102928

Novich, S. D., & Eagleman, D. M. (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput. *Experimental Brain Research*, *233*(10), 2777–2788. https://doi.org/10.1007/s00221-015-4346-1

Öhlén, P., Johnston, C., Olofsson, H., Terrill, S., & Chernogorov, F. (2022). Network digital twins – outlook and opportunities. *Ericsson Technology Review*, *2022*(12), 2–11. https://doi.org/10.23919/ETR.2022.9999174

Osiurak, F., & Badets, A. (2016). Tool use and affordance: Manipulation-based versus reasoning-based approaches. *Psychological Review*, *123*(5), 534–568. https://doi.org/10.1037/rev0000027

Osiurak, F., Rossetti, Y., & Badets, A. (2017). What is an affordance? 40 years later. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *77*, 403–417. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.014

Panteliodi, E., & Hudson, D. (2024). A sense of space in the core of the bore: *Enhancing the MRI experience through use of spatial audio. Radiography*, *30*(5), 1451–1454. https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.07.019

Park, S., Park, Y., & Bae, J. (2022). Performance evaluation of a tactile and kinesthetic finger feedback system for teleoperation. *Mechatronics*, *87*, 102898. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2022.102898

Paterson, M. (2020). *The Senses of Touch: Haptics, Affects and Technologies*. Routledge.

Quiroga, P. C., & Hernández, J. C. C. (2021). The Perception of Space in Virtual Reality, Correlation Between Affordances and Spatial Presence. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, *9*(23). https://www.redalyc.org/journal/4576/457665440021/html/

Rae-Grant, T., Harrison, C., & Shultz, C. (2024). DynaButtons: Fast Interactive Soft Buttons with Analog Control. *2024 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 366–371. https://doi.org/10.1109/HAPTICS59260.2024.10520864

Rakkolainen, I., Farooq, A., Kangas, J., Hakulinen, J., Rantala, J., Turunen, M., & Raisamo, R. (2021). Technologies for Multimodal Interaction in Extended Reality—A Scoping Review. *Multimodal Technologies and Interaction*, *5*(12), Articolo 12. https://doi.org/10.3390/mti5120081

Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality. *Computers in Human Behavior*, *133*, 107289. https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289

Regia-Corte, T., Marchal, M., Cirio, G., & Lécuyer, A. (2013). Perceiving affordances in virtual reality: Influence of person and environmental properties in perception of standing on virtual grounds. *Virtual Reality*, *17*(1), 17–28. https://doi.org/10.1007/s10055-012-0216-3

Ricci, M., & Scarcelli, A. (2022). A Human-Centred Design Approach for Designing Augmented Reality Enabled Interactive Systems: A Kitchen Machine Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_123

Seifi, H., Zhang, K., & Maclean, K. (2015). *VibViz: Organizing, visualizing and navigating vibration libraries*. 254–259. https://doi.org/10.1109/WHC.2015.7177722

Sepasgozar, S. M. E. (2021). Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*, *11*(4), 151. https://doi.org/10.3390/buildings11040151

Shen, V., Rae-Grant, T., Mullenbach, J., Harrison, C., & Shultz, C. (2023). Fluid Reality: High-Resolution, Untethered Haptic Gloves using Electroosmotic Pump Arrays. *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1–20. https://doi.org/10.1145/3586183.3606771

Shin, D.-H. (2017). The role of affordance in the experience of virtual reality learning: Technological and affective affordances in virtual reality. *Telematics and Informatics*, *34*(8), 1826–1836. https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.05.013

Siltanen, S., & Heinonen, H. (2020). Scalable and responsive information for industrial maintenance work: Developing XR support on smart glasses for maintenance technicians. *Proceedings of the 23rd International Conference on Academic Mindtrek*, 100–109. https://doi.org/10.1145/3377290.3377296

Steffen, J. H., Gaskin ,James E., Meservy ,Thomas O., Jenkins ,Jeffrey L., & and Wolman, I. (2019). Framework of Affordances for Virtual Reality and Augmented Reality. *Journal of Management Information Systems*, *36*(3), 683–729. https://doi.org/10.1080/07421222.2019.1628877

Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, 757–764. https://doi.org/10.1145/1476589.1476686

Theodore Zeldin. (2015). *Ventotto domande per affrontare il futuro*. https://www.ibs.it/ventotto-domande-per-affrontare-futuro-libro-theodore-zeldin/e/9788838933950

Tversky, B. (2001). Spatial Cognition: Embodied and Situated. In P. Robbins & M. Aydede (A c. Di), *The Cambridge Handbook of Situated Cognition* (1ª ed., pp. 201–216). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511816826.012

Viacheslavovich, G. V., & Aleksandrovich, D. A. (2019). Interactive training simulator as means of increasing economic efficiency of enterprises. *International Journal of Management*, *10*(2). https://doi.org/10.34218/IJM.10.2.2019.011

Vignali, V., Zannoni, M., & Pucci, D. (2024). The future evolution of design-oriented practices in the context of human and non-human collaboration. *Design Across Borders: United in Creativity*, *13*, 1907–1925.

Wang, J., Chellali, A., & Cao, C. G. L. (2016). Haptic Communication in Collaborative Virtual Environments. *Human Factors*, *58*(3), 496–508. https://doi.org/10.1177/0018720815618808

Whitton, M., Lok, B., Insko, B., & Brooks, J., Frederick. (2005). *Integrating Real and Virtual Objects in Virtual Environments*.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(3), 225–240. https://doi.org/10.1162/105474698565686

Wolf, G. (2010). The Data-Driven Life. *The New York Times Magazine*, 38(L)-38(L).

Wu, Q., Li, J., Seifi, H., & Hornbæk, K. (2025). *Vipins*: Combining a pin array and vibrotactile actuators to render complex shapes and textures. *International Journal of Human-Computer Studies*, *197*, 103464. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2025.103464

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, *61*, 530–535. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Zagal, J. P., & Edwards, B. (2024). *Seeing Red: Nintendo's Virtual Boy*. MIT Press.
Zannoni, M. (2024). *Il design delle interfacce*. Quodlibet. https://www.quodlibet.it/libro/9788822921871

Zhang, J., Zhu, J., Zhou, Y., Zhu, Q., Wu, J., Guo, Y., Dang, P., Li, W., & Zhang, H. (2024). Exploring geospatial digital twins: A novel panorama-based method with enhanced representation of virtual geographic scenes in Virtual Reality (VR). *International Journal of Geographical Information Science*, *38*(11), 2301–2324. https://doi.org/10.1080/13658816.2024.2386064

Zhao, W., Queralta, J. P., & Westerlund, T. (2020). Sim-to-Real Transfer in Deep Reinforcement Learning for Robotics: A Survey. *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 737–744. https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308468

Zimmerman, J., Forlizzi, J., & Evenson, S. (2007). Research through design as a method for interaction design research in HCI. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07*, 493–502. https://doi.org/10.1145/1240624.1240704

Zimmerman, T. G., Lanier, J., Blanchard, C., Bryson, S., & Harvill, Y. (1986). A hand gesture interface device. *SIGCHI Bull.*, *18*(4), 189–192. https://doi.org/10.1145/1165387.275628

Sitografia

3DExperience Enovia. (2022, settembre 2). Dassault Systèmes. https://www.3ds.com/it/products/enovia/3dexperience

Agenzia per la coesione territoriale. (2014). *S3 – Smart Specialisation Strategy*. https://www.agenziacoesione.gov.it/s3-smart-specialisation-strategy/

Apple Vision Pro. (s.d.). Apple. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.apple.com/apple-vision-pro/

Apple Vision Pro. (2025, febbraio 18). NBA Help Center. https://support.watch.nba.com/hc/en-us/articles/20891550821783-Apple-Vision-Pro

AR Surgical Planning for every dimension in any specialty. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.medivis.com/surgical-ar

AR/VR spending by region 2020. (s.d.). Statista. Recuperato 29 febbraio 2024, da https://www.statista.com/statistics/1076686/ar-vr-spending-worldwide-by-region/

Aslop, T. (2024, dicembre 6). *Statista Topic: Extended reality (XR)*. Statista. https://www.statista.com/topics/6072/extended-reality-xr/

Canvastique3D. (s.d.). Recuperato 10 giugno 2024, da https://canvastique3d.com/home

Cortese, M. (2024). *Embodying the Machine*. Embodying the Machine. https://www.embodyingthemachine.com

End-to-End training | Airbus. (2024, luglio 2). https://aircraft.airbus.com/en/services/train

European Commission. Joint Research Centre. (2023). *Next generation virtual worlds: Societal, technological, economic and policy challenges for the EU*. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2760/51579

Extended Reality (XR) Market Size | Forecast Analysis 2033. (2024). https://www.imarcgroup.com/extended-reality-market

Flow—Turn Data Into an Experience Over Your Table. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://flowimmersive.com/

FRAMELESS | The Ultimate Immersive Art Experience. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://frameless.com

Gestione dei processi di assistenza | PTC. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.ptc.com/it/technologies/plm/service-process-management

HaptX. (s.d.). HaptX. Recuperato 22 ottobre 2025, da https://haptx.com/

Home—Gravity Sketch. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://gravitysketch.com/

Horizon Europe Calls 2024 - Destination 6: A human-centred and ethical development of digital and industrial technologies - European Health and Digital Executive Agency (HaDEA). (2024, aprile 23). https://hadea.ec.europa.eu/calls-proposals/horizon-europe-calls-2024-destination-6-human-centred-and-ethical-development-digital-and-industrial_en

Magic Leap 2 | Augmented Reality | Optics Technology. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.magicleap.com/magic-leap-2

Meta Quest 3: Visore per la realtà mista di nuova generazione. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.meta.com/it/quest/quest-3/

MIT Technology Review. (2025). *Training robots in the AI-powered industrial metaverse*. MIT Technology Review. https://www.technologyreview.com/2025/01/14/1109104/training-robots-in-the-ai-powered-industrial-metaverse/

Mudra Band. (s.d.). Mudra Band. Recuperato 16 maggio 2025, da https://mudra-band.com/

NaQi Platform. (s.d.). NAQI. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.naqilogix.com/naqi-platform

Ovr technology | Enhance Your Gaming Experience Now. (s.d.). Recuperato 23 ottobre 2025, da https://www.ovrtechnology.com/

Owo. (s.d.). OWO. Recuperato 17 settembre 2023, da https://owogame.com/

Qvarta | FeelReal Sensory Mask. (s.d.). Recuperato 23 ottobre 2025, da https://qvarta.com/en/works/feelreal-sensory-mask

Services.boeing.com/training-solutions/maintenance-training/maintenance-synthetic-trainer. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://services.boeing.com/training-solutions/maintenance-training/maintenance-synthetic-trainer

ShapesXR — Bring ideas to life in 3D and XR. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.shapesxr.com/

Simtryx | AI & Spatial Simulations for Healthcare. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.simtryx.com/

Software PLM | Siemens Teamcenter. (s.d.). Siemens Digital Industries Software. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://plm.sw.siemens.com/it-IT/teamcenter/

Teslasuit | Meet our Haptic VR Suit and Glove with Force Feedback. (2022, marzo 2). Teslasuit. https://teslasuit.io/

The Da Vinci Eye App. (s.d.). Da Vinci Eye. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://davincieyeapp.com/

Twinmotion is a cutting-edge real-time visualization tool. (s.d.). Twinmotion. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.twinmotion.com/en-US/home

United Nations. (2015, ottobre 21). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, da https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf

Unity Industry Product Walkthrough: Demos & Tutorials. (s.d.). Unity. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://unity.com/campaign/unity-industry-product-walkthrough-demos

Varjo XR-3—The First True Mixed Reality Headset | Varjo. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://varjo.com/products/varjo-xr-3

Vivi il gioco con PICO 4 AUSTERE VR All-in-One | PICO Italy. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.picoxr.com/it/products/pico4

Vuzix Blade 2™ Smart Glasses. (s.d.). Vuzix Corporation. Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.vuzix.com/products/vuzix-blade-2-smart-glasses

Wisear—Let Your Mind Be In Control. (s.d.). Recuperato 21 ottobre 2025, da https://www.wisear.io/

Seconda Sezione
Scenari e applicazioni sul campo

02.

Nella prima parte dell'elaborato si è cercato di riassumere l'evoluzione e il panorama attuale delle tecnologie immersive, fornendo un'inquadratura ampia con l'obiettivo di trasmetterne le molteplici sfaccettature che lo caratterizzano. Nel prossimo capitolo si mira a contestualizzare gli strumenti della realtà estesa all'interno del ambito della produzione industriale, approfondendo da un lato una verticalizzazione di tipo strutturale e organizzativa e dall'altro una serie di osservazioni e sperimentazioni sul campo necessarie per comprendere le reali percezioni e impatti nell'introduzione di tali strumenti e pratiche in contesti reali industriali. In questa fase, emergono due direttrici principali: la prima si concentra sull'aspetto di continua trasformazione dei mercati e le conseguenti criticità che si riflettono quotidianamente sui tessuti produttivi determinando un'inevitabile maggiore attenzione nei confronti dello sfruttamento delle risorse, sia in termini energetici e di materie prime, che del personale impiegato nei processi produttivi. La seconda direttrice evidenzia le criticità nel processo di transizione, con particolare attenzione allo sviluppo di pratiche di progetto interdisciplinari che mirino al superamento dell'approccio organizzativo a silos che caratterizza le piccole e medie imprese del Made in Italy.

Alla luce di queste molteplici criticità è necessario lo sviluppo di un approccio sistemico per destrutturare le rigidità organizzative che spesso limitano la capacità di modificare agilmente i processi di sviluppo in reazione ai rapidi cambiamenti tecnologici contemporanei. Questa inefficienza, se non affrontata progettualmente, continuerà ad essere causa di obsolescenze, rallentamenti e ritardi nei processi di innovazione non ammissibili, contribuendo conseguentemente alla perdita di cospicue fette di mercato. Pur considerando gli aspetti economici, elemento decisionale di questo processo di trasformazione, questa ricerca non potrà affrontare tali tematiche perché esterne al perimetro di competenza dell'ambito disciplinare di questo lavoro. Ciò che viene invece preso in esame è la dimensione sistemica della trasformazione, intesa come capacità del design di incidere sulle strutture organizzative attraverso la gestione e la condivisione della conoscenza. Si ritiene necessario, per un corretto processo di innovazione, concentrare le risorse di sviluppo con l'obiettivo di rendere le informazioni diffuse e permeabili dall'organizzazione. Per raggiungere questo obiettivo è necessario che si manifestino due condizioni: la prima, che tutti gli attori dispongano di dati e informazioni in tempo reale, semplificando e velocizzando i processi; la seconda impattando indirettamente sui flussi di lavoro tra le persone, che per mantenere aggiornate queste informazioni, occorra che l'intera collettività contribuisca in maniera attiva, condividendo il proprio sapere, sia avendo cura di come esso viene archiviato.
Sulla base di quanto enunciato fino ad ora, emerge la domanda se le tecnologie immersive possano aiutare in questo processo di trasferimento e organizzazione dei dati in azienda e la conseguente, se le condizioni delle industrie italiane raggiungano un livello minimamente sufficiente per incominciare a considerare la gestione dei dati come risorsa essenziale, oppure la questione sia più complessa e ci siano altri fattori che influiscano in maniera rilevante nell'attivazione di questo processo? Di quali fattori si tratta?
Pertanto, in continuità con la prima domanda di ricerca, si delinea un secondo quesito.

RQ2: In che modo le tecnologie immersive possono essere utilizzate come facilitatori e strumenti di mediazione in ambito industriale e produttivo?

3. Lo scambio

Tutti per uno e uno per tutti

L'introduzione delle tecnologie immersive nei contesti aziendali rappresenta oggi una frontiera strategica per il design dell'interazione, in quanto consente di intervenire non solo sugli strumenti operativi, ma anche e sulle persone attraverso l'azione orientata alla cultura organizzativa, sui flussi di comunicazione e sui sistemi di condivisione della conoscenza. La presente sezione si propone di esplorare come le tecnologie immersive: realtà aumentata, realtà virtuale e visualizzazione dei dati in ambienti tridimensionali, possano agire come facilitatori trasformativi, ponendosi al crocevia tra digitalizzazione dei processi e redistribuzione del sapere (Coburn et al., 2017).

Nel contesto corporate, il passaggio a nuovi modelli di gestione dell'informazione non è naturale: implica una ridefinizione dei ruoli, delle relazioni tra reparti, delle priorità strategiche e delle modalità con cui il valore viene prodotto, distribuito e percepito.
Tuttavia, a fronte dell'evoluzione dei modelli produttivi e dell'adozione crescente di tecnologie intelligenti e interattive, molte organizzazioni mantengono assetti comunicativi rigidi, sistemi documentali non interoperabili e un'organizzazione dei dati ancora fortemente gerarchizzata (Carcano & Lojacono, 2019). A questo scenario si contrappone la possibilità di costruire un approccio alternativo, fondato su principi di apertura, accessibilità e trasversalità. Le tecnologie immersive non vengono qui considerate meri strumenti di visualizzazione, ma leve operative e culturali in grado di riposizionare l'atto comunicativo, rendendolo più efficace, situato e partecipato. In tale prospettiva, il design diventa uno spazio di esplorazione progettuale in cui gli approcci digitalizzati diventano strumento per l'abilitazione della conoscenza condivisa.

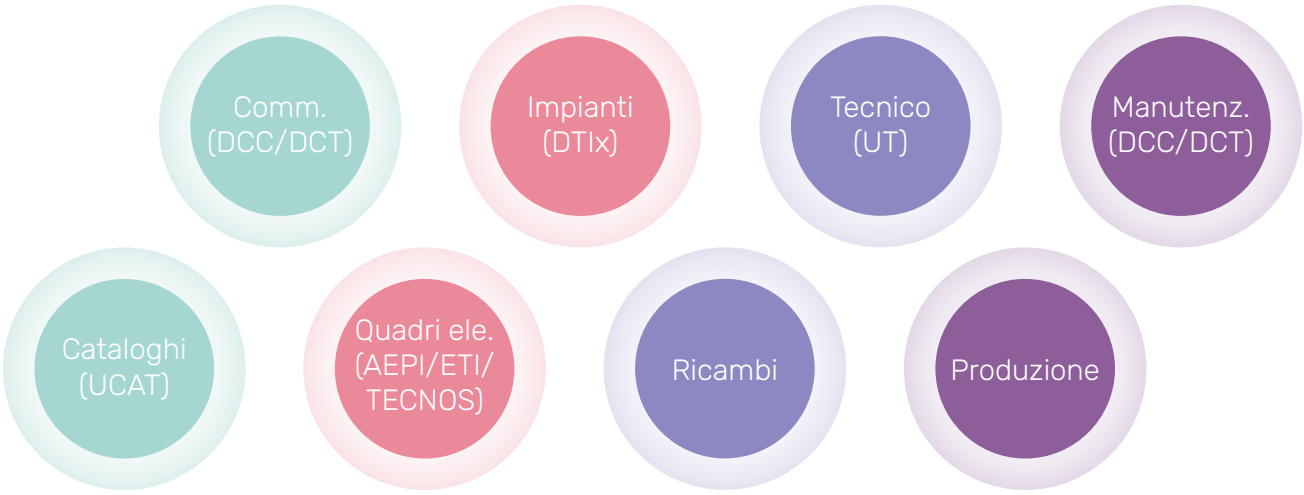
Un ruolo centrale in questo processo è assunto dai dati. La gestione, interpretazione e comunicazione delle informazioni all'interno delle imprese diventa il punto nevralgico su cui si gioca parte della competitività e l'adattabilità dei sistemi produttivi (Bolisani & Bratianu, 2018). Non si tratta solo di raccogliere dati, ma di renderli attivabili, intelligibili, trasferibili. In questo scenario, le tecnologie immersive e sistemi organizzati specificamente, possono contribuire ad abbattere le barriere tra domini, facilitare la lettura dei pattern nascosti e alimentare pratiche di apprendimento organizzativo distribuito.

3.1 As Is

Nel contesto aziendale contemporaneo, il tema della trasformazione digitale si scontra spesso con la persistenza di pratiche consolidate, infrastrutture frammentate e logiche operative che faticano ad adattarsi a nuove modalità di gestione della conoscenza.
Le organizzazioni osservate mostrano un'elevata specializzazione dei reparti e un'articolazione interna che tende a privilegiare l'efficienza operativa, in particolar modo produttiva, rispetto alla condivisione trasversale delle informazioni. Questa impostazione, tipica del tessuto imprenditoriale italiano (Carcano & Lojacono, 2019), garantisce eccellenza esecutiva ma spesso limita le capacità di adattamento e innovazione sistemica.
Un esempio emblematico di questa impostazione è rappresentato dalla funzione della documentazione tecnica, la cui definizione intende l'insieme di tutti i processi e documenti che costituiscono il corpo indicativo e legale dei prodotti industriali (Haramundanis, 2014).

All'aumentare del grado di complessità del prodotto, il volume e la caratterizzazione della documentazione aumenta, sia per numero di vincoli, sia per il numero di contenuti, soprattutto nei casi delle macchine automatiche e degli impianti ceramici, dove la documentazione raggiunge livelli di dettaglio e di estensione particolarmente elevati.

Data la premessa, in Sacmi, azienda ospitante e collaboratrice del progetto, esiste un reparto dedicato, che prende il nome di Ufficio Cataloghi, il cui compito è quello di creare materialmente i prodotti informativi, partendo dall'impaginazione e arrivando alla stampa. Lo stesso ente, si occupa anche della gestione del processo di produzione dei documenti, del loro invio al cliente e, ancor più, di manutenere e aggiornarne la validità nel corso della vita della macchina, della famiglia di prodotti o dell'impianto. Ognuna di queste tipologie, è contraddistinta da differenti specificità, tuttavia, è possibile semplificare la natura della documentazione come l'insieme di: istruzioni, sia meccaniche che elettriche ed elettroniche, catalogo ricambi e dichiarazioni, siano esse di conformità o di altre tipologie di certificazione. L'agglomerato in questione, quindi, ricopre non solo un aspetto operativo, bensì rappresenta l'azienda in caso di procedure legali, dimostrandone così l'assoluta necessità e valore (Otto & Anton, 2007). Sebbene l'attività possa sembrare circoscritta, è appunto fondamentale per poter rendere gli artefatti commercializzabili conformemente ai regolamenti nazionali e internazionali, rappresentando, inoltre, una voce di costo non trascurabile, che cela dinamiche strutturali ampie poiché la produzione e l'aggiornamento dei cataloghi implicano interazioni tra vari attori quali marketing, progettazione, produzione e logistica. Oggigiorno, queste interazioni non sono sempre strutturate o supportate da strumenti integrati, generando ridondanze, ritardi e perdita di coerenza comunicativa. L'ufficio cataloghi diventa così il simbolo di una comunicazione verticale, talvolta lenta e segmentata, che si basa su una trasmissione sequenziale di informazioni anziché su un'infrastruttura condivisa e agile. A supporto di quanto introdotto, si colloca il lavoro di ricerca condotto al fine di mappare il processo in utilizzo, cercandone di individuare e rappresentare i flussi interni in modo da comprenderne punti di forza, quelli di debolezza e gli eventuali margini in cui l'eventuale introduzione di strumenti immersivi possa generare valore o impatti positivi.



Essendo la **redazione documentale** un'attività a **valle** del **processo** di produzione, questa interessa **trasversalmente** i diversi **reparti** coinvolti nella progettazione e nella realizzazione delle macchine/impianti.

Fig. 8 Enti coinvolti nei processi di realizzazione e utilizzo della documentazione tecnica

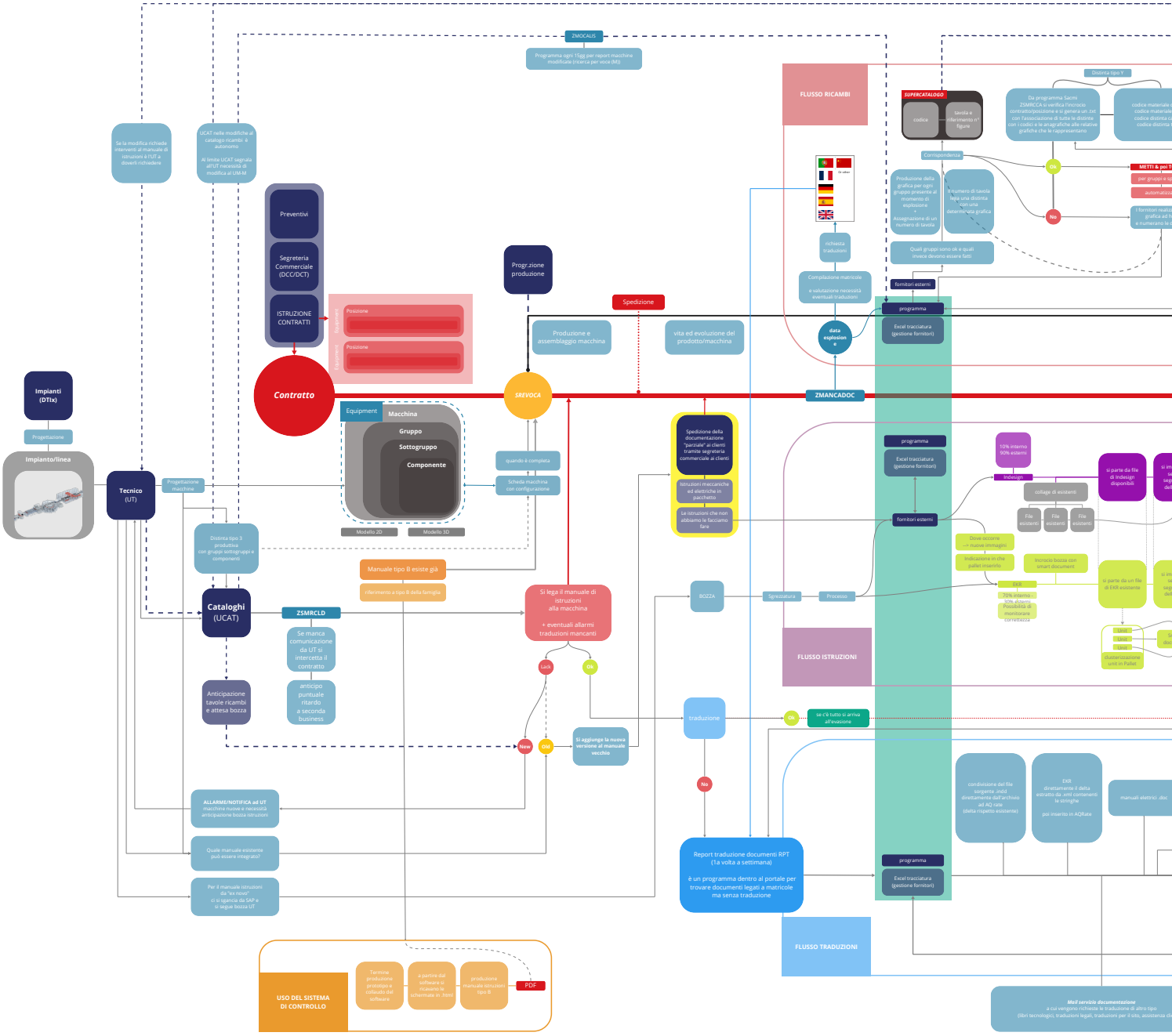
Prima di tutto, occorre presentare la composizione dell'ufficio con cui ho collaborato in SACMI. L'organico prevede sette dipendenti così organizzati: due persone sono prevalentemente dedicate alle traduzioni, avendo in carico il dialogo con i fornitori esterni e il trattamento delle traduzioni dei manuali di interfaccia; una funge da tramite con i rispettivi reparti delle consociate, due producono documenti con metodo tradizionale, curandone la logistica, e due producono i documenti secondo una nuova metodologia, trattandone altresì la logistica. Specificando, con "tradizionale", si intende un'impaginazione tramite il software Indesign, mentre con "nuova" ci si riferisce all'utilizzo di un sistema/software afferente ai CMS (Component Management System).

Descrivendo sinteticamente quanto mostrato in figura 9, è possibile definire come momento di inizio quello di evasione di un nuovo Ordine di Vendita, in questo frangente, all'avvenuta dell'acquisto, sul software gestionale viene creato un nuovo contratto, al quale dovranno essere allegati tutti i prodotti necessari. In seguito a questa prima fase, tramite apposite transazioni di interrogazione del sistema gestionale, si rende nota la necessità della produzione dei nuovi documenti, in particolare del manuale meccanico di istruzioni, del manuale elettrico di uso e controllo, infine del catalogo ricambi. Per poter procedere alla parte operativa del primo, ovvero del manuale meccanico di istruzioni, occorre che l'ufficio tecnico, responsabile dell'ideazione, della progettazione e del funzionamento della macchina, fornisca all'ufficio cataloghi una bozza che mostri come sia da strutturare e personalizzare il documento della macchina in ordine. A questo punto l'addetto, indipendentemente dal metodo e seguendo la traccia, si trova di fronte a due possibilità, la prima è che il lavoro sia in parte già stato fatto, in questo caso ricercherà la porzione in questione copiandola nel nuovo lavoro, in caso contrario dovrà attivarsi in modo da produrre il contenuto necessario, sia che si tratti della scrittura di un testo, sia che si tratti della creazione di una tavola da disegno. Una volta completato, in successione alle fasi di validazione dei reparti interessati, si procederà alla traduzione.

Per quanto riguarda il catalogo ricambi, la procedura comincia da un'elaborazione della distinta interna al sistema gestionale che, dopo essere stata data in pasto ad un apposito programma, viene trasformata in un file di testo dove possono essere operate le modifiche necessarie tramite un'attività manuale abbastanza sofisticata. A consolidamento avvenuto, viene generato il documento definitivo. Il Manuale Elettrico di Uso e Controllo segue un iter differente e svincolato dall'ufficio cataloghi che ne gestisce soltanto il collegamento al contratto.

Una volta terminata la fase di generazione e produzione, si entra nel flusso delle traduzioni che viene appaltato esternamente e genera in risposta sia i paragrafi tradotti, sia le singole frasi, che vanno ad alimentare un database, il quale verrà interrogato prima di chiedere un'eventuale copia di una operazione già effettuata. Attualmente, tutti i prodotti validi legalmente sono redatti in italiano. In particolare, il manuale di istruzioni viene fornito in originale in italiano e tradotto in inglese; solo su richiesta, si aggiunge la lingua desiderata dal cliente. Il catalogo ricambi, invece, viene emesso in sei lingue: italiano, inglese, francese, spagnolo, tedesco e portoghese. L'ultima lingua viene opzionata e sostituita a seconda della richiesta del cliente.

Al termine di questi processi, è possibile raccogliere e allegare al contratto le altre tipologie di documentazioni che provengono da enti differenti. Quando tutto è pronto, è possibile procedere all'evasione della documentazione, questa operazione, che prevede il caricamento di tutti i documenti tramite portale interno, rende visibile al cliente i propri materiali tramite portale dedicato.



Oltre alla breve sintesi dei processi qui riportati, ciò che in generale emerge dall'attività di mappatura delle relazioni comunicative, è la difficoltà di bilanciamento tra i flussi informativi formali e quelli informali prevalentemente indotto dalla contemporanea necessità di standardizzare il più possibile i documenti di accompagnamento dei prodotti, implicando maggiore formalizzazione e la contestuale possibilità di sovrascrivere modifiche a fronte dell'elevato grado di personalizzazione dei prodotti e degli impianti offerto.
La dinamica in questione, pertanto, comporta situazioni in cui nel sistema gestionale, a layout a campi rigidi si affianchino campi aperti all'interno dei quali il valore e il significato delle informazioni dipende esclusivamente dalla precisione e diligenza delle figure coinvolte, rendendo le procedure di aggiornamento soggettive e talvolta carenti.
Inoltre, a tali complessità, si affiancano altre dinamiche critiche, non rare nelle grandi organizzazioni, come ad esempio nel caso delle informazioni rilevanti che circolano tramite canali secondari: conversazioni informali, documenti condivisi su cloud non istituzionali, file duplicati archiviati localmente, costituiscono entropia organizzativa (Bolisani & Bratianu, 2018), ovvero un aumento dell'incertezza e della difficoltà di accesso al sapere corretto, nel momento opportuno, da parte della giusta persona.

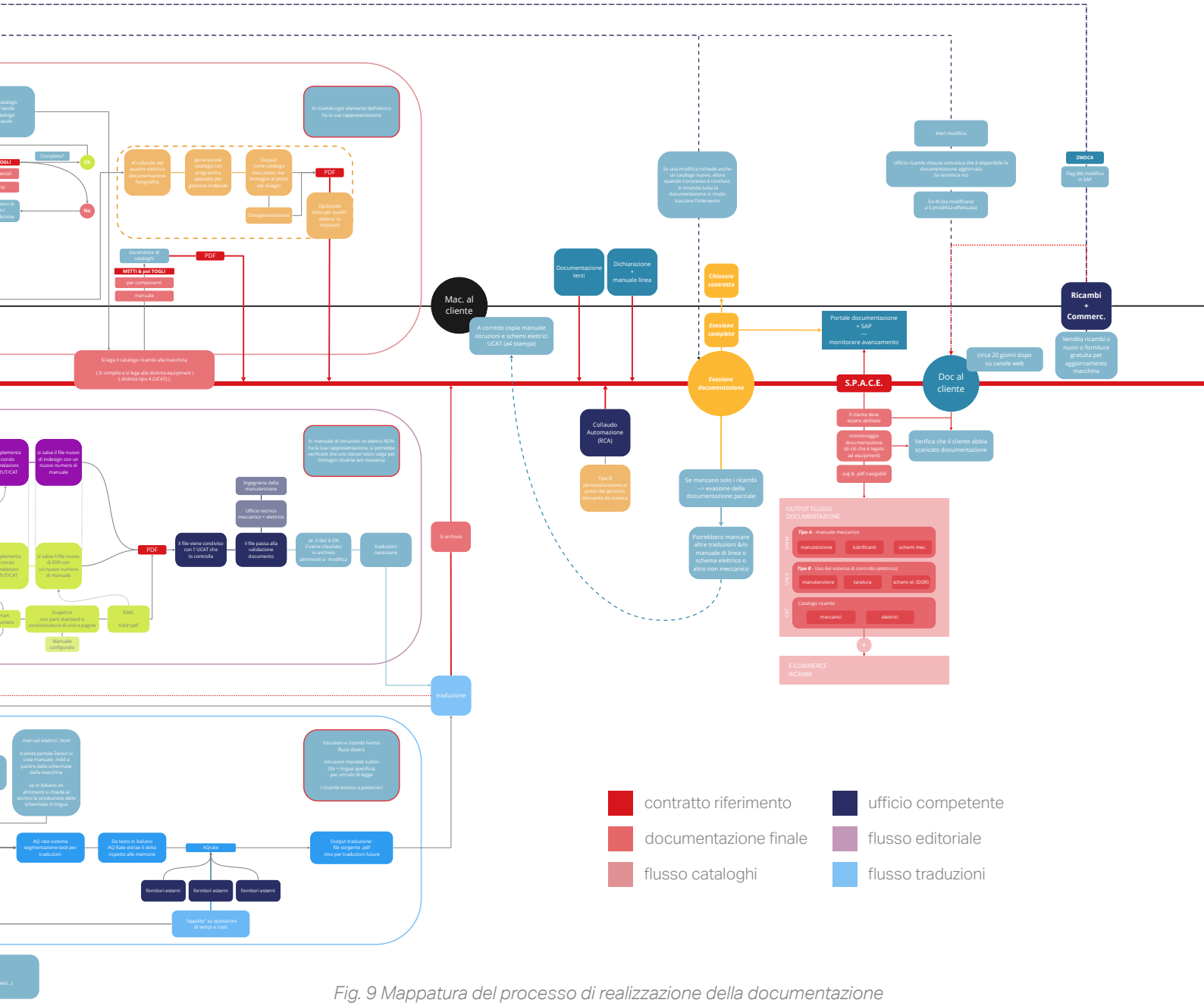


Fig. 9 Mappatura del processo di realizzazione della documentazione

Oltre all'osservazione di carattere generale, è possibile individuare altri punti di interesse che denotano alcune discrepanze e difficoltà sulle quali si è ragionato al fine di proporre strategie, processi e strumenti alternativi, di seguito le principali:

_l'assenza di strumenti maneggevoli alla condivisione per la validazione e l'aggiornamento delle informazioni genera tensioni tra reparti;

_la responsabilità del contenuto spesso ricade su soggetti intermedi, privi della piena visibilità sui dati tecnici o commerciali di partenza o destinazione;

_le tempistiche produttive e commerciali non si allineano con i flussi comunicativi, generando un effetto "a cascata" che rallenta i processi decisionali;

_le interfacce informative sono spesso pensate in funzione dell'output (es. catalogo PDF), e non come ambiente dinamico di costruzione del significato.

Tale scenario mette in luce una consapevolezza chiave: la trasformazione digitale non può essere ridotta all'introduzione di nuove tecnologie, è necessario pensare alle modalità con cui l'informazione viene generata, organizzata, condivisa e attivata nei contesti produttivi (Koukias et al., 2015). Le tecnologie immersive, in questa fase, non sono ancora presenti in modo strutturato, ma iniziano a connotarsi come possibili strumenti di facilitazione, in grado di supportare processi di rappresentazione condivisa, navigazione di contenuti complessi e aggiornamento partecipato della conoscenza.

3.2 L'importanza dei dati

All'interno dell'ambito in analisi, il concetto di "dato" non si limita ai valori numerici o alle serie temporali provenienti da sensori, ma include un vasto spettro di informazioni digitali: modelli 3D, specifiche tecniche, manuali di istruzione, log di processo, report qualitativi, video esplicativi, ne sono alcuni esempi. Secondo la norma ISO 10303 (2024), un dato industriale può essere qualsiasi rappresentazione digitalizzata di conoscenza utile alla progettazione, produzione, manutenzione o controllo. I dati sono quindi i mattoni fondamentali su cui si costruisce la trasformazione digitale, costituendo il patrimonio informativo su cui si fondano le decisioni operative e strategiche.

In ambito manifatturiero, i modelli 3D derivati dal CAD, ad esempio, rappresentano non solo la forma fisica di un componente, ma includono metadati funzionali, informazioni geometriche, tolleranze e le proprietà dei materiali utilizzati per la loro realizzazione.
Questo rende il dato un elemento portante del cosiddetto "gemello digitale" (digital twin), ovvero una replica virtuale del prodotto o del processo fisico. In ambienti ad alta automazione, i documenti tecnici e dati di processo sono integrati nei sistemi PLM (Product Lifecycle Management) e nei MES (Manufacturing Execution System), rendendo possibile una gestione integrata e coerente lungo tutto il ciclo di vita del prodotto. In sintesi, il dato industriale è ciò che permette la continuità digitale (digital thread) tra progettazione, produzione e manutenzione (Straub & Ziegler, 2023). La disponibilità di dati strutturati e accessibili consente, ad esempio, l'impiego di tecniche avanzate di analytics e, soprattutto, di intelligenza artificiale per estrarre conoscenza e guidare le i processi decisionali. L'AI sta dimostrando grande potenziale in applicazioni di manutenzione predittiva, nell'ottimizzazione della produzione, inoltre, algoritmi di machine learning (ML) possono essere allenati su grandi dataset provenienti da macchine industriali per identificare anomalie, prevedere guasti o suggerire azioni correttive (Qi et al., 2021).

L'addestramento di modelli predittivi affidabili, però, richiede dati di alta qualità, ben etichettati e rappresentativi del dominio operativo, in tal caso, l'AI può essere impiegata anche nella risoluzione automatica dei problemi (automated troubleshooting), nei quali il sistema esperto analizza i sintomi del problema, consulta una base di conoscenze e propone soluzioni plausibili. Questi sono solo alcuni esempi che mettono in risalto quanto in ambito industriale il valore dei sistemi computazionali sia direttamente proporzionale alla quantità, qualità e accessibilità dei dati su cui può operare.

La raccolta e la produzione dei dati rappresenta una sfida significativa, infatti, non tutti sono in formato digitale ma richiedono un processo di digitalizzazione che coinvolge molti dei sistemi esistenti con considerevoli investimenti in sensoristica, infrastrutture IT e formazione del personale; inoltre, i dati industriali tendono a essere eterogenei e distribuiti in silos organizzativi e i diversi hardware e software non compatibili, ne limitano le possibilità di utilizzo. Uno dei principali ostacoli è proprio la mancanza di interoperabilità tra le fonti: PLC, SCADA, ERP, e strumenti CAD/CAM possono adottare formati e protocolli

differenti, rendendo la raccolta un processo complesso e spesso dipendente da modalità operative manuali.

La cosiddetta "data readiness", ovvero il livello di preparazione dell'infrastruttura per supportare l'acquisizione, l'elaborazione e l'analisi dei dati, è una metrica significativa, ma spesso trascurata. La raccolta intelligente, infatti, implica non solo acquisire tutti i dati possibili, bensì una collezione consapevole di quelli utili all'obiettivo specifico, evitando sovraccarichi informativi (Ivers et al., 2016). Le tecniche di edge computing e filtraggio in tempo reale sebbene possano essere impiegate per ridurre latenze e migliorare la qualità dei dati inviati al cloud o ai sistemi di analisi, non possono risolvere da sole la criticità di gestione di moli estreme di elementi da processare. In questo senso, la progettazione di flussi informativi che prevedano sin dalle prime fasi la produzione di dati integrati rappresenta una delle strategie più efficaci per garantirne la coerenza e, soprattutto, la riutilizzabilità.

Un'ulteriore complessità riguardante la gestione dei dati consiste nell'attribuzione delle responsabilità relative alla loro produzione e manutenzione. In molti casi, i dati sono generati da diversi attori nel ciclo di vita del prodotto: ingegneri progettisti, operatori di macchina, tecnici di manutenzione e responsabili della qualità, che costituiscono una frammentazione che può generare ridondanze, incoerenze e, soprattutto, una mancanza di accountability chiara. Ciò può ostacolare i processi di messa in relazione delle informazioni, incidendo negativamente sulla costruzione di collegamenti semantici e temporali tra le diverse entità coinvolte: un ordine di produzione, ad esempio, deve essere collegato ai dati di progettazione, alle misure di qualità e agli eventuali interventi manutentivi.
Questo approccio, richiede modelli di dati condivisi (ontologie industriali) e una forte governance dei metadati (Zeng, 1999). Tecnologie come il "Common Data Environment" (CDE) e il "Model-Based Systems Engineering" (MBSE) offrono strumenti per centralizzare e normalizzare le informazioni, tuttavia, il problema culturale persiste: se ogni reparto utilizza propri strumenti e linguaggi, la creazione di un linguaggio comune per i dati rimane un obiettivo difficile da raggiungere, benché cruciale per l'integrazione verticale e orizzontale dell'impresa.

Tra i nodi critici si aggiunge anche il tema dell'interpretazione, che implica che i dati per essere utili, debbano essere contestualizzati, analizzati e trasformati in informazioni significative. Tale operazione, però, può richiedere competenze specifiche che non sempre sono presenti in azienda, infatti, le figure dei "data scientist" o dei "process analyst" sono ancora insufficientemente diffuse, pertanto, spesso le decisioni vengono prese su base esperienziale, anche in presenza di dati contrari oppure in presenza di elementi ambigui che possono essere letti in modo differente da reparti diversi, ad esempio, un allarme macchina può essere considerato irrilevante dal manutentore ma critico per il responsabile della qualità. Questa casistica introduce il concetto di "data literacy" che nei contesti produttivi risulta essenziale poiché tutti gli attori della filiera devono possedere almeno un livello base di comprensione dei dati per poterne sfruttare il potenziale (Dicks, 2009).

Tale circostanza, impone la necessità di investire in tempi brevi su tutto ciò che supporti e faciliti i processi interpretativi, a partire dai programmi di alfabetizzazione all'adozione di strumenti avanzati di visualizzazione (dashboard intelligenti, modelli 3D interattivi e sistemi di realtà estesa) capaci di rendere dati leggibili, comprensibili e fruibili anche ai non esperti. Sempre sul fronte infrastrutturale, occorre particolare attenzione al tema del trasferimento in quanto i dati devono poter fluire in modo sicuro, affidabile e continuo tra sistemi, i reparti, gli impianti e, in alcuni casi, tra partner esterni.

Il passaggio di informazioni da un contesto all'altro, infatti, può comportare perdite di informazioni, errori di interpretazione o incompatibilità tecniche visto che i sistemi PLM e ERP, ad esempio, non sempre dialogano con le macchine CNC o con i sistemi SCADA senza necessità di middleware, talvolta anche complessi.

Anche il trasferimento umano, ovvero la comunicazione tra operatori, rappresenta un fattore critico, documenti stampati, e-mail disorganizzate o strumenti obsoleti possono interrompere il flusso informativo, specialmente se è assente una strategia di data logistics chiara, in tal caso l'intero sistema informativo industriale rischia di diventare inefficiente, ridondante e vulnerabile.

Infine, la comunicazione della conoscenza, distinta dal semplice trasferimento di dati trattato fino ad ora, rappresenta una delle sfide più profonde nei contesti industriali, infatti, l'impianto del sapere (knowledge) è ciò che conferisce significato ai dati e li rende utili all'azione. Per questo motivo, mentre i dati possono essere salvati e trasferiti in modo relativamente facile, la conoscenza è spesso tacita, implicita nei comportamenti degli esperti e difficilmente codificabile.
Questa dinamica può condurre al "knowledge loss", risultando particolarmente critico in aziende con alto turnover o con tecnici esperti prossimi al pensionamento (Levallet & Chan, 2018). In questo caso, la mancata formalizzazione dei processi, comporta la perdita di soluzioni già adottate in passato, rendendo le organizzazioni vulnerabili a errori ripetuti (Daghfous et al., 2013). Per aiutare a contenere il fenomeno accennato esistono strumenti utili come, ad esempio, i sistemi di gestione della conoscenza, la costruzione di repository digitali condivisi, oppure l'impiego consapevole dell'AI, ciononostante è la comunicazione strutturata della conoscenza, in ultima analisi, ciò che permette all'impresa di apprendere, evolvere e non ripetere gli stessi errori.

3.3 Obiettivo a tendere

Nei contesti industriali complessi, la gestione e la valorizzazione dell'informazione rappresentano una funzione critica, essenziale per garantire coerenza e coordinamento lungo tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto. Senza una regia efficace dei dati, il rischio è che i flussi informativi diventino frammentati, ridondanti o incoerenti, con conseguenze negative sulla produttività e sulla capacità di innovazione delle imprese.
Negli ultimi decenni si è assistito alla diffusione di una molteplicità di sistemi e infrastrutture digitali che hanno progressivamente contribuito a costruire l'attuale scenario: ciascuno con finalità specifiche, ma tutti inevitabilmente interconnessi in una rete che, se non ben governata, tende a generare complessità anziché semplificazione (Garousi et al., 2013).
I principali sistemi che sostengono questa architettura digitale possono essere ricondotti a quattro categorie: ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e piattaforme di gestione integrata del ciclo di vita del prodotto, note comunemente come soluzioni di PLM.

Gli ERP costituiscono il nucleo della gestione amministrativa e logistica, permettendo di coordinare risorse materiali, umane e finanziarie, nonché di automatizzare processi di contabilità, acquisti e forniture. Attraverso moduli interconnessi, tali piattaforme permettono di integrare informazioni critiche per il business, rendendo disponibile una visione consolidata dell'azienda (Archana et al., 2022). Se da un lato gli ERP assicurano una governance centralizzata, dall'altro possono risultare poco flessibili in contesti dove l'innovazione richiede rapidità decisionale e adattamento continuo, sollevando il tema della loro integrazione con strumenti più agili e distribuiti.

dato

OdV
equipment
modelli CAD
immagini

contenitore

ERP
PLM
portali

Ogni **struttura** coinvolta si occupa solo di una **parte** del **processo** (sia di produzione sia di **informazione**), ciò comporta una **frammentazione** dei **dati** che richiede appositi **raccoglitori** e strumenti per la loro manipolazione.

Fig. 10 Disambiguazione tra informazioni e infrastrutture per l'organizzazione e la condivisione

I MES, invece, hanno un ruolo operativo cruciale: monitorano e controllano le attività della linea di produzione, tracciando lo stato dei processi in tempo reale, gestendo la qualità e la manutenzione programmata, e garantendo la rintracciabilità dei lotti. Grazie al legame diretto con il livello operativo, consentono un controllo puntuale delle performance e abilitano interventi correttivi immediati. Questi sistemi sono sempre più arricchiti da interfacce user-friendly e da componenti di realtà aumentata, che permettono agli operatori di visualizzare istruzioni e dati contestuali direttamente sul campo, riducendo errori e tempi di intervento. Tuttavia, la loro efficacia dipende dalla capacità di comunicare con i livelli superiori e inferiori del sistema aziendale: senza un'integrazione robusta con ERP e SCADA, anche il MES rischia di rimanere un'isola informativa.

I sistemi SCADA rappresentano la base per la supervisione e il controllo dei processi industriali. Grazie a reti di sensori e ad architetture di controllo distribuito, questi strumenti raccolgono dati in tempo reale su parametri fisici, energetici e ambientali, permettendo di monitorare e reagire prontamente a deviazioni dagli standard operativi. La loro forza è la granularità del controllo, ma anche qui emergono criticità legate alla sicurezza e alla gestione dei flussi di dati, in particolare quando tali sistemi devono interfacciarsi con infrastrutture IT e ambienti cloud. In questo senso, la crescente digitalizzazione e apertura verso protocolli standardizzati, se da un lato aumenta la scalabilità, dall'altro amplifica i rischi di vulnerabilità, richiedendo approcci di sicurezza avanzati e metodologie sistematiche di validazione.

Le piattaforme per la gestione integrata del ciclo di vita del prodotto costituiscono un ulteriore elemento cardine di questo ecosistema. Questi sistemi consentono di gestire modelli digitali, dati strutturati e non strutturati, flussi di lavoro e revisioni di progetto, fornendo un archivio unificato e aggiornato che accompagna il prodotto lungo l'intera catena del valore. Se in passato il focus era soprattutto sulla gestione dei file CAD, oggi l'evoluzione ha portato a concepire questi strumenti come "business strategy enabler", capaci di favorire la collaborazione interfunzionale e di alimentare un flusso continuo di innovazione (Gregor et al., 2007). L'integrazione con i cosiddetti gemelli digitali amplia ulteriormente le possibilità: grazie a modelli virtuali costantemente aggiornati, è possibile effettuare simulazioni, test predittivi e ottimizzazioni che riducono tempi e costi di prototipazione, migliorando la qualità e la sicurezza del prodotto (Heinonen, 2023).
Il tema della qualità dei dati rimane tuttavia un punto critico, infatti, l'efficacia dei sistemi dipende strettamente dalla qualità delle informazioni immesse.

Dati incoerenti, duplicati o obsoleti compromettono infatti l'affidabilità delle simulazioni, la tracciabilità delle revisioni e la validità dei processi decisionali. La disponibilità di strumenti di validazione automatica, unita all'impiego di standard comuni e procedure di governance, rappresenta quindi un fattore determinante per rendere queste piattaforme realmente efficaci. Un altro aspetto rilevante riguarda la collaborazione e la condivisione delle informazioni. Nei modelli organizzativi tradizionali, la segmentazione delle competenze e la frammentazione dei silos hanno limitato la circolazione della conoscenza. Le moderne architetture digitali cercano invece di costruire ecosistemi collaborativi, in cui dati e strumenti siano accessibili in tempo reale a tutti gli attori della filiera (Skelton & Pais, 2019).

L'evoluzione dei CMS (Content Management Systems), ad esempio, mostra come la capacità di gestire i contenuti digitali abbia seguito una traiettoria che va dalla semplice archiviazione documentale alla costruzione di piattaforme dinamiche in grado di supportare processi decisionali complessi (Jagamogan et al., 2021; McKeever, 2003). In questo senso, l'affermazione dei CMS come snodi centrali dell'organizzazione digitale conferma la centralità della gestione dei dati come infrastruttura critica per la competitività. Accanto a queste opportunità, emergono anche criticità da non sottovalutare. L'elevata complessità di implementazione, i costi iniziali, la difficoltà di personalizzazione e la necessità di integrare sistemi eterogenei rappresentano ancora barriere significative. Molte imprese si trovano a dover bilanciare tra l'adozione di soluzioni all'avanguardia e la resistenza derivante da processi consolidati, infrastrutture legacy e vincoli di budget. In assenza di un approccio chiaro alla trasformazione digitale, il rischio è di accumulare una stratificazione tecnologica difficile da governare e poco efficace nel lungo periodo. Le prospettive future indicano una progressiva convergenza tra piattaforme gestionali, sistemi di produzione e strumenti di simulazione avanzata. La possibilità di integrare modelli digitali con i sistemi reali promette di ridurre tempi di sviluppo, migliorare la qualità delle decisioni e aumentare la resilienza delle organizzazioni. Tuttavia, perché questo scenario si realizzi, occorre affrontare i nodi della qualità dei dati, della sicurezza informatica e della capacità delle persone di interagire con strumenti sempre più complessi. È qui che approcci design-driven e logiche di organizzazione collaborativa possono giocare un ruolo determinante, semplificando l'esperienza d'uso e favorendo la diffusione di una cultura digitale realmente condivisa (Betella et al., 2013). In sintesi, il futuro della gestione informativa industriale non può essere letto solo in chiave tecnica o infrastrutturale: è un tema di governance, di cultura organizzativa e di capacità di tradurre dati in conoscenza. Le organizzazioni capaci di superare la frammentazione, adottando strumenti integrati e facili da utilizzare, risultano in definitiva più pronte ad affrontare un mercato sempre più competitivo e interconnesso, in cui la rapidità di accesso e la qualità delle informazioni rappresentano un vantaggio strategico irrinunciabile.

3.4 Una soluzione intermedia

Riprendendo il lavoro di mappatura svolto, è emerso come il processo di realizzazione della documentazione tecnica sia estremamente articolato, complesso e poco lineare, comportando ad un aumento del rischio di errori e soprattutto una tendenza al ritardo, causata dall'insieme dei processi, che spesso risulta critica nei confronti dei clienti. Approfondendo e analizzando i processi attuali, è possibile comprendere come la causa fondante sia che i prodotti, teoricamente concepiti e progettati come standard, in realtà presentano un livello estremamente alto di personalizzazione, utile a far fronte alle necessità e alle richieste del cliente.
Nel corso del tempo, dunque, il sistema inizialmente basato sulla ripetibilità, si è evoluto implementando sempre più elementi, processi e controlli, in modo da poter far fronte

al crescente grado di variabili introdotte e alla capillarità di precisione richiesta.
Facendo un'analogia, è come se si fossero depositati sovrapponendosi, molti strati di detriti che sono andati a comporre quella che oggi potremmo definire una montagna. L'implicazione conseguente è che, come per tutti i massicci, il processo della documentazione risulti estremamente difficoltoso da muovere e innovare.
Ciò ha indotto a pensare che un buon approccio per affrontare le transizioni in questo ambito, consista nell'erosione, intendendo l'introduzione o la proposta di tante piccole migliorie che consentano, quantomeno, di mettere in discussione alcuni di quelli che oggi sono considerati dei cardini. In questo caso, a rivestire un ruolo centrale è il design, inteso come disciplina trasformativa (Flaviano Celaschi & Casoni Giorgio, 2020) non solo tesa al ridisegno della persona ma anche delle organizzazioni e delle loro transizioni, essendo partecipate, almeno in parte, da figure capaci di dialogare tra le parti, portando dinamismo e propensione alla ricerca trasversale (Irwin, 2015; Zannoni et al., 2024).

Fig. 11 Rappresentazione sintetica della metafora del design come erosione della roccia

Prima di entrare nel merito della parte più pratica e progettuale di questa ricerca, occorre raccogliere alcune notazioni e spunti precedentemente introdotti in modo da rendere più comprensibile e chiaro il contesto e il perimetro di azione delle seguenti proposte e sperimentazioni. Innanzitutto, si specifica che i flussi attuali derivano da sviluppi atti a rispondere a differenti esigenze, prima fra le quali la necessità di aderire e assecondare l'obbligo di legge della Direttiva Macchine 2006/42/CE in base alla quale occorra fornire insieme alle macchine una copia cartacea della documentazione (Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea, 2006), questo aspetto comporta da un lato l'essere di molti vincoli, sia spaziali che strutturali del documento, dall'altra un eccessivo utilizzo e consumo di carta.
In secondo luogo, per motivi di comodità di gestione dei processi interni di produzione, la documentazione è segmentata e composta da molteplici fascicoli provenienti da organizzazioni o reparti differenti. In questo modo, si obbliga gli utilizzatori a navigare tra una fonte e l'altra, causando entropia, e mettendo in risalto il terzo aspetto, tra i più centrali, che risiede nella frammentazione delle informazioni; infatti, ad oggi i dati hanno varie collocazioni, sia come database e programmi di utilizzo, sia nelle competenze estremamente verticali di chi li controlla e li descrive.

Entrando invece nel merito dell'inquadramento della proposta di trasformazione, il primo aspetto da considerare è l'introduzione del Regolamento (UE) 2023/1230 (Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea, 2023), che entrerà in vigore nel 2027 portando in dote la possibilità di dematerializzare sensibilmente i processi e gli esiti della documentazione tecnica, estendendo l'ammissibilità di strumenti e nuove modalità di creazione di contenuti, sia essi testuali sia interattivi che tridimensionali. Si configura, quindi, uno scenario nel quale i dati e i metadati rappresentano il valore più grande dell'organizzazione, per tanto da custodire, sviluppare e condividere al fine di consolidare una conoscenza diffusa necessaria al miglioramento dei processi e delle azioni decisionali, ma che, al tempo stesso, supportino la facilitazione e fluidificazione dei flussi realizzativi.

DIRETTIVA MACCHINE 2006/42/CE ➤ **REGOLAMENTO MACCHINE (UE) 2023/1230**

« Per garantire la **salute e la sicurezza degli utenti** dei prodotti tutti gli operatori economici che intervengono nella catena di fornitura e distribuzione dei prodotti devono **assicurare** che tutta la **documentazione rilevante**, come le istruzioni per l'uso, tenga conto degli **sviluppi tecnologici** e dei **cambiamenti** nel **comportamento** degli utenti e sia la più possibile **aggiornata**.

Le istruzioni si devono poter stampare e scaricare. Quindi le istruzioni potrebbero essere fornite in un formato digitale stampabile così su richiesta lo possiamo inviare al cliente stampato.

Quando le istruzioni per l'uso sono fornite in formato digitale, il fabbricante deve renderle **accessibili online** per tutta la durata di vita prevista della macchina o del prodotto connesso e per **almeno 10 anni** dall'**immissione** sul **mercato** della macchina o del prodotto connesso. »

Fig. 12 Stralci dei punti più significativi della trasformazione regolamentare

Per rendere applicabile e soprattutto fattibile questo modello, sono necessari due fattori, i dati, che nel caso dell'organizzazione studiata non mancano, disponendo di ingenti volumi di modelli CAD dei macchinari e degli impianti e di un sistema organizzato per la strutturazione e resa interoperabile di tale patrimonio. In questo senso, sistemi come il PLM si presentano come efficaci risorse, coadiuvando in un'unica soluzione sia database informativi, sia repository gerarchizzati per i modelli.

Attualmente, nonostante internamente all'organizzazione si disponga di una piattaforma di questo tipo, per una serie di difficoltà legate alle criticità precedentemente descritte, non è possibile massimizzarne l'utilizzo, inficiando negativamente sugli sviluppi interni.
A questo proposito, il lavoro è stato direzionato alla ricerca e alla sperimentazione di nuove modalità di produzione che coinvolgano strumenti capaci di introdurre una dinamica di modularità all'interno della redazione, questi strumenti prendono il nome di Component Management System (CMS) (Alalwan & Weistroffer, 2012).

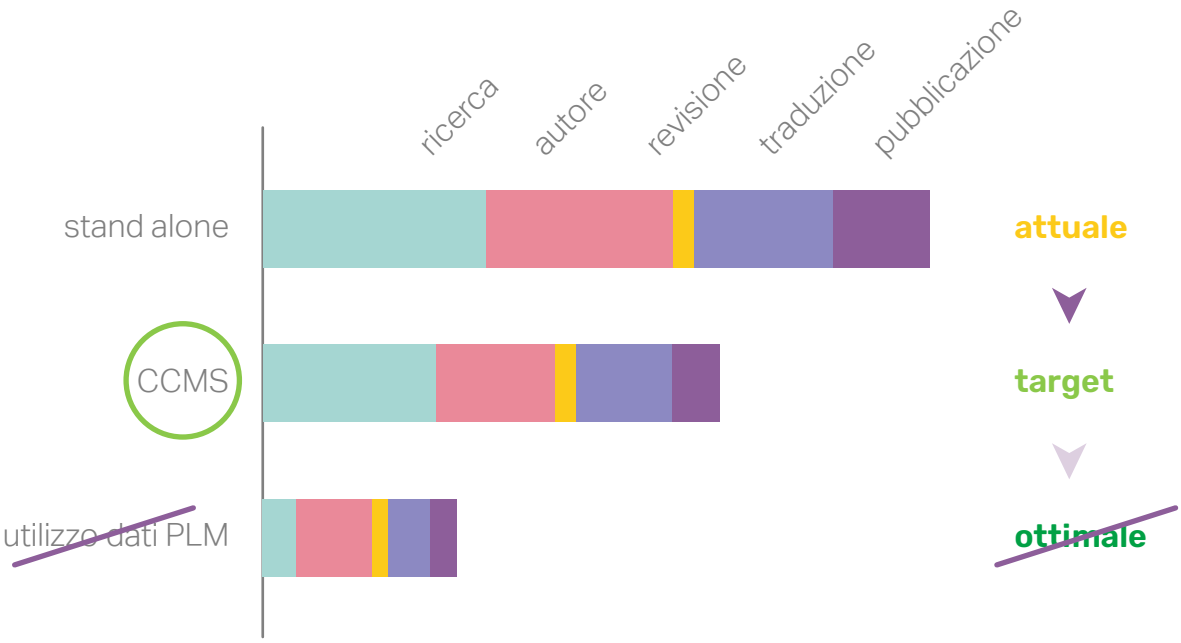


Fig. 13 Rappresentazione delle tempistiche necessarie alla produzione documentale al variare del sistema utilizzato

Oggi l'azienda SACMI sta già sviluppando un lavoro in questa direzione utilizzando il software EKR Orchestra (EKR Orchestra - The correct info, everywhere, s.d.), ma la sua articolata e complessa implementazione, associata alla difficoltà di assimilazione, ha fatto sì che questo progetto si orientasse all'esplorazione di altre soluzioni quali Cadasio (Cadasio, s.d.), Cortona 3d (Cortona3D, s.d.) Autodesk Forge (Autodesk Forge Viewer, s.d.) e Smart Media Creator (Smart Media Creator - WRITEC, s.d.). In particolare, si riporta l'approfondimento svolto riguardo l'ultimo strumento, ritenuto di particolare interesse, in quanto racchiude al suo interno differenti principi che consentono di gestire da un'unica piattaforma molteplici aspetti.

In virtù di tali presupposti, è stato elaborato un Proof of Concept di quello che è stato definito come "Portale Unico". Nella fattispecie, si tratta di una pagina web in linguaggio HTML che condensa tutti i materiali utili a descrivere una macchina, in un ambiente completo che incorpora sia le indicazioni e le procedure testuali interconnesse e interagibili, sia gli allegati esterni. In particolare, tra gli aspetti di rilievo sono da notare la strutturabilità dei dati, consentendo quindi la catalogazione e l'etichettatura dei contenuti inseriti, al fine di renderli riutilizzabili all'interno di più versioni e varianti di prodotto (Ebbers et al., 2022).

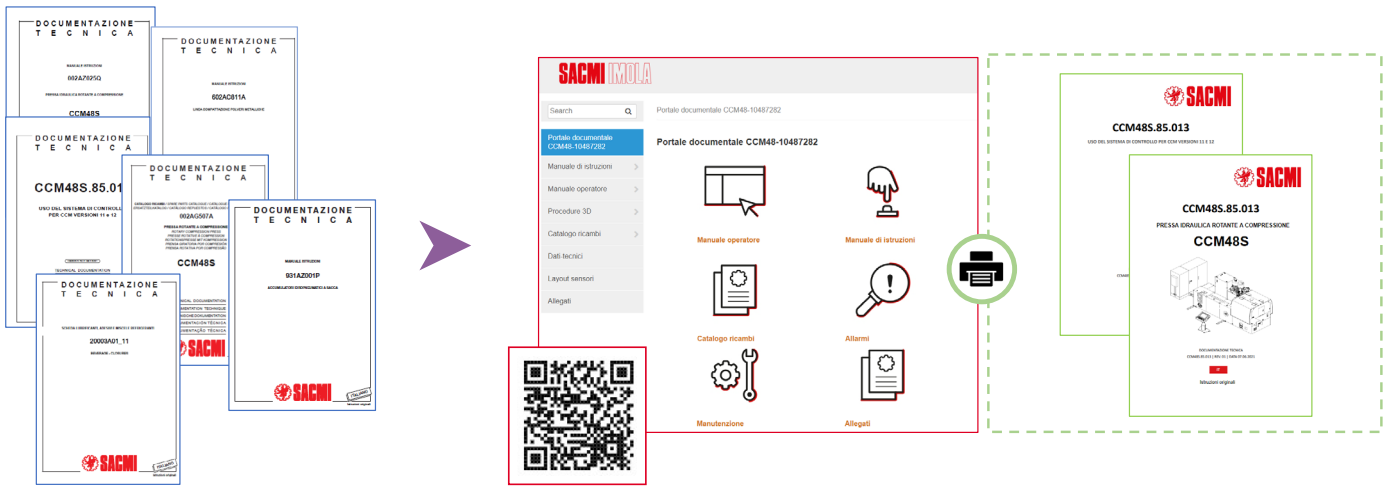


Fig. 14 Evoluzione della proposta attraverso la realizzazione del Proof of Concept del Portale Unico

L'ecosistema in questione, dunque, consente di ipotizzare e sviluppare architetture per la trasmissione delle informazioni e per i processi di creazione della documentazione alternative (Ngonga Ngomo et al., 2011). Come rappresentato in figura (Fig. 15), l'innovazione proposta verte sul cambio di concezione del compito della documentazione tecnica, non più come sviluppo editoriale a valle di attività orientate alla facilitazione della produzione, bensì come servizio di comunicazione fondato e reso funzionale dalla centralità del dato nella struttura informativa (Barthelmey et al., 2016). La possibilità di scrivere ricevendo un supporto al linguaggio, risulta estremamente importante nell'ottica di ridurre al minimo il numero delle parole utilizzate e di armonizzazione della terminologia, altrimenti critica in contesti multi-operato (Rascu, 2006). Le traduzioni rivestono un altro elemento chiave, escludendo l'apposito tool oppure, in alternativa, l'eventuale gestione esterna, ciò che è interessante è la possibilità di sovraimprimere sui video dei testi automaticamente aggiornabili al variare della lingua, senza dover ricorrere ad una post-produzione video per ognuna.

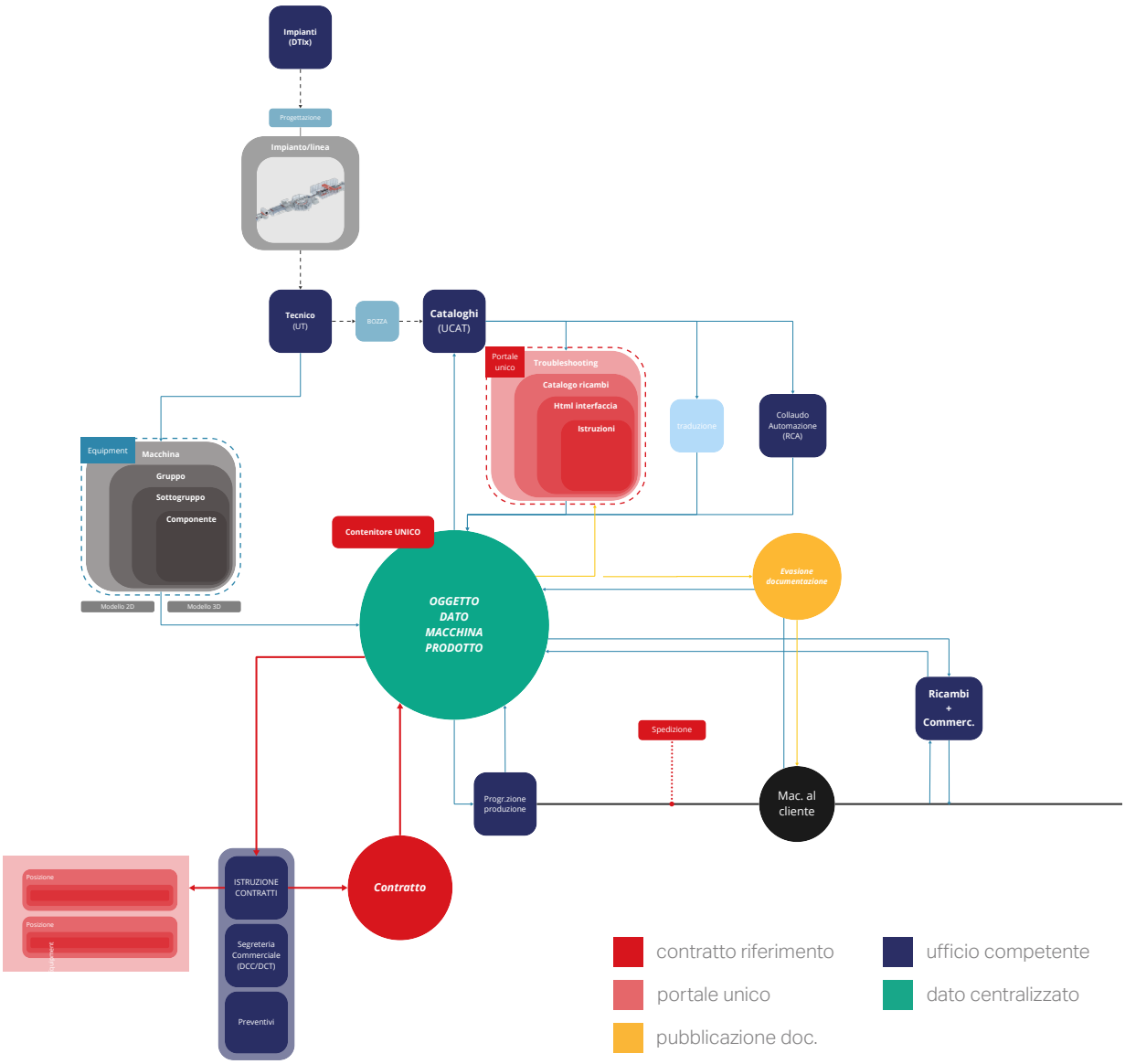


Fig. 15 Flusso di lavoro centralizzato proposto tramite l'adozione del CMS per oltrepassare la frammentazione delle informazioni

L'evoluzione presentata, dal punto di vista progettuale, risulta significativa per quattro principali motivi:

_il ribaltamento del punto di vista che consente, a partire da un'attività a valle di un processo, il ridisegno, secondo logica bottom-up, di tutta la filiera che la precede;

_la transizione ad un nuovo approccio che mira al prodotto della documentazione non più solo come esito finale di un'attività operativa, ma come touchpoint, sia esso digitale che fisico, di un servizio esteso, in grado di veicolare maggiore valore, sia verso l'interno dell'organizzazione grazie al prezioso ruolo di aggregante e collante, sia verso l'esterno adottando e applicando una crescente attenzione rivolta agli utenti B2B finali, impattando in modo positivo sulla comprensibilità e utilizzabilità degli elaborato comunicativi (Sangiorgi, 2011);

_trasformare la figura del redattore in comunicatore tecnico, privilegiando la funzione di mediazione tra i numerosi enti coinvolti nel processo e una sua specializzazione verticale sulla scrittura e competenza progettuale, utili a rendere tali processi svincolati dall'ufficio tecnico, in modo da velocizzare in generale il flusso e alleggerire il carico di lavoro di quest'ultimo ente, in modo che possa concentrarsi sulla sua primaria funzione di progettazione;

_il sistema è predisposto ad accogliere differenti tipologie di contenuto, offrendo la possibilità di spaziare tra svariate soluzioni di metodo, linguaggio e stile comunicativo.

Fino ad ora è stato possibile notare come le tecnologie immersive dispongano di interessanti potenzialità, che non possono essere sfruttate se non si dispone dei dati necessari, sia in termini di informazioni sulle interazioni, sia di modelli da utilizzare negli ambienti virtuali. In secondo luogo, che nei contesti produttivi e industriali, la disponibilità di questi dati comporta notevoli criticità dal punto di vista comunicativo e infrastrutturale, pertanto, senza la messa a punto di un ecosistema informativo coerente, tutti gli sforzi successivi orientati alla produzione di contenuti immersivi rischia di risultare vana, in quanto carenti di contenuti significativi da trasferire, rendendoli meri esercizi di stile oppure affascinanti strumenti di marketing.

Proprio per questo motivo, il lavoro appena presentato, sebbene possa risultare esterno e di contorno al fuoco della ricerca, è invece fondamentale, avendo consentito di individuare uno strumento che grazie alla possibilità di includere immagini, video, cataloghi e animazioni tridimensionali, fa sì che il portale prototipato possa fungere anche come piattaforma di supporto per esperienze di Virtual Learning e di Virtual Training, rappresentando dunque un primo punto di partenza attraverso il quale poter rendere eventualmente operativi al termine del progetto gli esiti delle sperimentazioni sviluppate e descritte nei seguenti capitoli.

4. Messa in scena
Living demos

Tra gli insight emergenti dalla fase di analisi dei flussi dello stato attuale emergeva la criticità diffusa legata alla difficoltà di comunicazione (Gamil & Rahman, 2017). Questo fenomeno, o per meglio dire la sua discontinuità, rappresenta una difficoltà in qualunque ambito e può presentarsi a differenti livelli. Concentrandosi sul campo organizzativo e sistemico, le discrepanze in tale senso possono verificarsi su tre livelli, il primo è tra le persone, in questo caso si tratta del meno impattante, ma più frequente. Il secondo consiste nella mancanza di dialogo o per meglio dire della sua interruzione a livello di organigramma, risultando fra i più critici, ma anche meno usuale poiché raramente deriva da errori, quanto piuttosto dalla volontà di una delle parti a cessare la collaborazione. Il terzo riguarda, invece, gli enti, facendo riferimento quindi all'assenza di allineamento tra uno o più gruppi di persone. Quest'ultima dinamica, si configura come intermedia tra la prima e la seconda descritte, sia in termini di impatti sia in termini di frequenza, tuttavia, trattandosi di quella più ricorrente durante lo svolgimento della ricerca, si è deciso di fissarla come riferimento.

Durante l'evoluzione del progetto, si è quindi cercato di elaborare o sfruttare un modello esistente, all'interno del quale condurre il proseguo del lavoro. Per questo motivo sono state prese in considerazione le attività eseguite e descritte nel contesto della documentazione tecnica, per poi distribuirne le caratteristiche positive e negative secondo la chiave di lettura del supporto utilizzato per la loro esecuzione e da cui deriva lo schema di sintesi in figura 16.

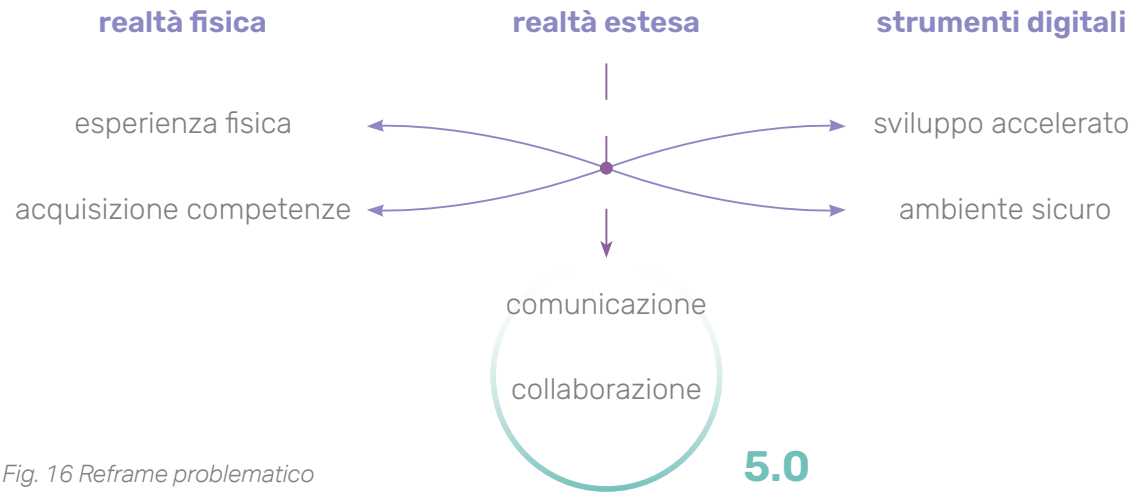


Fig. 16 Reframe problematico

Pertanto, se da un lato il mondo fisico contribuisce a valorizzare l'acquisizione dell'esperienza e delle capacità, fungendo da agente aggregante, gli strumenti digitali supportano invece una dimensione di accelerazione. Lo spazio grigio mediano, dunque, si ipotizza configurarsi come uno stato di cambiamento e di passaggio che, veicolato dalla modalità descritta dalla realtà estesa, se associato in direzione di comunicazione e collaborazione, può offrire interessanti esiti di utilizzo applicativo consapevole.

Questa visione procura una coerente collocazione di questo progetto di ricerca nei riguardi del processo più esteso di digitalizzazione in atto, armonizzandolo al concetto di 5.0 in quanto la tecnologia così interpretata si posiziona a supporto dell'uomo e dei suoi processi relazionali semplificandone il lavoro e rendendolo, almeno dal punto di vista sociale sostenibile (Xu et al., 2021).

4.1 Metodi e sperimentazioni

Il tema della comunicazione, nel corso della ricerca era già stato introdotto, seppur marginalmente attraverso una piccola sperimentazione sui linguaggi condotta grazie ad un esperto di animazioni. Pertanto, si è optato per dare seguito alla sperimentazione creando altri brevi filmati che in modo meno istituzionalizzato mostrassero in modo chiaro e leggero le dinamiche importanti rilevate nel corso della ricerca sul campo (Du, 2021). Il risultato è la produzione di quattro cortometraggi animati pensati come una breve serie. Il primo capitolo, coinvolge prevalentemente il parallelismo tra il processo di documentazione attuale e il processo alternativo; il secondo, approfondisce il concetto della modularità nel campo della documentazione tecnica; il terzo tratta della shelf innovation e dell'importanza dell'anticipazione; infine l'ultimo introduce l'aspetto della trasversalità e della necessità di figure capaci di mediare tra modalità differenti per far sì che i lavori emergenti acquistino valore.
Il lavoro svolto in prima persona nell'individuazione dei messaggi, obiettivi della comunicazione, la collaborazione alla definizione di una metafora che ne semplificasse la comprensione e la realizzazione della sceneggiatura, ha posto l'accento sulla necessità di riflettere ed esplorare il tema della comunicazione, intesa come di passaggio di esperienza e conoscenze tra un individuo e l'altro, che analizzando a posteriori, è risultate essere il tema ricorrente di tali contenuti.

Fig. 17 Frame estratti dai quattro cortometraggi intitolati: "Un giorno in documentazione"; "Un pezzo per volta"; "L'innovazione fatta a fette"; "Un grande passo per l'innovazione".

La ricerca si è quindi spostata nuovamente in letteratura, conducendo alla scoperta di interessanti teorie e modelli, provenienti principalmente dalla sfera gestionale, riguardanti lo studio della creazione e del trasferimento della conoscenza nelle organizzazioni. Tra questi, uno dei più noti è il Knowledge Conversion Model, basato sul concetto di I-Space (Information Space), che propone una classificazione della conoscenza in base a tre dimensioni: codificabilità, astrazione e diffusione (Boisot, 1998).
Questo modello è particolarmente utile per analizzare il trasferimento della conoscenza tra organizzazioni, evidenziando come la conoscenza passi da forme personali e tacite a forme codificate e pubblicamente accessibili. Inoltre, in contesti digitali e agili, ha acquisito rilievo il Dynamic Capabilities Framework, che interpreta il trasferimento di conoscenza come parte di un processo più ampio di adattamento strategico, dove apprendere, integrare e riconfigurare risorse cognitive diventa cruciale per la resilienza organizzativa (Teece, 2007).

In ambito informatico e ingegneristico, invece, il Knowledge Engineering Approach, che adotta metodi formali (ontologie, basi di conoscenza, linguaggi semantici) per modellare, rappresentare e trasferire la conoscenza all'interno di sistemi complessi, rendendola interpretabile alle macchine (Kasabov, 2007). Un altro approccio rilevante è il Ba Model, introdotto da Nonaka e Konno (1998) , che enfatizza il ruolo dello spazio condiviso come ambiente abilitante per la creazione di conoscenza, evolvendo il modello SECI già teorizzato precedentemente insieme al professor Takeuchi (1996).

Proprio l'incidenza con la sintesi sopracitata, acronimo di Socializzazione Esternalizzazione Combinazione Internalizzazione, che descrive la dinamica di spostamento e diffusione della conoscenza all'interno di organizzazioni estese è risultato particolarmente fruttuoso poiché, senza entrare nel merito della scienza organizzativa, ha consentito di identificare nelle quattro aree descritte dal modello e riportate in figura 18 una catalogazione chiara sulla quale fondare l'approfondimento dell'indagine attraverso la pratica.

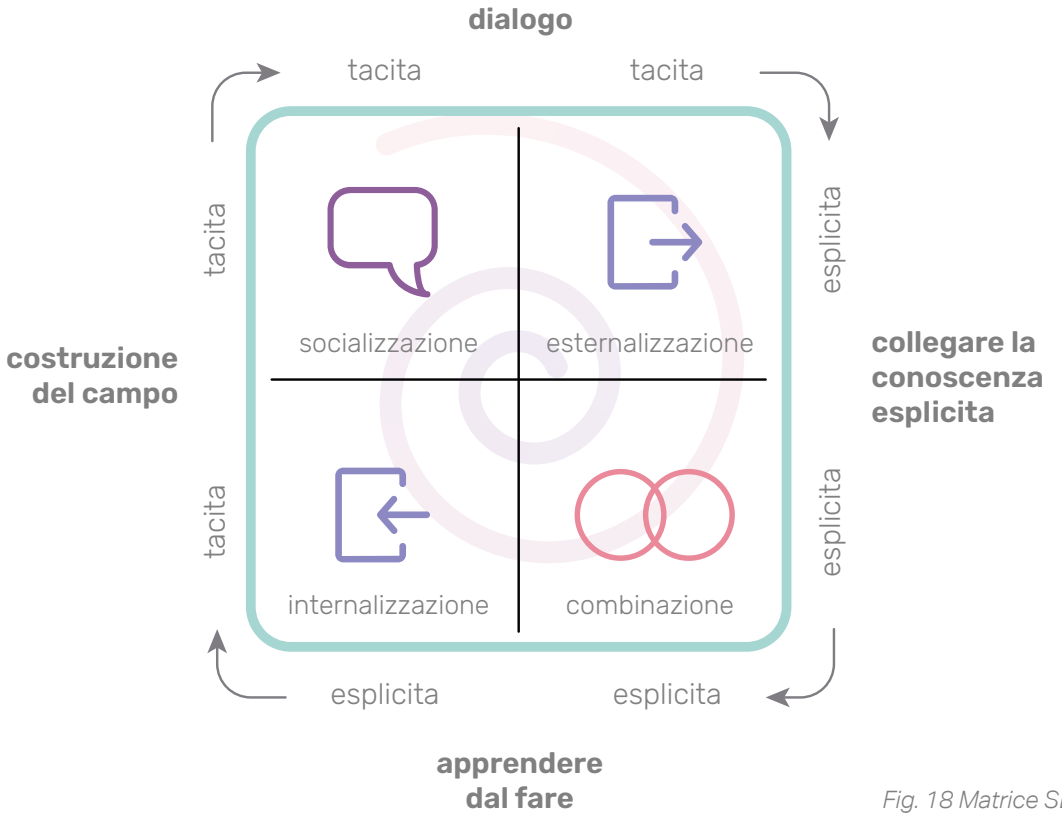


Fig. 18 Matrice SECI

Il modello è autoesplicativo, tuttavia rappresenta una forma autorevole ed estremamente efficace di una dinamica basilare, da cui è necessario passare e confrontarsi se ci si pone la domanda di come, eventualmente, le tecnologie digitali possano facilitare i processi di trasferimento. La matrice in questione può essere visualizzata come la sovrapposizione di tre strati più semplici, il più immediato è quello dell'azione che intercorre tra le persone, che determina la fase o il luogo in cui la conoscenza si trova. Il secondo identifica lo stato della conoscenza, mentre il terzo, il più astratto, sintetizza il processo che consente il movimento e il cambio di stato del sapere, che lungo un percorso continuo a spirale può espandersi passando da individuale a sapere collettivo (Yasseri et al., 2022).

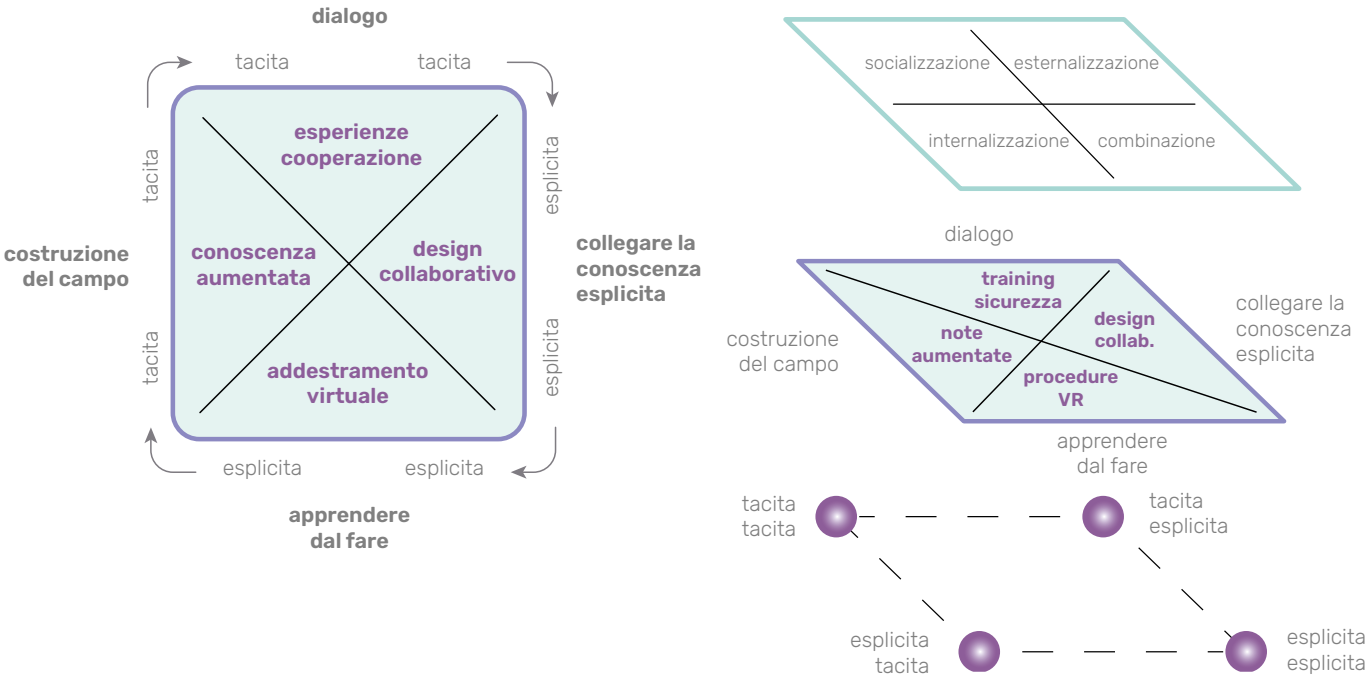


Fig. 19 Framework teorico per le sperimentazioni

Prendendo ad esempio il modello introdotto, ci si è interrogati su come in un primo momento le tecnologie e, in un secondo momento, le tecnologie digitali potessero essere implementate nella sintesi. Metodologicamente parlando, si è operato ipotizzando l'inserimento di un ulteriore strato di significato dedicato all'implementazione della realtà estesa, il cui risultato ha suggerito l'identificazione della sovrapponibilità delle procedure di virtual training e learning, oggetto della ricerca, alla fase indentificata con "learning by doing". Tuttavia, il processo appena descritto non rispondeva, se non parzialmente, alla domanda di ricerca. Pertanto, l'ipotesi è stata sviluppata articolando altre tipologie di esperienze aumentate che potessero essere significative nella semplificazione del corrispettivo passaggio da svolgere. Sono così venuti a formarsi quattro possibili scenari, sui quali si è cercato di direzionare altrettante sperimentazioni a cui è stato possibile partecipare e osservare da vicino in ambiente reale dinamiche e spunti interessanti riguardo l'utilizzo delle tecnologie immersive in un campo estremamente specifico.
Innanzitutto, l'obiettivo primario è comprendere se effettivamente sia possibile sfruttare le tecnologie digitali e in particolare la realtà estesa entro i perimetri identificati. In secondo luogo, testare se le esperienze derivanti producano impatti significativi al punto di renderli misurabili e valutabili. Terzo ed ultimo aspetto, raccogliere principi e individuare i margini con cui circoscrivere e dove poter contestualizzare la sperimentazione finale.
Addentrandosi nella distribuzione dei progetti, partendo dalla prima fase necessaria al processo di trasferimento, per poi proseguire in ordine logico-cronologico, si trova la creazione delle aree di interesse, momento nel quale l'esperienza intrinseca attraversa un processo di selezione e sintesi delle informazioni che poi verranno trasmesse.

In linea con questa prima casistica, il progetto Proxima, offre una possibile dinamica di estrazione del sapere mediante la creazione e seguente condivisione di note ipoteticamente fruibili come guida in realtà aumentata. Il secondo ambito riguarda il dialogo, ponendosi al confine tra le fasi di socializzazione ed esternalizzazione; in questo caso, quindi, la sperimentazione in corso riguarda un'esperienza di collaborazione legata alla sicurezza, nel quale un gruppo di utenti deve guidare nei movimenti e nelle scelte un rappresentante che esegue l'esperienza virtuale. La fase seguente di collegamento della conoscenza esplicita è uno dei più complessi, derivandone così uno dei progetti più articolati, il cui focus consiste nella progettazione di un ambiente virtuale per la progettazione collaborativa in remoto per l'ambito tessile. Infine, per la fase "learning by doing" si è optato per creazione e l'analisi di esperienze di simulazione virtuale di alcune procedure di montaggio standard.

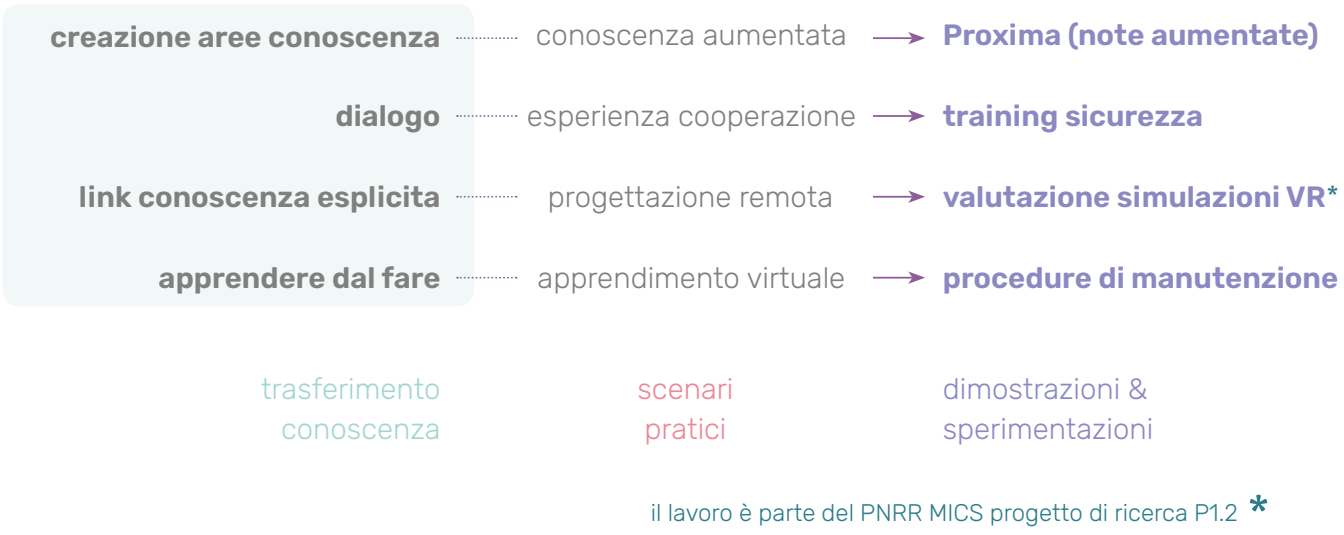


Fig. 20 Schema riferito alla relazione tra SECI, scenari ipotizzati e relative sperimentazioni effettuate

Con l'obiettivo di raccogliere quante più informazioni e suggerimenti possibili riguardo la comprensibilità, l'usabilità e l'efficacia dei prodotti studiati, capitalizzando al massimo la possibilità di seguire i quattro scenari definiti in modo molto specifico, ma altrettanto vari al fine di creare una panoramica che fosse la più ampia possibile. I progetti, sviluppati in parallelo da gruppi di ricerca differenti, svolti spesso anche grazie a collaborazioni con enti esterni, hanno permesso di cogliere e approfondire i punti di forza e debolezza nell'utilizzo delle tecnologie immersive in contesti di apprendimento mediato da ambienti ed esperienze virtuali. Di seguito si riportano gli esiti dei singoli progetti, ai quali seguirà un focus su quanto emerso e alcune considerazioni di riepilogo.

4.2 Progetto Proxima

La prima demo descritta affronta il tema della creazione delle aree di conoscenza, ambendo a saggiare come tecnologie immersive possano inserirsi e fungere da facilitatrici nelle dinamiche relazionali di scambio e di socializzazione al fine di estrarre il sapere dagli individui che lo detengono. Il progetto in questione, dunque, nasce con l'intenzione di accompagnare i processi di insegnamento tra tutor e apprendisti, cercando di rendere più efficaci le fasi di trasferimento grazie ad un sistema abbastanza articolato che consenta di navigare la macchina o la linea soggetta ad istruzione, tramite l'aumento con nozioni e note che possono essere fruite in momenti e ambienti a realtà differenti, applicando la ricerca e la sperimentazione tipici del design industriale nel contesto dei sistemi robotici.

In questo modo ha tratto spunto il progetto "Proximity Machinery through Distributed Augmented Reality HMI: Layers for Empowering Industrial operators in Low Resources Scenarios" (PROXIMA), nato in risposta alla call XR2LEARN derivata dal progetto Horizon "Leveraging the European XR industry technologies to empower immersive learning and training". Da una prima analisi, infatti è emerso come i sentimenti, le convinzioni e le attitudini degli individui influenzino la motivazione, l'autoregolamentazione e le prestazioni generali di apprendimento. Pertanto, PROXIMA propone una traslazione dei fattori psicologici verso il centro dei processi di apprendimento mediante un kit di formazione che supporti il training on the job e site specific attraverso tecnologie, metodi e materiali pensati per i formatori che operano nel contesto industriale (Pollini et al., 2024). Per chiarire il contesto dal quale questa ricerca muove occorre volgere momentaneamente indietro lo sguardo poiché, in accordo con quanto già riportato nello stato dell'arte, la progressiva digitalizzazione dei processi produttivi ha determinato una contestuale crescente attenzione verso l'integrazione di sistemi di supporto basati su tecnologie immersive e interfacce distribuite.

In ambito industriale, la cosiddetta Human-Line Interaction (HLI) rappresenta oggi una delle aree di maggiore criticità, dal momento che la complessità crescente delle linee e il livello di automazione avanzata riducono la capacità dell'operatore di mantenere un'adeguata consapevolezza situazionale (Endsley, 2018; Onnasch & Hösterey, 2019). Tale fenomeno, già osservato in contesti ad alta sicurezza come l'aviazione e l'automotive, si ripropone con forza anche nei settori manifatturieri, dove l'operatore deve interagire con macchine dotate di comportamenti parzialmente autonomi, con interdipendenze poco visibili e con interfacce non sempre capaci di restituire un quadro coerente e integrato del funzionamento della linea. In questi termini le tecnologie XR, ed in particolare la realtà aumentata, hanno incontrato un crescente interesse da parte della ricerca e dell'industria europea in quanto tali soluzioni sono considerate tra le più promettenti in ambito industriale per applicazioni che vanno dalla manutenzione all'assemblaggio, dal controllo qualità alla formazione (Bologna et al., 2020; Caballini et al., 2023; Pierdicca et al., 2017).

Proprio quest'ultimo tema costituisce un dominio applicativo particolarmente rilevante siccome diversi studi hanno dimostrato che la formazione in XR, basata su approcci learning-by-doing e su simulazioni realistiche, non solo riduce i tempi di apprendimento ma consente anche una maggiore trasferibilità delle competenze, supportando sia i neoassunti che gli operatori esperti nel costante aggiornamento richiesto dalle tecnologie emergenti (Grandi et al., 2023). Inoltre la possibilità di personalizzare i contenuti formativi e di adattarli alle specifiche caratteristiche cognitive e attitudinali degli operatori permette di affrontare in maniera innovativa le sfide legate all'elevato turnover, alla scarsità di risorse umane qualificate e alla necessità di garantire la resilienza delle linee produttive. Nel contesto specifico delle PMI europee permane, però, una significativa difficoltà ad accedere a tali tecnologie a causa dei vincoli infrastrutturali, culturali e organizzativi trattati nel capitolo precedente. Altre ricerche recenti indicano infatti la necessità di sviluppare soluzioni a basso consumo di risorse capaci di adattarsi a contesti produttivi con disponibilità limitate di spazi, di tempo e di strutture (Xu et al., 2021). Il progetto Proxima si colloca esattamente in questo panorama con l'intento di avanzare una piattaforma AR distribuita, sostenibile e replicabile, in grado di rispondere alle esigenze reali di prossimità e personalizzazione.

Nel lavoro svolto, il concetto di prossimità, inteso come capacità di avvicinare l'operatore alla macchina e, al contempo, di rendere la macchina "vicina" all'operatore, assume una rilevanza fondamentale e strategica all'interno del paradigma di Industria 5.0.

Tale paradigma si fonda su tre assi principali: centralità dell'uomo, sostenibilità e resilienza dei sistemi produttivi (Leng et al., 2022). In questo caso specifico, la prossimità non si esaurisce in una dimensione spaziale, ma si estende a fattori cognitivi, psicologici e coordinativi. La garanzia di prossimità è stata interpretata come fornire all'operatore gli strumenti per comprendere i processi, riconoscerne i punti critici, prendere decisioni consapevoli e sviluppare fiducia nell'interazione con macchine autonome e semi-autonome. Nella pratica il tema emerge con forza in contesti di produzione caratterizzati da linee complesse e distribuite dove un singolo operatore può essere chiamato a supervisionare decine di macchine, disposte lungo centinaia di metri, senza la possibilità di avere un controllo immediato e diretto di ciascun passaggio. L'assenza di prossimità comporta perdita di consapevolezza situazionale, aumento dello stress, rischio di errori e riduzione della resilienza operativa. Per contro, un sistema capace di "avvicinare" informazioni e processi all'operatore, in modo contestuale e personalizzato, permette di ridurre il carico cognitivo e di supportare decisioni rapide e affidabili (Pollini et al., 2025).

Ritornando al tema primario della formazione, la logica della prossimità consente anche di superare i limiti dei modelli tradizionali basati su manuali cartacei, video descrittivi e affiancamenti individuali, che non solo risultano poco aggiornabili, ma faticano a rispecchiare le condizioni reali di lavoro. Un approccio distribuito, che sfrutti layer aumentati di interfaccia, permette invece di collocare la formazione "sul posto" e "nel momento" esatti, accompagnando l'operatore direttamente lungo la linea.
Ciò implica trasferire conoscenze tacite in modo situato, favorire l'apprendimento per esperienza e, soprattutto, garantire che la formazione non sia percepita come un'attività separata, bensì come parte integrante del lavoro.
Esaminando, invece, gli aspetti più pratici, il progetto ha visto la collaborazione di tre partner principali: BSD, responsabile del coordinamento e del design delle interfacce, l'Università di Bologna (Dipartimento di Architettura e Dipartimento di Ingegneria Industriale), impegnata nello sviluppo degli scenari educativi e nella validazione scientifica e Protesa, società del gruppo SACMI, che ha messo a disposizione competenze tecniche per la prototipazione e i test sul campo. Per quanto riguarda questa ricerca, il contributo si colloca prevalentemente nella fase iniziale del progetto, dove il lavoro di mappatura ha contribuito ad arricchire il panorama di insight derivati dalla prima fase di intervista e sulla base dei quali il concept è stato evoluto. Al contrario, avendo potuto partecipare come osservatore fantasma alla sessione dimostrativa sul campo, ciò che questo contributo deve al progetto è la validazione di alcune dinamiche di interazione che hanno suggerito quali elementi risultino repulsivi e quali propizi all'adozione di un simile sistema, le cui elaborazioni troveranno maggior spazio nella successiva terza macro-sezione.
L'esito dello sviluppo si sostanzia in un kit formativo in realtà estesa, denominato Extendit, concepito come sistema distribuito che permette di estendere l'esperienza di formatori e apprendisti attraverso più livelli di realtà, integrando applicazioni distinte in grado di rispondere a esigenze, obiettivi ed aspettative differenziate. L'articolazione del kit si fonda sulla possibilità di transitare in maniera fluida dal contesto operativo alla realtà aumentata, dalla realtà aumentata alla realtà virtuale e di nuovo alla realtà fisica, fino a un ambiente digitale che si configura come spazio di lavoro condiviso.
Questa continuità di passaggi tra domini diversi consente di attivare un'esperienza formativa immersiva, completa e coerente, in cui il movimento tra le realtà diventa esso stesso veicolo di apprendimento, favorendo la sedimentazione della conoscenza, la riflessione personale e collettiva e la progressiva costruzione di competenze.
Elemento distintivo dell'approccio proposto è il ruolo assegnato alla prossimità, intesa non soltanto come vicinanza spaziale tra l'operatore e la macchina, ma come principio di progettazione capace di attivare connessioni dirette, intuitive e situate tra i contenuti formativi e gli strumenti tecnologici.

Lo scenario educativo avviato con Extendit prevede, che i formatori predispongano i macchinari e gli impianti sui quali verranno effettuati i corsi e lascino note ufficiali e situate attraverso la app a loro dedicata. Agli apprendisti è invece offerto un sistema avanzato di annotazione attraverso il quale possono registrare osservazioni e spunti sotto forma di testo, fotografie o video, e collegarli a punti di interesse fisici sulla macchina contrassegnati da indicatori visivi ad integrazione di quelli già proposti dal formatore.
Questo legame tra informazione e oggetto di apprendimento rafforza l'esperienza pratica, rendendo la formazione più aderente al contesto operativo e, al tempo stesso, più significativa dal punto di vista cognitivo. Al termine della sessione l'apprendista ha la possibilità di rielaborare individualmente quanto appreso accedendo sia ai contenuti formali sia alle note personali all'interno di ambienti di realtà virtuale facilmente accessibili anche in scenari a risorse ridotte. In tale spazio immersivo egli può muoversi liberamente attorno alla macchina, rivisitare le informazioni raccolte, ora situate nell'ambiente virtuale e ancorate allo stesso contesto spaziale in cui sono state create durante la formazione, arricchirle con nuove osservazioni o condividerle con altri, rafforzando così il carattere riflessivo e collaborativo del processo. Nel momento in cui si trova poi ad operare in autonomia sulla macchina reale, l'apprendista può ricorrere a strumenti di realtà aumentata, come l'applicazione su tablet industriale, per accedere in tempo reale alle proprie annotazioni multimodali, garantendo così la continuità tra la dimensione formativa e quella operativa.
Infine, qualora emergano dubbi o difficoltà, l'operatore ha la possibilità di attivare un canale di supporto attraverso la realtà estesa, contattando formatori, colleghi esperti o personale tecnico e ricevendo suggerimenti, correzioni e soluzioni tramite scambio video e documentazione dei problemi in XR. In questo modo, il sistema, non solo rafforza la dimensione individuale dell'apprendimento, ma alimenta la circolazione di conoscenze tacite e pratiche virtuose all'interno della comunità industriale, contribuendo a consolidare competenze condivise sull'automazione delle macchine e a supportare processi di problem solving collaborativo.

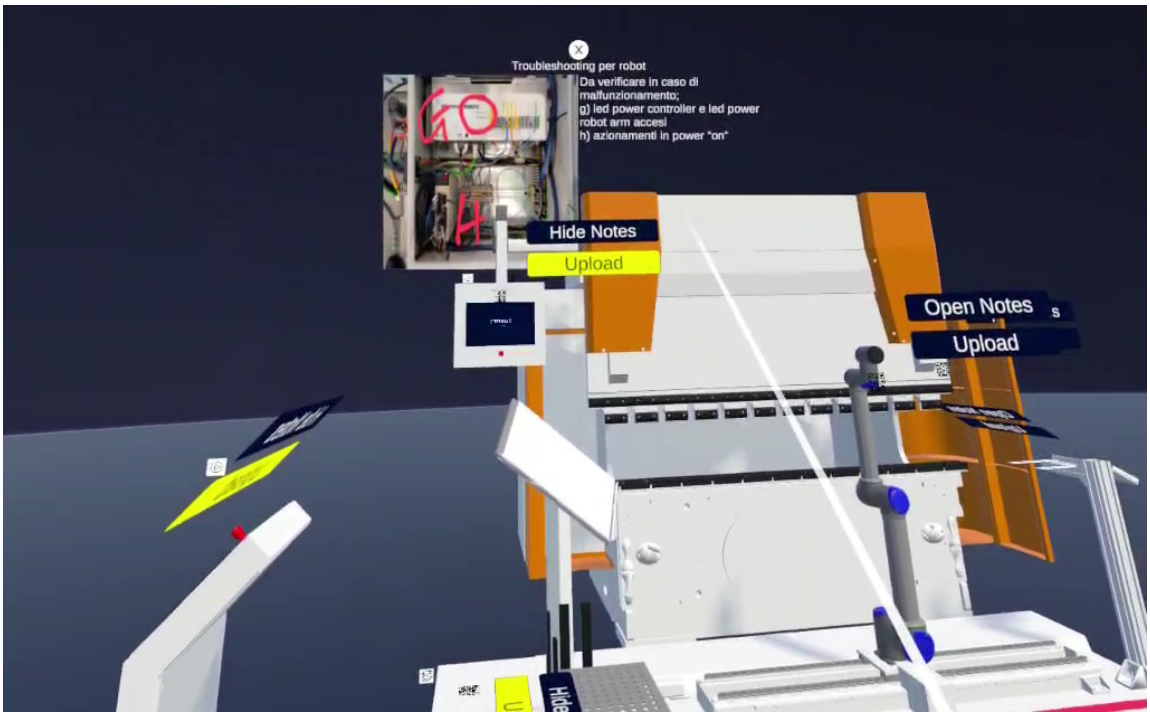


Fig. 21 Vista in soggettiva dall'applicativo in realtà virtuale, nel quale è possibile consultare annotazioni riguardo il cablaggio elettrico come rappresentato in questo caso.

La natura distribuita del sistema consente di adottare diversi dispositivi, dallo smartphone e dai tablet industriali agli smart glasses, garantendo flessibilità di utilizzo e adattabilità a contesti a basso consumo di risorse (Minocha et al., 2017). Ne risulta un sistema strutturato come ecosistema di strumenti interattivi e multilivello capace di rispondere sia alle esigenze delle grandi linee automatizzate sia a quelle delle PMI che operano in scenari con vincoli infrastrutturali e organizzativi.

Fig. 22 Frame dimostrativo dell'applicazione in realtà aumentata che mostra le note già registrate e consultabili.

La sperimentazione del sistema è stata condotta coinvolgendo RPC Piegatrici che ha fornito una propria stazione di collaborazione uomo-macchina per la piegatura avanzata delle lamiere, con l'obiettivo di testarne l'efficacia in scenari realistici e rappresentativi della complessità industriale (Materna et al., 2018). Il sistema è stato quindi inserito all'interno di un processo di formazione standard dell'azienda potendone osservare direttamente sul campo l'eventuale adozione e gli impatti generati dal suo utilizzo.

Dall'analisi di quanto è stato potuto raccogliere durante i test, diverse osservazioni sono state mosse in direzione della semplicità di fruizione in relazione alla necessità di utilizzo di specifiche periferiche che spesso non sono considerate ammissibili e indossabili sia per limiti di sicurezza sia di comfort, durante le attività; visori tipo Hololens o Vive sono stati più di una volta scartati a priori per l'utilizzo in reparto. Un altro tema caldo è quello della connettività, che sicuramente deve sempre essere tenuto in considerazione, in quanto non è possibile dare per scontata la presenza di connessioni alla rete internet o di reti sufficientemente strutturate al fine di supportare contenuti anche pesanti dal punto di vista computazionale, basti pensare alla delocalizzazione di processi manifatturieri in località in via di sviluppo o, più semplicemente, di imprese in territori isolati, rurali o di montagna in cui ad esempio occorre considerare le eventuali interruzioni causate dai guasti sulle linee di fornitura.

Fig. 23 Scatto tratto dalla dimostrazione del sistema Extendit condotta presso RPC

Infine, un altro tema da considerare è quello generazionale, infatti sono diverse le mansioni, soprattutto connesse ad alti livelli di esperienza, che vedono l'impiego di personale più maturo che non sempre ha competenze informatiche e che, anche qualora disponesse di quelle di base non avrebbe comunque sufficiente dimestichezza e controllo di sistemi più evoluti, che per quanto utili, comportano necessariamente maggiore sofisticatezza.
Sintetizzando e distillando quanto analizzato è stato possibile formulare i seguenti spunti per il proseguo della ricerca:

_il tema dell'esperienza e delle competenze personali è centrale; pertanto, per quanto non sia ancora diffusa una cultura capillare, gli sforzi in direzione formazione sono legittimati;

_risulta necessario predisporre ambienti in cui gli utenti siano invogliati a condividere le loro esperienze e competenze, ma in cui sia anche facile individuare ciò che si cerca;

_buona prassi risulta pensare a servizi a più livelli di fruizione per incontrare le differenti capacità e possibilità di utilizzo.

4.3 Training sicurezza

Per quanto concerne la sperimentazione dell'utilizzo delle tecnologie immersive per la facilitazione della fase di dialogo è stata utilizzata un'esperienza virtuale sviluppata a fronte di un'esigenza emersa internamente all'organizzazione. Il contesto di intervento riguarda i corsi sulla sicurezza e in particolar modo si concentra sull'utilizzo di una scena VR all'interno della quale un utente deve riconoscere e fotografare, tramite screenshot, le possibili fonti di rischio presenti, supportato contestualmente dai colleghi, i quali hanno la possibilità di visualizzare in tempo reale quanto esperito dall'utente grazie alla trasmissione in casting su un monitor esterno. Questa modalità è già attiva nei periodici corsi di aggiornamento, trattandosi però di un'esperienza standardizzata, gran parte dei benefici potenzialmente generati da simulazioni situate viene meno, ad esclusione del buon grado di coinvolgimento, collaborazione e sensibilizzazione degli attori a tipologie e fattori di rischio di carattere generale (Biener et al., 2023).

Con questa premessa, nasce un Proof of Concept dedicato alla personalizzazione e all'adattamento dell'esperienza a luoghi e contesti maggiormente affini a quelli caratterizzano il lavoro dell'organizzazione. La selezione dell'ambiente è dunque ricaduta su una porzione di officina dedicata all'aggiustaggio grazie alla presenza di alcune macchine utensili, tra cui un tornio orizzontale un trapano verticale e due lapidelli, capaci di rappresentare situazioni verosimili di rischio in un ambiente pressoché reale e celante possibili impatti anche gravi. In particolare è stata sviluppata una versione pilota basata sull'individuazione di tre situazioni potenzialmente pericolose da ricercare secondo la modalità descritta precedentemente e, anziché scattarne un'immagine, la richiesta è di operare modifiche tramite interazione diretta in modo tale da poterne simulare la risoluzione e la messa in sicurezza del reparto. Le tre non conformità progettate sono riportate in seguito:

_l'apertura impropria dello sportello di un quadro di controllo di un lapidello;

_la disattivazione del dispositivo di protezione a schermo di un tornio in prossimità del mandrino e quindi della zona di esportazione del materiale;

_il deterioramento dell'etichetta informativa di un liquido refrigerante.

Riguardo la fase realizzativa, la prima fase operata è stata il confronto tra i responsabili dell'esecuzione dei corsi, detentori della conoscenza da trasferire e il gruppo di realizzazione del prototipo, in possesso delle competenze e abilità tecniche per la sua costruzione, al fine di individuare lo scenario più adatto. In questo frangente, il contributo personale si è concentrato nel ruolo di mediazione tra i due gruppi di lavoro, facilitando la selezione delle casistiche critiche da testare e delle nozioni di base da considerare durante la fase esecutiva. Il secondo passo è stato collaborare alla definizione dell'architettura dell'esperienza, insieme alla 3D artist che successivamente avrebbe dovuto realizzarla.
La sequenza immaginata è articolata in prima istanza da una descrizione di introduzione alla demo, svolta in un ufficio virtuale neutro, al quale segue lo spostamento nella ricostruzione dell'ambiente reale dell'officina, dove avviene la spiegazione del funzionamento della scena e si svolge la ricerca, concludendosi, infine, nuovamente nell'ufficio dove è possibile consultare i risultati dell'esecuzione della prova ed eventualmente visualizzare la risoluzione agli errori commessi. Stabilite le scene, le interazioni da svolgere, e le informazioni da trasferire, si è potuto procedere con le attività esecutive, prima fra tutte, la creazione dei pannelli di interfaccia attraverso i quali comunicare all'utente istruzioni e suggerimenti durante lo svolgimento dell'esperienza. Per questa operazione, la possibilità di intervenire in prima linea ha consentito di sperimentare la modalità di scrittura sintetica auspicabile nella documentazione, aiutando a comprendere meglio quanto articolata sia l'attività. In contemporanea è stata realizzata l'ambientazione; l'ufficio è stato completamente modellato in quanto semplice da realizzare a fronte di una realisticità estrema non necessaria. Per quanto riguarda l'officina sono state combinate tecniche differenti; per lo sfondo è stata utilizzata un'immagine HDR a 360° realizzata durante un rilievo in loco con una Insta 360, mentre le pannellature di confine del reparto sono state modellate affinché si potesse ottenere una migliore percezione della navigabilità degli spazi e di resa delle riflessioni dell'ambiente. Infine per i macchinari si è sperimentato l'utilizzo della fotogrammetria che, in seguito ad una fase di post produzione di alleggerimento da un lato e di ri-modellazione degli elementi da animare dall'altro, si è rivelata particolarmente efficace per semplicità e velocità di realizzazione (Scianna et al., 2020), compatibilmente alla buona risoluzione dimostrata, rendendola potenzialmente implementabile anche nelle istruzioni e nei cataloghi ricambi di gruppi e impianti e macchinari di cui non si dispone del modello CAD.

L'ultima fase operativa ha riguardato l'importazione dei materiali realizzati nell'ambiente software per la realizzazione delle esperienze in VR, dove è stato possibile lavorare alla costruzione del gameplay tramite la realizzazione del diagramma a blocchi attraverso cui legare la scena virtuale, i pannelli di interfaccia e l'impostazione delle interazioni (Schmidt et al., 2018), ai quali si sono affiancati i sistemi di valutazione della performance, costituiti in questo caso dal contatore delle esecuzioni corrette e dal cronometro.

Ottenuta la scena eseguibile tramite visore per realtà virtuale, in questo caso un Meta Quest 3 per via della sua relativa comodità nella vestibilità e la buona risoluzione riproducibile, è stata testata somministrandola all'ente richiedente tramite il gruppo di responsabili e a un paio di loro collaboratori al fine di comprenderne l'aderenza alle loro necessità, effettuare debug e individuare eventuali punti di miglioramento.
Occorre specificare che gli utilizzatori in questione, fautori di queste tipologie di modalità immersive, non rappresentano un gruppo di tester assimilabili a esperti poiché il loro grado di familiarizzazione con gli strumenti VR è limitato. Gli utenti quindi hanno rappresentato le competenze medie dei tecnici ai quali questo lavoro è indirizzato, sottolineando, fin dalle prime fasi di avanzamento, la complessità di produrre contenuti realmente comprensibili.
L'osservazione della sperimentazione ha raccolto impressioni molto favorevoli e ricevuto commenti di apprezzamento circa l'immersività e la presenza della scena sia per via della buona armonia tra i modelli 3D presenti, nonostante le differenti tecniche di realizzazione, sia per l'introduzione di un audio ambientale verosimile di sottofondo.
Tra gli altri aspetti positivi registrati, sicuramente la comprensibilità delle indicazioni fornite, seguite in modo corretto durante lo svolgimento delle prove e il confronto che molte volte si è instaurato tra l'utente immerso e chi assisteva dall'esterno, dimostrando la capacità del sistema di indurre e facilitare il dialogo tra le figura coinvolte benché ricoprissero ruoli e disponessero di competenze differenti (Jacquemin et al., 2024).

Fig. 24 Frame tratto dalla dimostrazione dell'esperienza per l'apprendimento in ambito sicurezza condotta presso Protesa

Tra gli elementi negativi, occorre riportare una comune difficoltà e sofferenza durante le operazioni di installazione del visore sul capo degli utenti. Questo dimostra quanto al di fuori del mondo del gaming e della ricerca questi dispositivi siano ancora ostici a penetrare nella vita comune poiché percepiti come elementi esterni e di fastidio sottolineando ancora una volta la criticità di riuscire a far indossare tali strumenti agli operatori specializzati che lavorano in reparti operativi quali, ad esempio, il montaggio.

Ciò sottolinea ancora una volta la criticità di riuscire a far indossare tali dispositivi agli operatori specializzati che lavorano in reparti operativi quali, ad esempio, il montaggio.

In secondo luogo un aspetto notato è rappresentato dallo stato di flusso nel quale gli utenti immersi si trovano fintanto che l'esperienza procede secondo quanto progettato e predisposto; appena tale condizione viene meno l'utente ne risente fortemente, non solo interrompendo bruscamente il proprio stato di concentrazione, bensì diventando soggetto di frustrazione nel non riuscire a comprendere la soluzione alla dinamica in atto (Zheng et al., 2018). In questo può aiutare la descrizione di una situazione presentatasi durante l'esecuzione di uno dei test. Nella fattispecie l'utente, incontrando un bug nell'esperienza, si è ritrovato al di fuori dei confini prestabiliti della scena ;a questo punto una figura con buon grado di dimestichezza con gli strumenti immersivi cercherebbe di rientrare nel perimetro di svolgimento del gioco per poter riprendere la sua sessione, in questo caso, invece, l'utente, assalito dallo scoramento di essersi bloccato, ha sovrastimato la gravità della situazione e, non riconoscendo che l'ingresso per rientrare nella scena fosse alle sue spalle, ha deciso di abbandonare la prova (H. Nguyen & Bednarz, 2020). Ciò che occorre apprendere dal caso descritto è la necessità di porre grande attenzione nell'individuare un bilanciamento che risulti efficace tra la libertà di azione dell'utente e la guida esterna fornita dall'esperienza perché, se un suo eccesso comporta il distaccamento del senso di presenza, viceversa rischia di comportare smarrimento e difficoltà nella fruizione, come comprovato da letteratura (Griffin & Byrne, 2023).
L'ultimo elemento analizzato deriva dallo studio della richiesta dell'ente di rimuovere la possibilità di intervenire direttamente sugli elementi di pericolo tramite gesture (abbassamento dello schermo di protezione, chiusura dello sportello del quadro e la presa del flacone con l'etichetta danneggiata), lasciando attiva solo l'alternativa del pointer click event. Questa scelta appare curiosa in quanto in contrapposizione all'obiettivo iniziale di rendere più realistica l'esperienza. La risposta, quindi, è da ricercare nel perché la soluzione già in uso sia quella preferita. Valutando quanto avvenuto nei test e considerando che chi non conosceva l'esperienza ha trovato più intuitiva l'interazione gestuale a quella artificiosa del puntatore, si ipotizza che la discrepanza risieda nella mancanza di familiarizzazione con i dispositivi immersivi che induce a sottostimare le possibilità offerte da tali strumenti, poiché non conosciute, a discapito di soluzioni e possibilità realmente interessanti. Emerge così un tema rilevante: potrebbe occorrere maggiore alfabetizzazione nell'uso di questi strumenti?

La risposta in questo caso è affermativa, aiuterebbe, ma come riuscirci è una nuova domanda di ricerca da studiare.

4.4 Simulazioni virtuali e aptica

Il terzo ambito del trasferimento della conoscenza, quello legato all'esternalizzazione durante la quale il sapere individuale è esplicitato e messo a disposizione della collettività, è stato indagato attraverso la lente della progettazione collaborativa.
Lo scenario costruito si sviluppa attorno alla possibilità di co-progettare da remoto e in simultanea, mediante strumenti avanzati che consentano di trasferire da un estremo all'altro sensazioni e percezioni condivisibili, svincolandosi dalla necessità di spostare o duplicare materie prime o semilavorati. Ne deriva la designazione del comparto tessile come campo di sperimentazione in quanto allineato e verosimile alla dinamica ipotizzata e, non secondaria, la rilevanza che questo settore riveste nel Made in Italy potendo evolvere così lo studio all'interno del grande progetto PNRR MICS focalizzato sul Digital Advanced Design (M.I.C.S., 2023).

Nel contesto delineato, quindi, il tema digitalizzazione ricopre grande importanza in quanto rappresenta una leva strategica per l'innovazione sostenibile del comparto potendo intervenire trasversalmente in tutte le fasi del ciclo di vita dei prodotti (Akram et al., 2022). Tecnologie digitali avanzate come la modellazione 3D, la simulazione materica, la realtà aumentata e i gemelli digitali permettono di ridurre i prototipi fisici abbattendo tempi, costi e sprechi. La visualizzazione virtuale dei tessuti consente, ad esempio, valutazioni estetiche e funzionali prima della produzione, mentre strumenti di design generativo e parametrici supportano una progettazione più efficiente e mirata (Habib & Bristy, 2025). Inoltre le piattaforme digitali per la tracciabilità e la raccolta dati lungo la filiera migliorano la trasparenza e l'accountability ambientale contribuendo alla chiusura dei cicli produttivi e al rispetto delle normative. In questo senso, il digitale, declinato come catalizzatore di processi circolari, inclusivi e ad alto valore progettuale, costituisce uno scenario di indagine di particolare interesse per il lavoro di ricerca all'interno dello Spoke 1.

Il progetto "Advanced virtual tools for digital acquisition and visual/haptic XR interaction for textile industry", dunque, nasce con l'obiettivo primario di realizzare un archivio di campioni di tessuto virtuale interagibili il cui utilizzo consenta di ottimizzare i processi ideativi e realizzativi dei prototipi nelle prime fasi di sviluppo progettuale permettendo di ridurre i tempi di produzione e l'utilizzo di materiali fisici, generando impatti positivi sulla riduzione degli scarti e degli sprechi in un settore notoriamente poco sostenibile ma, come già considerato, di eccellenza per il Made in Italy (Deal on New EU Rules to Reduce Textile and Food Waste | News | European Parliament, 2025; Habib & Bristy, 2025; Vezzoli et al., 2022). Il lavoro effettuato è scomponibile in tre macro blocchi, il primo riguarda l'elaborazione e il test di un workflow di acquisizione e virtualizzazione dei tessuti fruibile e conveniente per le PMI; il secondo, prossimo all'approfondimento in quanto parte integrante della sperimentazione tecnica condotta in questa ricerca, è orientato alla restituzione visivo-tattile dei campioni digitalizzati nella prima fase; infine la creazione dell'archivio capace di accogliere i campioni prodotti e i rispettivi metadati di tracciatura delle filiere, sia reale che dematerializzata (Zeng, 1999).

Innanzitutto, occorre sintetizzare brevemente il workflow di acquisizione dei materiali, in particolare l'implementazione del software responsabile dell'elaborazione dei dati grezzi e del post-processing dei campioni acquisiti. In seguito alla fase di analisi dello stato dell'arte è emerso come la tecnica photometric stereo risultasse la più idonea e aderente alle esigenze per il raggiungimento dell'obiettivo prefissato di proporre un processo di acquisizione semplice e snello basata su un campionamento di immagini poi elaborate da software dedicati (Khadka et al., 2018; Wang et al., 2022).

Sulla base di queste premesse e a partire dalla necessità di poter intervenire sullo strumento in via di sviluppo è stato scelto di utilizzare come programma di elaborazione delle immagini il software open-source Relight (Ponchio et al., 2019), originariamente sviluppato dal CNR di Pisa per acquisizioni RTI nell'ambito dei beni culturali. La soluzione in questione si caratterizza per essere accessibile, versatile, flessibile e compatibile con diversi workflow. Il software, ospitato su GitHub, è gratuito e disponibile per le piattaforme Windows, macOS e Linux. Inoltre la natura aperta del sistema lo rende accessibile a comunità potenzialmente in grado di contribuirne attivamente alla manutenzione, documentazione, test e supporto tramite forum o contributi degli sviluppatori. Allo stesso tempo l'apertura e la collaborazione diretta con i suoi creatori lo predispone all'implementazione di modifiche e adattamenti necessari per aggiornarlo e renderlo idoneo all'acquisizione delle superfici tessili e all'elaborazione di texture map quali: albedo, normal map, height/displacement map, alpha map, translucency map; utilizzabili nella maggior parte dei motori di rendering e degli ambienti virtuali.

Il flusso di lavoro dapprima richiede la preparazione dell'ambiente di ripresa che prevede la disposizione del campione da riprodurre virtualmente, il posizionamento statico di una fotocamera che inquadri allo zenit il tessuto, il bilanciamento e la regolazione della stessa tramite ColorChecker e, infine, l'oscuramento della stanza.

In un secondo momento è possibile iniziare l'acquisizione vera e propria attraverso la cattura di campioni di circa 24 immagini caratterizzate dallo spostamento della fonte luminosa, come ad esempio il flash di uno smartphone, andando a circoscrivere il tessuto secondo una geometria a semi-sferica. Le immagini raccolte vengono successivamente importate ed elaborate nel software che ne consente una pianificazione flessibile dell'acquisizione in quanto supporta sia cupole luminose che luci portatili con sfere riflettenti o SALA-Frames offrendo, inoltre, strumenti di supporto all'acquisizione quali il rilevamento automatico delle sfere riflettenti o la correzione del bilanciamento del bianco. In conclusione l'output finale generato consiste nella creazione ed esportazione in formati immagine delle mappe che riproducono la texture rilevata pronte per l'inserimento e utilizzo in modelli PBR.
La seconda porzione del progetto riguarda la percezione dell'utente quale tema chiave nella selezione dei materiali. Essa è il risultato dell'interpretazione di ciò che viene osservato (Ashby & Johnson, 2010) e la memoria svolge un ruolo cruciale poiché registra il rapporto dell'uomo con la materia così come ci viene trasmessa (Manzini, 1986). Ognuno, infatti, ha una percezione diversa dell'oggetto in base alla propria reazione alla fisicità dell'artefatto e alle immagini mentali derivate da esperienze precedentemente accumulate. La percezione e la memoria di un materiale si formano a partire da diverse caratteristiche espresse dall'oggetto. Caratteristiche espressive-sensoriali, associative, percettive ed emozionali e funzionalità tecniche. La somma di questi parametri costituisce la personalità di un prodotto. La Material Experience (Karana et al., 2014), intesa come l'esperienza che gli utenti hanno con i materiali attraverso le caratteristiche espressive-sensoriali, può rappresentare una delle variabili della percezione e della personalità di un materiale. Comprendere come trasferire questa esperienza nel digitale, traducendo le caratteristiche percepite in un linguaggio comprensibile e influenzando positivamente la selezione del materiale, rappresenta una variabile chiave in questo processo progettuale. Nel portare questa esperienza all'interno della XR e nella selezione dei campioni materiali si è cercato di individuare quali parametri potessero rappresentarla e in che modo. Inoltre, parlando di materiali circolari e sostenibili verso i quali la ricerca sta orientando le proprie scelte nel settore tessile ma che, essendo per molti ancora in fase di sperimentazione, non possiedono sempre una personalità materiale riconoscibile (Rosato, 2023).

Lo sviluppo condotto, pertanto, mira a simulare due caratteristiche principali nella selezione di un tessuto, la temperatura e la sensazione tattile, permettendo la percezione della cosiddetta mano del tessuto. In particolare il guanto aptico utilizzato negli esperimenti consente, attraverso vibrazione e pressione, di simulare le sensazioni prodotte quando una superficie tessile viene maneggiata al tatto facendo scorrere le dita sulla sua superficie (Ornati & Kalbaska, 2022; Vardar et al., 2019). A tal fine si è reso necessario realizzare un'ambiente virtuale tramite software Unreal predisposto alla realizzazione di test di associazione tra campioni virtuali e corrispettivi fisici per la verifica delle qualità visuali e tattili appositamente associate ai campioni digitali (Zannoni et al., 2024).
Il lavoro presentato rappresenta la prima forma di sviluppo realizzato personalmente di sperimentazione supportata dall'aptica. L'esperienza virtuale nasce perseguendo due obiettivi: da un lato, effettuare una prima valutazione relativa alla qualità del metodo di acquisizione proposto rispetto a quella delle soluzioni commerciali esistenti; dall'altro, indagare l'impatto percettivo della simulazione tattile virtuale sugli utenti al fine di valutarne il potenziale nei contesti di progettazione collaborativa a distanza.

Il software Unreal Engine è stato scelto per sviluppare la scena sperimentale, poiché offre un equilibrio efficace tra compatibilità con gli output provenienti da Blender, integrazione tramite Software Development Kit (SDK) dedicati e interazione con il dispositivo aptico WeArt Touch Diver, selezionato sia per le sue caratteristiche tecniche sia come innovazione Made in Italy. Inoltre, la capacità di Unreal di rappresentare materiali complessi lo rende adatto a future integrazioni in workflow maggiormente estesi.
Per quanto riguarda il rendering visivo e la valutazione dell'acquisizione, semplicità e usabilità sono state garantite limitando l'implementazione alle mappe di albedo, normal e alpha, rivelatesi sufficienti a descrivere texture virtuali convincenti.
Le mappe di displacement sono state escluse per l'interazione in tempo reale al fine di migliorare le prestazioni, mentre le proprietà di roughness e metalness sono state impostate numericamente all'interno dell'applicativo. Per ridurre la complessità nella configurazione dei parametri aptici, invece, è stato previsto l'utilizzo della logica dei preset fornita dal WeArt SDK. Questa rosa di parametri preimpostati consente agli utenti di regolare, per ciascun materiale presente nella scena, il pattern di vibrazione, il volume di riproduzione, la rigidità (pressione del dito) e la temperatura. In questi termini il lavoro sul campo ha avuto un ruolo cruciale nell'affinamento di tali parametri attraverso un processo iterativo di feedback.
Verticalizzando l'aspetto esecutivo che ha condotto alla realizzazione dell'ambiente sperimentale, si riportano le fasi costruttive operate. Una volta completata l'acquisizione e il post-processing delle texture diventa possibile procedere all'inserimento delle mappe create all'interno della scena virtuale impostate nel software Engine (Unreal engine, s.d.) al fine di contenere la complessità della gestione del modello e garantire un'interfaccia più stabile con il guanto aptico. A questo proposito è stato implementato il kit di sviluppo proprietario di WeArt (TouchDIVER Haptic Glove | Weart, s.d.) per consentire la comunicazione tra la scena e il dispositivo e semplificare la preparazione della componente aptica mantenendo come obiettivo principale quello di rendere il workflow proposto il più intuitivo e utilizzabile possibile.
L'ambiente aptico è stato creato secondo la seguente procedura:

1. creazione di una nuova scena selezionando il canvas dedicato alla realtà virtuale;
2. modifica o creazione della scena impostando l'ambiente e inserendo gli oggetti virtuali di interesse;
3. assegnazione di un materiale a ciascun oggetto.

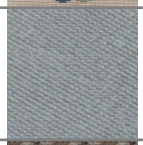
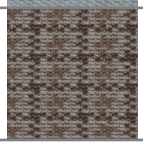
Se fino a questo punto la procedura non presenta differenze rispetto alle operazioni canoniche di modellazione virtuale, da ora in avanti il processo si specializza come segue:

4. per ogni forma che deve essere resa percepibile occorre selezionarla e aggiungere la componente touchable object integrata tramite l'SDK;
5. successivamente aggiungere la componente object collider e modificarne la geometria affinché corrisponda accuratamente allo stato della mesh;
6. abilitare quindi l'opzione che consente i "dynamic events", rendendo così possibile il rilevamento delle collisioni tra oggetti;
7. aprire il pannello di configurazione dei materiali e inserire nelle rispettive sezioni le immagini derivate dal processo di acquisizione, albedo, normal map e, se necessario, roughness & metallic, per poi procedere con la regolazione dei parametri fino a ottenere il rendering desiderato;
8. aprire il pannello touchable object e assegnare un materiale di riferimento, al quale corrisponderà un campionamento vibrazionale;
9. regolare i parametri di temperatura, intensità e velocità fino a ottenere un feedback coerente con la texture impostata;
10. dal pannello content drawer aggiungere alla scena l'oggetto appropriato richiesto per la calibrazione del guanto nell'input e nell'esperienza virtuale.

Con la scena predisposta, per raccogliere dati e feedback utili alle prime valutazioni, è stato progettato un test comparativo tra un ambiente reale e un ambiente virtuale. Per entrambi è stato realizzato un telaio in grado di ospitare quattro campioni tessili in condizione statica e tesa. I campioni sono stati selezionati tenendo in considerazione le varietà dei materiali e delle texture tattili: un jersey di cotone rosso, un tessuto ricamato a maglia aperta, una seta bianca e una maglia pied de poule fine.

I tessuti sono stati successivamente campionati per essere incorporati nella loro controparte virtuale. In questo frangente si innesta la valutazione legata alla qualità della resa visuale derivata dal sistema di acquisizione proposto in questa ricerca. A tal proposito le operazioni di digitalizzazione sono state effettuate utilizzando il processo sviluppato e lo scanner commerciale xTex (Vizoo3d, 2024), per stabilire il benchmark di riferimento. Sebbene in condizioni ideali il test si sarebbe dovuto svolgere con otto campioni (i quattro individuati e scansionati con entrambi i metodi), ma al fine di non sovraccaricare percettivamente gli utenti durante il test di associazione tattile si è optato per mantenere invariato il numero di tessuti. Ciò ha comportato una semplificazione delle operazioni di acquisizione, limitandone l'applicazione a sole due controparti. Nell'intento di rendere il più attendibile possibile la valutazione, le scansioni sono state operata sulle due coppie, ognuna formata da un esempio monocromatico e uno caratterizzato da texture.

Tab. 1 Campioni di tessuto acquisiti utilizzati per il test

texture	tessuto	acquisizione
	S_01 cotone	xTex
	S_02 ricamato	xTex
	S_03 seta	proposto
	S_04 pied de poule	proposto

La fase iniziale ha coinvolto sette utenti che non erano esperti tessili ma possedevano competenze nell'uso della realtà virtuale con l'obiettivo di valutare il potenziale dell'ambiente predisposto senza che la mancanza di familiarità con le apparecchiature rappresentasse un ostacolo. Il test è stato suddiviso in due fasi: nella prima agli utenti è stato chiesto di indossare un guanto aptico su una mano e toccare i campioni virtuali mentre con l'altra mano toccavano i tessuti fisici; successivamente veniva richiesto loro di associare ciascuna texture virtuale al campione fisico corretto senza osservare né l'aspetto della controparte reale né quello digitale. A tal fine le texture sono state rimosse dalla controparte digitale lasciando abilitato soltanto il feedback aptico.
Nella seconda fase i campioni sono stati mescolati e le texture digitali riattivate. Agli utenti è stato chiesto di toccare sia i campioni virtuali che quelli fisici e di associarli, questa volta senza guardare i campioni fisici ma osservando unicamente quelli virtuali tramite HMD.

Un riepilogo dei risultati raccolti è riportato nella tabella 2 (i numeri rappresentano le associazioni corrette). In particolare, i dati del primo test evidenziano la principale difficoltà nel distinguere tra i campioni S_01 e S_04, in quanto corrispondono agli stili vibratori più simili per ampiezza e frequenza.

Tab. 2 Resoconto delle associazioni tra campione reale e controparte virtuale

utente	stimolo aptico	stimolo visivo-aptico
tester_1	2/4	4/4
tester_2	2/4	2/4
tester_3	2/4	4/4
tester_4	1/4	4/4
tester_5	2/4	4/4
tester_6	4/4	4/4
tester_7	1/4	2/4

Inoltre è stato osservato come l'errata associazione dei campioni precedenti influisca sulle associazioni successive rendendo necessaria una riflessione sulla strategia più efficace per ordinare la somministrazione dei campioni. L'ultimo aspetto legato al primo test, che introduce i risultati del secondo, riguarda il fatto che gli esiti estremi, sia negativi che positivi, risultano proporzionali e dipendenti dal singolo tester indicando che la sensibilità soggettiva è stata un elemento significativo.

Fig. 25 Un utente durante il test dell'esperienza virtuale di associazione dei tessuti virtuali-reali

Per quanto riguarda la seconda fase, escludendo la questione della sensibilità personale, sono stati ottenuti risultati molto positivi senza significative discrepanze qualitative tra le acquisizioni standard e quelle testate. Un'ulteriore conferma è data dal fatto che i sei errori riscontrati erano attribuibili a uno dei due metodi di acquisizione impiegati.
In primo luogo, la sperimentazione e i test condotti dimostrano la fattibilità del workflow e ne validano la concettualizzazione del processo. Gli strumenti utilizzati si sono rivelati adeguati ai compiti progettati sebbene il loro impiego debba essere effettuato con la necessaria attenzione per garantirne buone prestazioni e stabilità.

Le prove sperimentali hanno confermato l'accuratezza della corrispondenza tra materiali reali e digitali indipendentemente dal fatto che le texture digitali derivassero da strumenti commerciali o dal workflow proposto in questo progetto (Zannoni et al., 2024).
I risultati raggiunti mostrano però un livello basico di interazione aptica; ciononostante essi confermano un potenziale rilevante per il futuro. In particolare temperatura e intensità possono essere facilmente percepite e regolate, tuttavia, il fatto che i pattern vibrotattili di ciascun campione digitalizzato siano stati impostati tramite valutazione qualitativa, a causa dell'implementazione proprietaria del guanto in Unreal Engine, e basata unicamente sul confronto critico con la rispettiva controparte reale riducendone la riproducibilità e introducendone inevitabili criticità e bias.

A maggior livello di dettaglio la sperimentazione ha consentito anche di trarre le seguenti considerazioni:

_i dispositivi aptici presentano attualmente limitazioni tecniche nella riproduzione della risoluzione fine delle texture. Piuttosto che mirare a una fedeltà iperrealistica risulta più efficace enfatizzare la caratteristica tattile dominante di ciascun campione;

_il volume e l'ampiezza della curva di vibrazione si sono rivelati utili per la differenziazione dei campioni anche se la loro natura soggettiva ne suggerisce l'impiego limitato alla fase iniziale di calibrazione;

_il parametro Forced Velocity, pur essendo utile per superfici statiche e uniformi, è risultato squilibrante nella simulazione dei tessuti e ne è pertanto sconsigliato l'utilizzo;

_sviluppi futuri dovranno implementare la dimensione sonora dell'interazione uomo-tessuto per incrementare la rappresentatività delle simulazioni (Ricci et al., 2024; Spence & Zampini, 2006).

Gli esiti riscontrati per quanto tecnicamente interessanti non sono sufficienti per poter valutare positivamente gli impatti della progettazione collaborativa remota mediata tramite restituzione visivo-tattile se non a decretarne la futura fattibilità quando saranno a disposizione strumenti aptici indossabili più sofisticati e a risoluzione dello stimolo maggiore (Morosi et al., 2018).
In conclusione si notifica invece la distinzione di un ulteriore aspetto notevole legato ai benefici degli stimoli multisensoriali, rappresentando un punto di svolta nell'evoluzione della ricerca.

4.5 Procedure di manutenzione

L'ultima sperimentazione intermedia che si tratta mira all'applicazione delle tecnologie immersive nell'ambito del "learning by doing", fase conclusiva del modello SECI che vede a fronte della completa resa esplicita della conoscenza il compimento dei processi di combinazione delle nozioni teoriche acquisite e delle competenze pratiche maturate e di successiva internalizzazione durante la quale l'intero pacchetto viene assimilato accrescendo il patrimonio del sapere individuale. Per questo approfondimento è stato sfruttato come caso di studio per il virtual learning la conversione di una procedura di manutenzione standard.

Ad oggi questi svolgimenti sono prevalentemente testuali accompagnati da tavole bidimensionali o immagini. In alternativa, nella migliore delle ipotesi, si dispone di video raccolti all'intento di piattaforme di LMS per e-learning (Bohl et al., 2002). In questo senso, quindi, l'obiettivo è indagare la fattibilità e, soprattutto, le possibilità percorribili con un uso estensivo del digital mockup non solo per facilitare la fruizione dell'utente finale, bensì per semplificare e poter anticipare alle prime fasi di messa in opera del progetto il lavoro di creazione di questi prodotti multimediali (Riascos et al., 2015).
Se da un lato ciò richiede particolare attenzione e qualche contributo aggiuntivo in fase di progettazione e modellazione a carico degli enti che si occupano della realizzazione dei modelli, dall'altro, se ne può beneficiare in diverse fasi successive tra cui: le analisi specifiche per la raggiungibilità e per la manutenibilità dei componenti, dell'ottimizzazione delle sequenze di assemblaggio e quella già citata del training (Bal, 2012; Muhammad et al., 2020; D. Nguyen & Meixner, 2019; Rupprecht et al., 2021).

Entrando nel merito dello sviluppo, la prima scelta progettuale ha riguardato l'individuazione della procedura da virtualizzare e rendere immersiva che ha visto nella messa in sicurezza del macchinario tramite lockout/tagout (LOTO) un interessante campo di sperimentazione. La decisione in merito è stata effettuata sulla base di alcuni aspetti reputati prioritari dal punto di vista strategico e dell'impatto del test. Tra questi, primi fra tutti la possibilità di utilizzare come piattaforma di base un macchinario di cui si dispone di mockup digitale pressoché integrale e l'articolazione della sequenza di operazioni, non troppo breve e semplice, ma nemmeno eccessivamente complessa, in modo da mantenerne gestibile la fase di produzione e animazione. Inoltre la natura trasversale della procedura in questione, trattandosi di messa in sicurezza, fa sì che per buona parte sia sovrapponibile ad altri processi analoghi su differenti macchinari e l'opportunità di coinvolgere solo alcune parti specifiche della macchina come la cabina di alimentazione, il pulpito di controllo e la centralina oleodinamica, particolarmente utili in quanto facilmente accessibili ed esplorabili fisicamente in officina.
In modo del tutto simile a quanto svolto durante la creazione dell'esperienza per l'individuazione dei rischi, le fasi operate sono riassumibili in analisi, predisposizione dei materiali per la scena, infine l'effettiva realizzazione delle interazioni.
Analoghe alla precedente anche le modalità di lavoro che hanno visto la collaborazione di più soggetti, ai quali ho avuto la possibilità di fare da facilitatore, potendo intervenite attivamente nella mediazione comunicativa tra le parti e contribuendo alle scelte progettuali relative all'architettura della scena, delle interazioni e delle indicazioni da fornire.
Entrando nel merito delle singole fasi, nella prima operazione di analisi si è cercato di comprendere l'effettiva significatività dei testi ragionando su eventuali aggiustamenti o modifiche per fluidificarne l'esperienza e individuare come tradurre gli elementi da comunicare in modo tale da poter essere veicolati comprensibilmente, facilmente e secondo una modalità tale da favorirne la memorabilità, tentando di non appesantirne la comunicazione (Siltanen & Heinonen, 2020).

Il lavoro di predisposizione dei materiali se da un lato si è concentrato sulla trascrizione degli elementi testuali all'interno dei pannelli di interfaccia dall'altro ha visto l'esecuzione degli alleggerimenti necessari alla mesh al fine di semplificare le matematiche dei modelli al fine di rendere più fluida l'esperienza, nonostante la notevole dimensione computazionale del macchinario e della realizzazione dell'ambiente utilizzando l'immagine HDR a 360° già a disposizione e i impostando un effetto sonoro spaziale a partire da una registrazione originale acquisita in reparto.
Anche in questo caso per la costruzione della scena virtuale immersiva è stato utilizzato un software dedicato attraverso cui è stato allestito il diagramma a blocchi di pilotaggio di tutta l'esperienza (J. Lee et al., 2018).

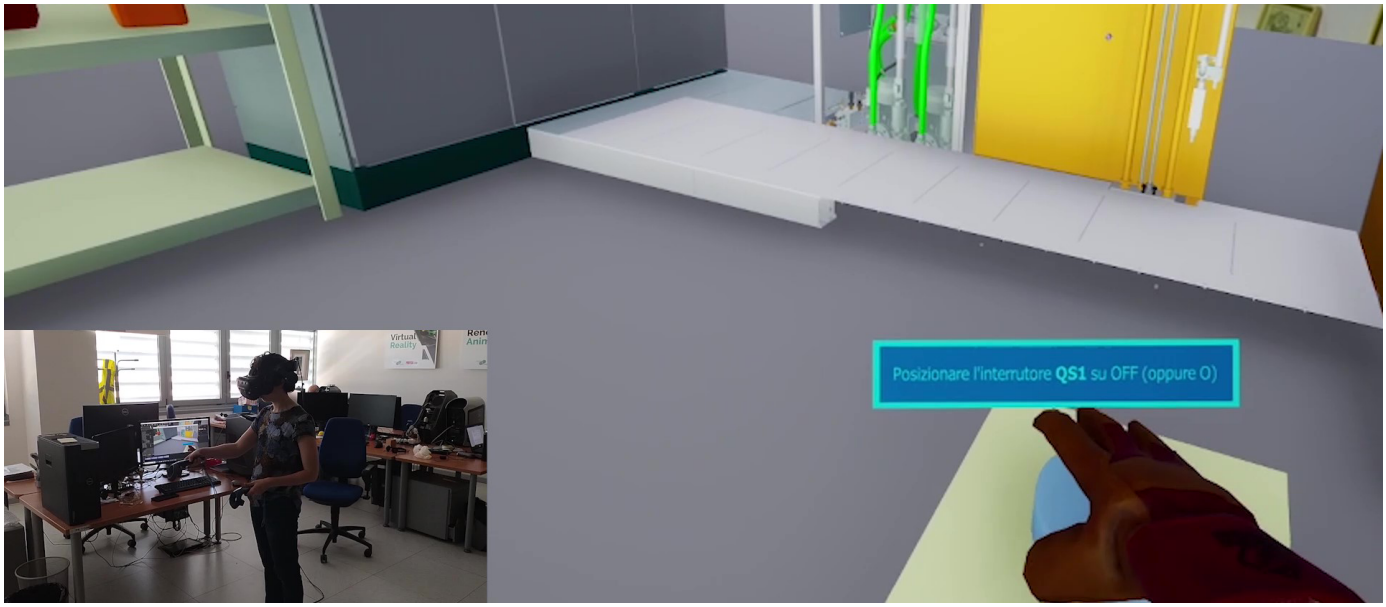


Fig. 26 Frame tratto dalla dimostrazione dell'esperienza per l'esecuzione di procedure di manutenzione in realtà virtuale condotta presso Protesa

La campagna di test è stata effettuata tramite sistema HTC Vive Pro 2 sfruttando ambedue i controller e un'area di tracciamento e di conseguenza di libera esplorazione di circa 8 mq grazie all'installazione di sei tracker. Il test della simulazione immersiva è stato effettuato da sei utenti distribuiti secondo le relative competenze :due conoscitori della procedura, due utenti non esperti e due interaction designer per la valutazione delle interazioni e delle interfacce. Gli esiti riscontrati sono vari e fortemente influenzati dalla tipologia di competenza degli utenti coinvolti .Se i conoscitori della procedura sono riusciti a completare l'ordine delle operazioni solo con qualche intoppo di ridotta entità, lo stesso non è stato per gli altri quattro interlocutori che hanno invece riscontrato maggiori difficoltà nel comprendere come eseguire le istruzioni fornite, indice che il tentativo di mantenere i contenuti testuali il più simile agli originali non si sia dimostrata la strategia più efficace. Introducendo però qualche supporto dall'esterno, cinque utenti su sei sono riusciti a compiere tutte le fasi previste in un tempo ragionevole suggerendo dunque che la comunicazione di procedure anche complesse sia fattibile a patto di ottimizzare il bilanciamento tra autonomia dell'utente e pervasività della guida, in accordo con quanto già rilevato dal secondo scenario di sperimentazione.

In generale i feedback raccolti sono stati abbastanza positivi riguardo l'impatto dell'esperienza con particolare accezione all'immersività dello scenario e alla possibilità di effettuare valutazioni sulle esecuzioni grazie alla predisposizione del monitoraggio della correttezza delle risposte o delle esecuzioni e la contemporanea misurazione del tempo impiegato.

Più severo e puntuale, invece, il giudizio sull'interazione, dal quale sono state evidenziate delle criticità sui pannelli di interfaccia per via della scelta del codice cromatico e visivo poco efficace che in abbinamento ad una ottimizzabile visibilità dei pannelli ha generato in più di un'occasione difficoltà nella lettura e comprensibilità dei messaggi.
Un'ulteriore complessità ha coinvolto la sensibilità dei movimenti manuali nella scena virtuale in quanto troppo ridotta rispetto alla finezza dei movimenti richiesti per eseguire alcune operazioni. In questo senso le cause sono state rintracciate nella scelta di visualizzare in virtuale dei guanti piuttosto ingombranti nei confronti delle contenute dimensioni di alcuni componenti con cui interagire e dall'utilizzo del controller anziché della tracciatura dell'azione naturale della mano. Gli errori tecnici qui riassunti sono stati in gran parte indotti dall'inesperienza del gruppo di sviluppo poiché dal punto di vista cronologico questa è stata la prima delle quattro sperimentazioni ad essere realizzata; pertanto i feedback ricevuti sono risultati estremamente utili e la loro implementazione importante nello svolgimento delle esperienze successive.

In conclusione, ciò che è possibile sintetizzare è il buon grado di coinvolgimento ottenuto e la dimostrazione che gli strumenti e le capacità a disposizione consentono di riprodurre in virtuale anche i passaggi più complessi. Si tratta, infatti, di due aspetti molto preziosi in quanto permettono di trainare verso un flusso di lavoro che non annoveri, almeno in prima battuta, l'integralità della macchina ma conceda di concentrarsi solo su alcune porzioni, auspicabilmente a più alto valore aggiunto, in modo da contenere sensibilmente gli sforzi per un sistema non ancora pronto a modificare in modo sensibile l'organizzazione del lavoro. Inoltre dagli aspetti positivi di questo POC emerge anche un altro interessante spunto relativo all'ipotesi di poter mettere a frutto questo tipo di simulazione non solo come ambiente protetto di pratica e allenamento, bensì anche come luogo dimostrativo potendo accogliere operatori specializzati che possono sfruttare questa soluzione per realizzare video esplicativi e tutorial senza la necessità della macchina o di particolari setting di ripresa sostituibili da una più semplice e snella registrazione a schermo della soggettiva durante l'esecuzione delle attività in corso di spiegazione (Häfner et al., 2013). Per contro occorre rilevare che, nonostante l'interesse generato e i feedback positivi ricevuti, il tema della reale fruibilità e utilizzo di tali esperienze nel contesto tecnico e operativo pare ancora piuttosto rarefatto.

Intervallo - Seconda Sezione
Distaccamento e sedimentazione

Nel campo della comunicazione tecnica esistono diverse ragioni alla base della scarsa adozione dei sistemi digitali avanzati. In primo luogo, vi è una questione legislativa, aggiornata solo di recente e ufficialmente ancora in attesa di entrare in vigore. In secondo luogo, la mancanza di una cultura orientata al servizio al cliente (sia in ambito B2C che B2B), che rende i comunicatori tecnici ottimi redattori ma inadeguatamente formati e alfabetizzati in termini di user-centered design e interaction design. Infine, l'elevata barriera all'ingresso rappresentata dall'hardware per la realtà estesa (tipicamente visori e occhiali per la realtà aumentata), dovuta alla scarsa comodità nel medio-lungo periodo, alla complessità d'uso e, soprattutto, alla difficoltà di integrare tali sistemi negli ambienti di lavoro, poiché il loro utilizzo potrebbe interferire con la sicurezza degli stessi operatori, generando problemi di accettazione e di permeabilità di questi dispositivi e metodologie in contesti così specifici.

Mancanza di comunicazione

Nelle grandi organizzazioni, la necessaria compartimentazione delle risorse in sottogruppi ristretti, ha la funzione di dare ordine e suddividere i compiti da svolgere in attività più semplici e facili da gestire, rendendo i processi controllabili (Riss & Rickayzen, 2005).
Questa suddivisione, tuttavia, comporta una fisiologica difficoltà di comunicazione dovuta a fattori personali e sociali. Sotto il primo punto di vista le persone nelle singole divisioni sono differenti per attitudine, competenze, anagrafica e visione del lavoro (Hecker et al., s.d.). Se i primi fattori sono intrinseci, sul tema dell'anagrafica e del punto di vista è necessario aggiungere qualche specifica, nel primo caso, infatti, il necessario accostamento di figure giovani a figure più esperte, mette in risalto la differenza generazionale e culturale, che incidono sia sulla comprensibilità dei linguaggi, che sulla propositività all'innovazione (Frosch, 2011). Per quanto riguarda la seconda questione, la verticalizzazione alla quale sono abituati i reparti, induce le persone a concentrarsi prioritariamente sul proprio lavoro, perdendo di fatto il monito generale delle attività. Ciò comporta un grosso problema, poiché la conseguenza è che ciascuno si occupi solo delle proprie questioni, andando il più delle volte a intralciare inconsapevolmente il lavoro degli altri (Albrecht, 2002).
In questo senso, durante la ricerca si è cercato di inquadrare come il ruolo del mediatore di competenza sia dell'appropriato utilizzo degli strumenti, possa indurre a maggiori e più efficaci trasferimenti.

La documentazione non è utente finale centrica

Dall'analisi sul campo e dalle interviste, ciò che è emerso con più forza è che la documentazione tecnica non sia cliente-centrica (Frank et al., 2020).
Il processo descritto dalla mappatura, infatti, vede come asse principale di sviluppo quello del contratto, denotando come tutti i flussi, documentale ma anche di produzione, siano costruiti in modo da favorire il lavoro e il compito di determinati reparti a scapito di altri, che non a caso corrispondono a quelli che hanno interazioni verso l'esterno.
Questa situazione si rivela critica in modo particolare nel post-vendita e nel dare continuità al monitoraggio e all'aggiornamento dei macchinari durante il loro ciclo di vita.

Anche in questi termini, la ricerca, dovrà trovare collocazione fornendo suggestioni utili ad una modalità di accentramento del cliente e delle persone che lo costituiscono, allineandosi inoltre alla direzione che si sta diffondendo sotto l'appellativo di industria 5.0, che sfrutta le tecnologie della quarta rivoluzione industriale, ma che propone di sviluppare i principi dell'accentramento della componente umana al centro del progetto e della sostenibilità ambientale (Xu et al., 2021).

Le esperienze virtuali generano impatti controversi

Dall'osservazione condotta durante le fasi di sperimentazione sul campo, è possibile rilevare genericamente un buon impatto e accoglienza di buon grado delle esperienze virtuali presentate. Ovviamente la sensazione suscitata maggiormente è quella della meraviglia, trattandosi di applicazioni ancora molto distanti dalla realtà nell'immaginario comune. Le dinamiche di gamification e di interazione diretta con gli oggetti, inoltre, forniscono riscontri positivi riguardo il grado di coinvolgimento degli utenti che si ritrovano a muoversi all'interno di officine virtuali.
Tuttavia, nonostante i suoi vantaggi, tale modalità di rappresentazione presenta anche limitazioni che non possono essere ignorate. Un aspetto cruciale è lo scarso comfort percepito dagli utenti non esperti, la fase di preparazione e di regolazione dei dispositivi, risultano talvolta scomode e invadenti, per giunta è necessario tenere in considerazione le difficoltà relative all'utilizzo di occhiali, fattori che nell'insieme inducono in più occasioni a infastidire l'utente e a farlo desistere dall'attività in corso. Un'altra criticità, riguarda la fruibilità delle esperienze, infatti, finché il corso dell'esperienza si svolge secondo quanto progettato, tutto fluisce in modo corretto, in caso di discontinuità, la compenetrazione con oggetti di scena ne è un frequente esempio, si genera frustrazione e disagio in quanto il soggetto spesso non dispone della familiarità necessaria con i dispositivi utilizzati per riuscire a risolvere in modo autonomo la situazione. La conseguente richiesta di intervento esterno, però, interrompe significativamente il flow e la presenza cognitiva investita.

I feedback aptici hanno ampi margini di miglioramento

Sia dall'analisi delle sperimentazioni condotte, sia dall'esperienza personale, è possibile riconoscere l'efficacia dell'implementazione del senso del tatto nelle esperienze virtuali.
A beneficiarne è il coinvolgimento della scena, percepito in modo più forte e il conseguente stato di presenza che si sviluppa in modo direttamente proporzionale all'aumento degli stimoli a cui il corpo dell'individuo è sottoposto. La soluzione in questione, non risulta essere priva di criticità, infatti, tutti i dispositivi aptici analizzati e testati dimostrano ancora importanti limiti tecnologici che ne condizionano il realismo della restituzione. Innanzitutto, parte di questi strumenti si limita a imprimere una vibrazione on/off quando si entra in contatto con un oggetto in scena; mentre quelli più interessanti, in grado di associare ai materiali differenti pattern vibratori, risultano ancora carenti dal punto di vista della risoluzione dello stimolo, eccessivamente ridotta rispetto alla capacità di acquisire informazioni da parte del capillare sistema nervoso presente nei polpastrelli e più in generale nelle mani. Si dimostra così un ambito dall'interessante potenziale di sviluppo, ma con ancora grandi margini di ricerca e implementazione.

Bibliografia - Seconda Sezione

Ispirazioni e referenze

Akram, S. V., Malik, P. K., Singh, R., Gehlot, A., Juyal, A., Ghafoor, K. Z., & Shrestha, S. (2022). Implementation of Digitalized Technologies for Fashion Industry 4.0: Opportunities and Challenges. *Scientific Programming, 2022*(1), 7523246. https://doi.org/10.1155/2022/7523246

Alalwan, J. A., & Weistroffer, H. R. (2012). Enterprise content management research: A comprehensive review. *Journal of Enterprise Information Management, 25*(5), 441–461. https://doi.org/10.1108/17410391211265133

Albrecht, K. (2002). Organizational intelligence & knowledge management: Thinking outside the silos. *Executive White Paper, 1*, 17.

Archana, M., Varadarajan, D. V., & Medicherla, S. S. (2022). *Study on the ERP Implementation Methodologies on SAP, Oracle NetSuite, and Microsoft Dynamics 365: A Review* (No. arXiv:2205.02584). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.02584

Ashby, M., & Johnson, K. (2010). *Materiali e Design. L'arte e la scienza della selezione dei materiali per il progetto*. Casa Editrice Ambrosiana.

Bal, M. (2012). Virtual Manufacturing Laboratory Experiences for Distance Learning Courses in Engineering Technology. *2012 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings*, 25.1461.1-25.1461.12. https://doi.org/10.18260/1-2--22218

Barthelmey, A., Lenkenhof, K., Schallow, J., Lemmerz, K., Deuse, J., & Kuhlenkötter, B. (2016). Technical Documentation as a Service – An Approach for Integrating Editorial and Engineering Processes of Machinery and Plant Engineers. *Procedia CIRP, 52*, 167–172. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.070

Betella, A., Martínez, E., Zucca, R., Arsiwalla, X. D., Omedas, P., Wierenga, S., Mura, A., Wagner, J., Lingenfelser, F., André, E., Mazzei, D., Tognetti, A., Lanatà, A., De Rossi, D., & Verschure, P. F. M. J. (2013). Advanced interfaces to stem the data deluge in mixed reality: Placing human (un)consciousness in the loop. *ACM SIGGRAPH 2013 Posters*, 1–1. https://doi.org/10.1145/2503385.2503460

Biener, V., Ofek, E., Pahud, M., Kristensson, P. O., & Grubert, J. (2023). Extended Reality for Knowledge Work in Everyday Environments. In A. Simeone, B. Weyers, S. Bialkova, & R. W. Lindeman (A c. Di), *Everyday Virtual and Augmented Reality* (pp. 21–56). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05804-2_2

Bohl, O., Scheuhase, J., Sengler, R., & Winand, U. (2002). The sharable content object reference model (SCORM)—A critical review. *International Conference on Computers in Education, 2002. Proceedings.*, 950–951 vol.2. https://doi.org/10.1109/CIE.2002.1186122

Boisot, M. H. (1998). *Knowledge Assets: Securing Competitive Advantage in the Information Economy*. OUP Oxford.

Bolisani, E., & Bratianu, C. (2018). The Emergence of Knowledge Management. In E. Bolisani & C. Bratianu (A c. Di), *Emergent Knowledge Strategies: Strategic Thinking in Knowledge Management* (pp. 23–47). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60657-6_2

Bologna, J. K., Garcia, C. A., Ortiz, A., Ayala, P. X., & Garcia, M. V. (2020). An Augmented Reality Platform for training in the industrial context. *IFAC-PapersOnLine*, *53*(3), 197–202. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.032

Caballini, C., Carboni, A., Boero, F., Parodi, F., Valentini, I., Paolucci, M., Rappis, G. N., & Pagano, S. (2023). Augmented reality and portable devices to increase safety in container terminals: The testing of A4S project in the port of Genoa. *Transportation Research Procedia*, *69*, 344–351. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.181

Carcano, L., & Lojacono, G. (2019). *Made in Italy Industries: Managerial issues and best practices*. EGEA spa.

Coburn, J. Q., Freeman, I., & Salmon, J. L. (2017). A Review of the Capabilities of Current Low-Cost Virtual Reality Technology and Its Potential to Enhance the Design Process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *17*(3), 031013. https://doi.org/10.1115/1.4036921

Daghfous, A., Belkhodja, O., & C. Angell, L. (2013). Understanding and managing knowledge loss. *Journal of Knowledge Management*, *17*(5), 639–660. https://doi.org/10.1108/JKM-12-2012-0394

Dicks, R. S. (2009). The Effects of Digital Literacy on the Nature of Technical Communication Work. In *Digital Literacy for Technical Communication*. Routledge.

Du, J. (2021). *Comparison Between 3d Animation Design and 2d Animation Design*. 336–340. https://doi.org/10.2991/assehr.k.211120.062

Ebbers, T., Kool, R. B., Smeele, L. E., Dirven, R., den Besten, C. A., Karssemakers, L. H. E., Verhoeven, T., Herruer, J. M., van den Broek, G. B., & Takes, R. P. (2022). The Impact of Structured and Standardized Documentation on Documentation Quality; a Multicenter, Retrospective Study. *Journal of Medical Systems*, *46*(7), 46. https://doi.org/10.1007/s10916-022-01837-9

Endsley, M. R. (2018). Automation and Situation Awareness. In *Automation and Human Performance*. CRC Press.

Flaviano Celaschi, & Casoni Giorgio. (2020). *Human Body design*. Franco Angeli.

Frank, L., Poll, R., Röglinger, M., & Rupprecht, L. (2020). Design heuristics for customer-centric business processes. *Business Process Management Journal*, *26*(6), 1283–1305. https://doi.org/10.1108/BPMJ-06-2019-0257

Frosch, K. H. (2011). Workforce Age and Innovation: A Literature Survey. *International Journal of Management Reviews*, *13*(4), 414–430. https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2011.00298.x
Gamil, Y., & Rahman, I. A. (2017). Identification of Causes and Effects of Poor Communication in Construction Industry: A Theoretical Review. *Emerging Science Journal*, *1*(4), Articolo 4. https://doi.org/10.28991/ijse-01121

Garousi, G., Garousi, V., Moussavi, M., Ruhe, G., & Smith, B. (2013). Evaluating usage and quality of technical software documentation: An empirical study. *Proceedings of the 17th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 24–35. https://doi.org/10.1145/2460999.2461003

Grandi, F., Prati, E., Mangia, G., & Peruzzini, M. (2023). Development of an AR-Based Application for Training of Warehouse Operators. In Y. Borgianni, D. T. Matt, M. Molinaro, & G. Orzes (A c. Di), *Towards a Smart, Resilient and Sustainable Industry* (pp. 121–132). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38274-1_11

Gregor, S., Hart, D., & Martin, N. (2007). Enterprise architectures: Enablers of business strategy and IS/IT alignment in government. *Information Technology & People*, *20*(2), 96–120. https://doi.org/10.1108/09593840710758031

Griffin, D., & Byrne, J. (2023, ottobre 14). *Design Heuristics for XR Tools to Support Social Presence in Hybrid Teams*.

Habib, Md. A., & Bristy, M. (2025). Advancing sustainable fashion through 3D virtual design for reduced environmental impact. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, *1*, 135–142. https://doi.org/10.15406/jteft.2025.11.00415

Häfner, P., Häfner, V., & Ovtcharova, J. (2013). Teaching Methodology for Virtual Reality Practical Course in Engineering Education. *Procedia Computer Science*, *25*, 251–260. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.031

Haramundanis, K. (2014). *The Art of Technical Documentation*. Digital Press.
Hecker, I., Spaulding, S., & Kuehn, D. (s.d.). *Digital Skills and Older Workers*.

Heinonen, H. (2023). *The Benefits of Extended Reality for Technical Communication: Utilizing XR for Maintenance Documentation Creation and Delivery*. Tampere University. https://trepo.tuni.fi/handle/10024/149933

Irwin, T. (2015). Transition Design: A Proposal for a New Area of Design Practice, Study, and Research. *Design and Culture*, *7*(2), 229–246. https://doi.org/10.1080/17547075.2015.1051829

ISO 10303-1:2024 Industrial automation systems and integration. Product data representation and exchange Overview and fundamental principles. (2024).

Ivers, A. M., Byrne, J., & Byrne, P. (2016). Analysis of SME data readiness: A simulation perspective. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, *23*(1), 163–188. https://doi.org/10.1108/JSBED-03-2014-0046

Jacquemin, P. H., Gräf, M., Hendriks, P., & Wahl, N. (2024). *Beyond the Screen: Developing Design Principles and Nudges for Enhancing Virtual Team Collaboration in the Metaverse*.

Jagamogan, R. S., Ismail, S. A., Hafizah, N., & Hafiza Abas, H. (2021). A Review: Penetration Testing Approaches on Content Management System (CMS). *2021 7th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICRIIS53035.2021.9617087

Karana, E., Pedgley, O., & Rognoli, V. (A c. Di). (2014). *Materials experience: Fundamentals of materials and design*. Butterworth-Heinemann.

Kasabov, N. (A c. Di). (2007). Evolving Connectionist Methods for Supervised Learning. In *Evolving Connectionist Systems: The Knowledge Engineering Approach* (pp. 83–126). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-347-5_3

Khadka, A. R., Remagnino, P., & Argyriou, V. (2018). Object 3D reconstruction based on photometric stereo and inverted rendering. *2018 14th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS*, 208–215.

Koukias, A., Nadoveza, D., & Kiritsis, D. (2015). An ontology–based approach for modelling technical documentation towards ensuring asset optimisation. *International Journal of Product Lifecycle Management*, *8*(1), 24–45. https://doi.org/10.1504/IJPLM.2015.068012

Lee, J., Bang, J., & Suh, H. (2018). Identifying Affordance Features in Virtual Reality: How Do Virtual Reality Games Reinforce User Experience? In D. D. Schmorrow & C. M. Fidopiastis (A c. Di), *Augmented Cognition: Intelligent Technologies* (pp. 383–394). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91470-1_31

Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, *65*, 279–295. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017

Levallet, N., & Chan, Y. E. (2018). Organizational knowledge retention and knowledge loss. *Journal of Knowledge Management*, *23*(1), 176–199. https://doi.org/10.1108/JKM-08-2017-0358

Manzini, E. (1986). *La materia dell'invenzione. Materiali e progetto.* Arcadia.

Materna, Z., Kapinus, M., Beran, V., Smrž, P., & Zemčík, P. (2018). Interactive Spatial Augmented Reality in Collaborative Robot Programming: User Experience Evaluation. *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 80–87. https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525662

McKeever, S. (2003). Understanding Web content management systems: Evolution, lifecycle and market. *Industrial Management & Data Systems*, *103*(9), 686–692. https://doi.org/10.1108/02635570310506106

Minocha, S., Tudor, A.-D., & Tilling, S. (2017, luglio). *Affordances of Mobile Virtual Reality and their Role in Learning and Teaching*. Electronic Visualisation and the Arts (EVA 2017). https://doi.org/10.14236/ewic/HCI2017.44

Morosi, F., Carli, I., Caruso, G., Cascini, G., Dhokia, V., & Ben Guefrache, F. (2018). Analysis of co-design scenarios and activities for the development of a spatial-augmented reality design platform. *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 381–392. https://doi.org/10.21278/idc.2018.0504

Muhammad, A. A., Yitmen, İ., Alizadehsalehi, S., & Celik, T. (2020). Adoption of Virtual Reality (VR) for Site Layout Optimization of Construction Projects. *Teknik Dergi*, *31*(2), Articolo 2. https://doi.org/10.18400/tekderg.423448

Ngonga Ngomo, A.-C., Heino, N., Lyko, K., Speck, R., & Kaltenböck, M. (2011). SCMS – Semantifying Content Management Systems. In L. Aroyo, C. Welty, H. Alani, J. Taylor, A. Bernstein, L. Kagal, N. Noy, & E. Blomqvist (A c. Di), *The Semantic Web – ISWC 2011* (Vol. 7032, pp. 189–204). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25093-4_13

Nguyen, D., & Meixner, G. (2019). Gamified Augmented Reality Training for An Assembly Task: A Study About User Engagement. *Annals of Computer Science and Information Systems*, *18*, 901–904. https://annals-csis.org/Volume_18/drp/136.html

Nguyen, H., & Bednarz, T. (2020). User Experience in Collaborative Extended Reality: Overview Study. In P. Bourdot, V. Interrante, R. Kopper, A.-H. Olivier, H. Saito, & G. Zachmann (A c. Di), *Virtual Reality and Augmented Reality* (pp. 41–70). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62655-6_3

Nonaka, Ikujiro, Takeuchi, H., & Umemoto, K. (1996). A theory of organizational knowledge creation. *International Journal of Technology Management*, *11*(7–8), 833–845. https://doi.org/10.1504/IJTM.1996.025472

Nonaka, I., & Konno, N. (1998). The Concept of "Ba": Building a Foundation for Knowledge Creation. *California Management Review, 40*(3), 40–54. https://doi.org/10.2307/41165942

Onnasch, L., & Hösterey, S. (2019). Stages of Decision Automation: Impact on Operators' Role, Awareness and Monitoring. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 63*(1), 282–286. https://doi.org/10.1177/1071181319631126

Ornati, M., & Kalbaska, N. (2022). Looking for haptics. Touch digitalization business strategies in luxury and fashion during COVID-19 and beyond. *Digital Business, 2*(2), 100035. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100035

Otto, P. N., & Anton, A. I. (2007). Addressing Legal Requirements in Requirements Engineering. *15th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2007)*, 5–14. https://doi.org/10.1109/RE.2007.65

Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea. (2023). *Regolamento (UE) 2023/ del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 giugno 2023, relativo alle macchine e che abroga la direttiva 2006/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e la direttiva 73/361/CEE del Consiglio.*

Pierdicca, R., Frontoni, E., Pollini, R., Trani, M., & Verdini, L. (2017). The Use of Augmented Reality Glasses for the Application in Industry 4.0. In L. T. De Paolis, P. Bourdot, & A. Mongelli (A c. Di), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (pp. 389–401). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60922-5_30

Pollini, A., Zannoni, M., Peruzzini, M., & Pucci, D. (2024, luglio 5). Proximity Machinery through eXtended Reality: Design per la formazione dell'operatore resiliente 5.0. *Design e ricerca: Fonti e Risorse.* SID 2024 Design e ricerca: Fonti e Risorse, Venezia.

Ponchio, F., Corsini, M., & Scopigno, R. (2019). RELIGHT: A compact and accurate RTI representation for the web. *Graphical Models, 105*, 101040. https://doi.org/10.1016/j.gmod.2019.101040

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems, 58*, 3–21. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001

Rascu, E. (2006). A Controlled Language Aproach to Text Optimisation in Technical Documentation. *Proceedings der 8. Konferenz zur Verarbeitung Natürlicher Sprache: 4. - 7. Oktober 2006 [Konstanz]*, 107–114.

Riascos, R., Levy, L., Stjepandić, J., & Fröhlich, A. (2015). Digital Mock-up. In J. Stjepandić, N. Wognum, & W. J.C. Verhagen (A c. Di), *Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges* (pp. 355–388). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_13

Ricci, M., Scarcelli, A., Losciale, P., & Di Roma, A. (2024). Perception-Driven Design Approach: Towards Interaction Design for Simulating and Evoking Tactile Properties via Digital Interfaces. In M. Kurosu & A. Hashizume (A c. Di), *Human-Computer Interaction* (pp. 89–101). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60449-2_7

Ricci, M., & Scarcelli, A. (2022). A Human-Centred Design Approach for Designing Augmented Reality Enabled Interactive Systems: A Kitchen Machine Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_123

Riss, U. V., & Rickayzen, A. (2005). Challenges for Business Process and Task Management.

Rosato, L. (2023). *Transition Matters. Il ruolo del designer nella transizione sostenibile e circolare dei materiali polimerici.* [Doctoral Thesis, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna].

Rupprecht, P., Kueffner-McCauley, H., Trimmel, M., & Schlund, S. (2021). *Adaptive Spatial Augmented Reality for Industrial Site Assembly. 104*, 405–410. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.068

Sangiorgi, D. (2011). *Transformative Services and Transformation Design.* https://re.public.polimi.it/handle/11311/968237

Schmidt, S., Steinicke, F., Irlitti, A., & Thomas, B. H. (2018). Floor-Projected Guidance Cues for Collaborative Exploration of Spatial Augmented Reality Setups. *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 279–289. https://doi.org/10.1145/3279778.3279806

Scianna, A., Gaglio, G. F., & La Guardia, M. (2020). Digital photogrammetry, tls survay and 3d modelling for VR and AR applications in CH. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020*, 901–909. XXIV ISPRS Congress, Commission II (Volume XLIII-B2-2020) - 2020 edition. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-901-2020

Siltanen, S., & Heinonen, H. (2020). Scalable and responsive information for industrial maintenance work: Developing XR support on smart glasses for maintenance technicians. *Proceedings of the 23rd International Conference on Academic Mindtrek*, 100–109. https://doi.org/10.1145/3377290.3377296

Skelton, M., & Pais, M. (2019). *Team Topologies: Organizing Business and Technology Teams for Fast Flow.* IT Revolution.

Spence, C., & Zampini, M. (2006). Auditory Contributions to Multisensory Product Perception. *Acta Acustica united with Acustica, 92*(6), 1009–1025.

Straub, D., & Ziegler, W. (2023). *Technical Communication on the Road to Digitization. Inside views of digitization in technical communication.*

Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal, 28*(13), 1319–1350. https://doi.org/10.1002/smj.640

Vardar, Y., Wallraven, C., & Kuchenbecker, K. J. (2019). Fingertip Interaction Metrics Correlate with Visual and Haptic Perception of Real Surfaces. *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 395–400. https://doi.org/10.1109/WHC.2019.8816095

Vezzoli, C., Conti, G. M., Macrì, L., & Motta, M. (2022). *Designing Sustainable Clothing Systems.* Franco Angeli.

Wang, Q., Wang, S., Li, B., Zhu, K., & Wu, T. (2022). In-situ 3D reconstruction of worn surface topography via optimized photometric stereo. *Measurement, 190*, 110679.

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 530–535. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Yasseri, T., Gildersleve, P., & David, L. (2022). *Collective Memory in the Digital Age* (Vol. 274, pp. 203–226). https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2022.07.001

Zannoni, M., Foschi, R., Pucci, D., & Saponelli, R. (2024). An Immersive Haptic Experimentation for Dematerialized Textile Perception in Collaborative Design Processes. *SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology*, *14*(1), Articolo 1. https://doi.org/10.2423/i22394303v14n1p129

Zeng, M. L. (1999). Metadata elements for object description and representation: A case report from a digitized historical fashion collection project. *Journal of the American Society for Information Science*, *50*(13), 1193–1208. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(1999)50:13%253C1193::AID-ASI5%253E3.0.CO;2-C

Zheng, L., Xie, T., & Liu, G. (2018). Affordances of Virtual Reality for Collaborative Learning. *2018 International Joint Conference on Information, Media and Engineering (ICIME)*, 6–10. https://doi.org/10.1109/ICIME.2018.00011

Sitografia

Autodesk Forge Viewer. (s.d.). Recuperato 23 ottobre 2023, da https://viewer-rocks.autodesk.io/

Cadasio—Modernise Your Technical Communications. (s.d.). Recuperato 23 ottobre 2023, da https://www.cadasio.com/

Deal on new EU rules to reduce textile and food waste | News | European Parliament. (2025, febbraio 19). https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20250217IPR26975/deal-on-new-eu-rules-to-reduce-textile-and-food-waste

EKR Orchestra—EKR Orchestra—The correct info, everywhere. (s.d.). Recuperato 28 novembre 2022, da https://ekr.it/

Main page | Cortona3D. (s.d.). Recuperato 23 ottobre 2023, da https://www.cortona3d.com/en

M.I.C.S. (2023). *Mics made in italy circolare e sostenibile webpage*. mics.tech. da https://www.mics.tech/mics/

Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea. (2006, maggio 17). *Direttiva Macchine 2006_42_CE*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=IT

Smart Media Creator—WRITEC. (s.d.). Recuperato 3 novembre 2022, da https://www.writec.com/software/smart-media-creator

TouchDIVER Haptic Glove | Weart. (s.d.). Recuperato 23 marzo 2024, da https://weart.it/haptic-vr-products/touchdiver-haptic-glove/

Unreal engine. (s.d.). *The most powerful real-time 3D creation tool*. Unreal Engine. Recuperato 24 marzo 2024, da https://www.unrealengine.com/en-US/home

Vizoo3d. (2024). *Xtex scanners webpage* (x-rite & P.A.N.T.O.N.E., A c. Di), da https://www.vizoo3d.com/xtex-hardware/,

Terza Sezione
Sperimentazione pratica

03.

I processi e i risultati descritti nella precedente sezione evidenziano l'importanza di operare approcci quanto più possibile concreti e condivisi tanto più ci si rivolge ad un'organizzazione vasta, affinché tutti gli attori possano essere coinvolti e indotti a contribuire svolgendo la propria parte all'interno di un lavoro più esteso. L'importanza della prototipazione, infatti, non è nuova quando si tratta di sviluppare progetti; tuttavia, non sempre risulta di facile assimilazione in contesti pratici, laddove la controparte fisica viene a mancare.
Le demo presentate, quali momento conclusivo del progresso dei Proof of Concept di partenza, hanno rivestito grande importanza nel riuscire a dare forma alle visioni progettate, coinvolgendo i diversi attori connessi all'ambito della documentazione tecnica, invitandoli ad intraprendere un dialogo attraverso il quale operare maggiori armonizzazioni tra le parti.

Il contesto di questa ricerca è fortemente influenzato dalla complessità nella definizione e nella manipolazione dell'idea di immaterialità, sia dal punto di vista del prodotto virtuale, che dal suo ruolo all'interno del processo documentale. Pertanto, risulta fondamentale al fine di chiarimento e di fondamento per le successive considerazioni, l'introduzione dell'approccio alla documentazione tecnica come sistema servizio-prodotto. In questo senso, si propone il superamento dell'approccio a questa materia come accessoria, quale esito della somma dei prodotti fisici redazionali (istruzioni e certificazioni), a favore di una visione maggiormente orientata all'apparato, all'interno del quale tutti gli sforzi non si configurano come orientati al raggiungimento di un risultato specifico, bensì come funzionali alla corretta e fluida circolazione delle comunicazioni e delle informazioni, in altre parole della conoscenza.

Nella cornice qui presentata, come si inseriscono le tecnologie immersive?

Per aggiungerle all'equazione è utile ripartire dal concetto di circolazione delle informazioni, in quanto trasversale ai tre livelli concentrici sui quali si sviluppa la ricerca. Il primo, quello più generale e appena introdotto, riguarda il flusso che coinvolge i differenti enti dell'organizzazione; il secondo, riguarda il processo di creazione delle esperienze virtuali nelle quali le informazioni devono essere immesse, per poi essere trasmesse durante il loro svolgimento. L'ultimo piano riguarda il loop comunicativo tra l'utente destinatario dell'esperienza immersiva e la scena virtuale che ne deve guidare l'esecuzione.
Lo svolgimento delle dimostrazioni ha contribuito a individuare diversi limiti delle tecnologie immersive, evidenziando criticità e discontinuità proprio all'interno del flusso dell'ultimo livello. L'obiettivo di questa sezione consiste nell'indagare tale interruzione, cercando, dove possibile, di proporre soluzioni utili al ripristino della circolazione all'interno del prodotto virtuale, attraverso il quale, auspicabilmente, veicolare e avviare il volano del servizio.

A guidare il lavoro descritto in questa terza sezione sarà la seguente domanda di ricerca.

RQ3: Come definire un framework progettuale che renda le esperienze in realtà estesa maggiormente sfruttabili?

5. Confini impalpabili

Un'azione progettuale materiale per gli ambienti virtuali

In un momento storico in cui i mercati sono caratterizzati da incertezze politiche, economiche e sociali, la corsa alla digitalizzazione rimane una costante nel settore industriale. Tuttavia, i continui sviluppi tecnologici non trovano sempre un'applicazione diffusa nel tessuto produttivo, principalmente a causa della necessità di ripensare processi e strumenti, scontrandosi così con la naturale avversione al cambiamento tipica delle grandi organizzazioni. Questa dinamica si accentua in tutti i campi che, pur contribuendo alla produzione e alla commercializzazione, non manifestano esplicitamente un incremento del valore del prodotto finito sul mercato, limitandone di conseguenza gli investimenti in ricerca e sviluppo e riducendone la capacità di introdurre innovazione.
Come è già stato possibile constatare nei paragrafi precedenti, la comunicazione tecnica si dimostra un ambito particolarmente soggetto a tali dinamiche e per questo motivo il lavoro svolto, i materiali raccolti e le indicazioni emerse grazie allo sviluppo dei Proof of Concept risultano particolarmente preziose. Questo vale sia in termini di singolarità dell'approccio, che in termini di problem setting, consentendo di individuare e circoscrivere, secondo una modalità abbastanza precisa, quali aspetti dell'uso delle tecnologie immersive presentino cambiamenti e discontinuità; che determinino la necessità di intervenire progettualmente al fine di veicolarne una transizione graduale e potenzialmente più radicata.

La ricerca alla base di questo capitolo riguarda, dunque, come facilitare l'introduzione delle tecnologie immersive nei settori resistenti attraverso approcci design-driven, facendo leva sullo spostamento dell'attenzione verso l'integrazione di sistemi in grado di ottimizzare i processi.

5.1 Framework sperimentale

La volontà di indagare su come rendere le esperienze immersive più fruibili e facilitarne l'adozione in ambito industriale ha condotto ad un riesame approfondito, attraverso uno sguardo maggiormente tecnico e l'approccio trasversale tipico della disciplina del design, degli impatti positivi e negativi emersi dalle osservazioni sul campo dei Proof of Concept precedentemente trattati. Lo studio, mirando all'individuazione dei fattori che favoriscono oppure osteggiano l'impiego degli strumenti in esame, ha guidato la definizione di sette categorie che descrivono gli elementi più incisivi, riguardo l'efficacia delle esperienze che sfruttano la realtà estesa.

Innanzitutto occorre comprendere se lo sforzo per condurre l'approfondimento proposto è legittimato da eventuali benefici che attestino il valore aggiunto dei sistemi esaminati.
Il primo tema che si evidenzia è presente, secondo modalità e metriche differenti, in tutte e quattro le esperienze, e riguarda l'aspetto della valutazione, richiesta di base per ciascuna delle sperimentazioni. Questa si è dimostrata fattibile e rilevante, in quanto ha contribuito a provare l'attendibilità di tali esperienze quali simulazioni significative in termini di misurazione dei parametri, come ad esempio le tempistiche di esecuzione e l'esattezza delle risposte ottenute, secondo valori paragonabili a quelli ottenibili con test in ambienti reali (Heinonen, 2023).Allo stesso tempo, le valutazioni incidono sul grado di engagement degli utenti,

i quali, stimolati dalle dinamiche caratteristiche della gamification hanno presentato una notevole propensione alla sfida e all'ottenimento del risultato "numericamente" migliore.
Il coinvolgimento, secondo tema, risulta enfatizzato dalla sensazione di realismo che le esperienze immersive sono in grado di trasmettere, poiché la presenza di elementi verosimili all'interno dell'ambiente tridimensionale digitale, consente all'utente di confermare quanto immaginato a priori, creando una sorta di ancoraggio che permette il consolidamento di un modello mentale aderente alla realtà, che induce azioni quanto più naturali possibili (Witmer & Singer, 1998).
In ultima istanza, interviene il contributo della multimodalità sensoriale e delle sinestesie che trovano differenti riscontri in letteratura, tuttavia testate all'interno delle sperimentazioni solamente in combinazioni basiche, sfruttando principalmente gli apparati visivo-uditivo e visivo-tattile. L'audio spaziale si rivela particolarmente prezioso per i progettisti nella descrizione di ambienti virtuali che ricalchino spazi notoriamente rumorosi. Quello delle officine ne un esempio, poiché oltre ad influire sulla sensazione dell'utente di trovarsi nel luogo effettivo, insiste positivamente sulla possibilità di fornire informazioni non visuali importanti riguardo il posizionamento all'interno della scena. Non secondaria, è l'occasione di introdurre componenti di alterazione dell'attenzione, sia richiamandola che distraendola, accrescendo il carattere simulativo dell'attività riprodotta. Anche se già descritto a più riprese in questo contributo, il tocco, o meglio la sua duplicazione fittizia, riveste un ruolo di crescente importanza, impattando positivamente sulla percezione generale di un'esperienza astratta, consentendone di facilitarne l'interiorizzazione e l'azione.
Inoltre l'associazione di stimoli tattili a controparti visive, come dimostrato dal progetto dedicato allo studio dell'aptica, incrementa sensibilmente la capacità di riconoscere oggetti e comportamenti (Zannoni et al., 2025).

valutazione

validità delle simulazioni
misurazioni sempre richieste
sfide & gamification

realismo

coinvolgimento
modello mentale comune
azione naturale

multimodalità sensoriale

conferma presenza elevata
l'importanza del tocco
percezione del discomfort

Fig. 27 Fattori positivi dell'utilizzo degli approcci immersivi nell'ambito dell'apprendimento industriale

Alla luce di quanto rilevato, è possibile riconoscere i benefici e le potenzialità positive che l'impiego della realtà estesa può offrire nell'ambito dei processi di creazione e trasferimento della conoscenza, motivando, perciò, l'ulteriore approfondimento relativo alle cause che ne comportano una barriera all'utilizzo.

Il primo fenomeno da menzionare riguarda i limiti tecnologici, per quanto possa sembrare paradossale in un'epoca in cui gli sviluppi sono continui e vertiginosi, non possono passare sottotraccia le difficoltà di installazione e la scomodità nell'indossare gli apparati strumentali necessari, rilevata costantemente durante le interviste a seguito delle sperimentazioni. Agli ingombri e alle complessità afferenti all'ergonomia, si affiancano tuttavia, anche criticità legate al peso computazionale delle scene che spesse volte

impone semplificazioni importanti affinché la fluidità delle esperienze possa essere garantita, trattandosi di requisito fondamentale per quanto riguarda la gradevolezza delle esperienze e, ancor più, evitare gli effetti della motion sickness (Doolani et al., 2020).
Si specifica, che questa notazione non ha il fine di demonizzare l'utilizzo di strumenti, in realtà, estremamente sofisticati e ben progettati, bensì sottolineare le potenzialità ancora inespresse di questi sistemi, suggerendo uno sguardo fiducioso negli ulteriori sviluppi futuri, come contromisura alla mancanza di significatività percepita dal pubblico di non addetti ai lavori di tali soluzioni, quale conseguenza principale di questo primo aspetto. In secondo luogo, il framework di sviluppo necessario alla creazione delle esperienze immersive, può rappresentare un'altra fonte di criticità, in modo particolare nel campo della comunicazione tecnica che, ancora per il momento, non include figure adeguatamente formate e le competenze specifiche di programmazione necessarie (Morosi et al., 2018), sottolineando ancora una volta quanto, il maggior sfruttamento della realtà estesa sia strettamente relazionato ad aspetti organizzativi, infrastrutturali e culturali da trasformare. Forse, meno percorsa in letteratura ma di altrettanto, se non maggiore interesse, la considerazione che la presenza nel gruppo di sviluppo di esperti programmatori e 3D artist non sia altresì sufficiente, perché al fine di ottenere prodotti formativi coerenti ed efficaci, occorre una buona conoscenza delle procedure da replicare e delle prassi specifiche da riprodurre, rendendo indispensabile anche una componente di esperienza reale utile all'armonizzazione dell'intero sistema-servizio.

Le criticità descritte possono essere raggruppate in fattori esogeni alle esperienze, i quali, sebbene influenzino negativamente l'adozione dei sistemi immersivi, come testimoniato dallo sviluppo dei Proof of Concept, non rappresentano ostacoli insormontabili. La ricerca causale, si è dunque concentrata sull'analisi e la circoscrizione della rosa di elementi endogeni che impattano direttamente l'aspetto della fruibilità dell'immersione virtuale.

Il terzo elemento riscontrato verte sulla mancanza di alfabetizzazione relativa a come i dispositivi per l'XR debbano essere utilizzati (Fast-Berglund et al., 2018).
Ciò è determinato da una concausa di fattori, tra i quali il tema generazionale degli utenti, che vede registrare difficoltà nel disimpegnarsi da parte di diverse figure coinvolte appartenenti a fasce antecedenti alla generazione Z, che non presentano spiccate propensioni per l'ambito videoludico. Questo particolare è utile ad introdurne altri due strettamente legati tra loro, come per ogni tipologia di attività, l'esercizio svolge un ruolo fondamentale per apprendere dinamiche di funzionamento e acquisire dimestichezza nella pratica, pertanto quando questo viene meno, la capacità di interagire e intervenire consapevolmente (agency) sui sistemi in utilizzo si riduce sensibilmente. Emerge così, come gli individui che utilizzano costantemente strumenti digitali siano facilitati nell'interpretare intuitivamente quanto viene richiesto dalle esperienze virtuali, viceversa, chi non presenta le stesse qualità, mostra la legittima necessità di essere istruito in questo senso, tramite ad esempio spiegazioni ed esercitazioni dedicate. Proprio in questo punto sorge un'ulteriore criticità, questa volta di carattere culturale, che vede nell'effetto alone generato dal "wow-effect" che spesso gli ambienti virtuali immersivi inducono, una tendenza a sottostimare la complessità di utilizzo di tali approcci da parte dei non addetti ai lavori e, di conseguenza, a non prevedere sufficienti momenti di formazione (Daniel Kahneman, 2013).

L'ultimo aspetto rilevato concerne i limiti di usabilità, che si rivela estremamente significativo poiché incide direttamente sulle percezioni di immersività e presenza delle scene, inficiando il beneficio più sostanzioso nello sfruttamento di queste tecnologie. A questa categoria, dunque, appartengono gli aspetti che afferiscono ai modi d'uso e alle funzionalità delle esperienze che producono frustrazione nell'utente, ostacolandone

in questo modo la comprensione e l'assimilazione del contenuto e, allo stesso tempo, rendendo ai loro occhi respingenti queste tipologie di approccio (Uva et al., 2018). Ad alterare lo stato dell'utente, oltre al delicato rapporto tra la costanza del supporto attraverso la fornitura delle guide e la contemporanea necessità di lasciare quanta più autonomia di azione possibile, si aggiunge la mediazione e la possibilità di interagire con la scena in modo artificioso, tramite l'utilizzo di un controller. Questa peculiarità, sebbene comune e necessaria si è notevolmente distinta come generatrice di incomprensioni e malfunzionamenti legati alla distorsione dell'affordance naturale degli oggetti presenti nell'ambiente e, non secondaria, la necessità, talvolta di introdurre dinamiche di azione fittizie che assomiglino solo parzialmente alle gestualità reali, ma inibite dall'impossibilità di muovere liberamente le mani in quanto impegnate dall'impugnatura dei dispositivi di comando.

no alfabetizzazione	**framework sviluppo**	**limiti usabilità**	**limiti tecnologici**
limiti generazionali no esercizio, no abilità effetto wow	competenze specifiche organizzazione dati necessità esperienza reale	frustrazione non esperti mediazione di controller dinamiche fittizie	indossabilità peso computazionale affordance

Fig. 28 Fattori critici nell'utilizzo degli approcci immersivi nell'ambito dell'apprendimento industriale

Durante il processo di riflessione critica sugli aspetti sopracitati, le cause definite endogene, sono state valutate come maggiormente rilevanti sia in termini di impatti, che per margini di approfondimento, favorendo un'ulteriore delimitazione del perimetro di indagine verso il quale indirizzare la ricerca. Al fine di individuare possibili alternative per vincere o comunque contenere la resistenza osservata, trattandosi di interiorizzare un'esperienza di apprendimento, si è cercato di elaborare un modello di sintesi che descrivesse in che modo si sviluppano i processi di passaggio della conoscenza aumentati dalle tecnologie estese. Ne deriva una mappatura scandita dalla ripresa delle fasi di trasferimento che mira a mettere in relazione i diversi livelli sui quali le esperienze si articolano con i flussi di maturazione delle competenze sviluppate.

Dal lavoro condotto scaturisce la mappatura mostrata nella figura 28, che estende l'utilizzo delle fasi di interazione degli utenti con l'AI, teorizzata da Long (2024), ad un impiego più generale adatto alle tecnologie digitali avanzate. Ne deriva come delle tre fasi: familiarizzazione, comprensione e personalizzazione, la prima presenti lo scarto maggiore tra intervento tecnologico e competenze dell'utente, suggerendo come proprio in questo frangente si manifestino e diffondano prevalentemente le criticità legate all'usabilità delle esperienze. In questo senso, suggestiva è la visione della realtà estesa come sovrapposizione senza soluzione di continuità del mondo digitale a quello fisico, quale portatrice di un nuovo livello di allucinazione nella nostra nuova esistenza ibrida, a cavallo tra online e offline (Gibson, 1984). Proprio durante la fase di familiarizzazione l'utente fronteggia il bivio che lo pone di fronte all'interiorizzazione o meno dell'esperienza che ne determina, nel primo caso la comprensione e il regolare decorso dell'apprendimento, o al contrario, la permanenza dell'allucinazione e distaccamento da quanto esperito e progettato.

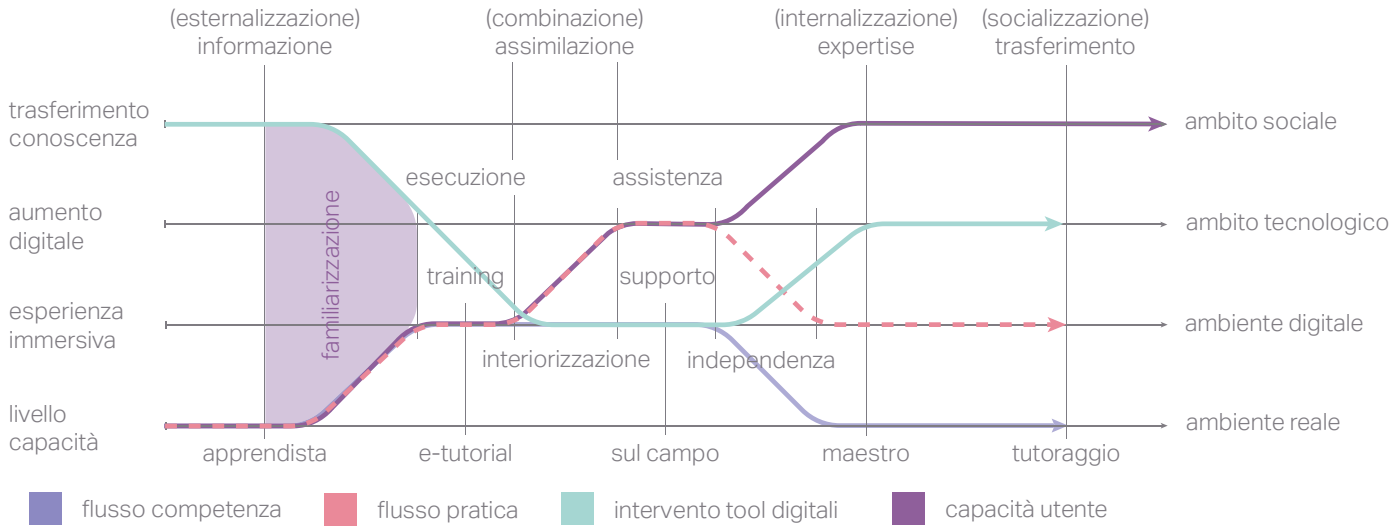


Fig. 29 Visualizzazione dell'evoluzione del processo di apprendimento mediato dalle tecnologie immersive

Al verificarsi di quest'ultima dinamica, può contribuire la soggettività dell'utilizzatore, come già visto per la propensione, strettamente dipendente dalla ridotta dimestichezza alle interazioni digitali assimilata, oppure a fattori comunicativi intrinseci allo scenario virtuale. A tale proposito risulta stimolante aprire una parentesi sul lavoro di De Souza (1993) riguardante la valutazione del concetto di comunicabilità basato sull'interpretazione dei segni. Nell'ambito di un approccio semiotico all'HCI essa affronta la questione di come il significato risieda nella mente dell'osservatore, sottolineando anche i modi in cui le interpretazioni possono essere motivate dalla forma e dal contesto.
Secondo la premessa descritta, la situazione delle affordance strategiche risulta ancora più significativa traghettando l'attenzione dei designer sull'eventualità che gli utenti potrebbero non percepire o interpretare erroneamente il valore della tecnologia o del contenuto incorporato nell'applicazione, potenzialità che può portare nell'ambito del mercato, i clienti a scegliere l'applicazione di un concorrente o, come in questo caso indurre gli utenti a non mantenere l'impegno nella formazione e nell'apprendimento virtuale (de Souza et al., 2000).

La frammentazione della comunicazione rientra, di conseguenza, nelle problematiche dirette nei processi di trasferimento le cui interruzioni rappresentano discontinuità critiche da sormontare e limitanti per l'esperienza di apprendimento. Ciò suggerisce che le difficoltà di familiarizzazione e di usabilità dei sistemi influiscano pesantemente sulla buona riuscita del passaggio di conoscenza. Nel tentativo di comprendere meglio questo fenomeno, si è cercato di approfondire, attraverso la mappatura che segue (Fig. 29), il flusso comunicativo che si pone dietro ai processi di trasferimento aumentati mediante una visualizzazione sintetica fondata su un loop circolare scandito da una logica ricorsiva basata sulle seguenti fasi: input - elaborazione - feedback (quale input successivo).

Lo schema è strutturato secondo tre distinti livelli di interazione che si concentrano progressivamente, il primo riguarda la comunicazione tra gli individui in ambienti reali, il secondo riguarda gli scambi tra individui e ambienti di apprendimento virtuale, mentre il terzo interessa la relazione tra gli individui e le singole componenti digitali che costituiscono l'ambiente immersivo. Al fine di completare il quadro strutturale della rappresentazione, occorre fornire come ulteriore chiave di lettura, utile alla contestualizzazione di questo approfondimento nel framework della ricerca sull'evoluzione dell'affordance nel passaggio dal reale al virtuale, che il layer inferiore introduce nella riflessione l'affordance degli oggetti virtuali, trattata nel corso della prima sezione.

Fig. 30 Rappresentazione schematica del ciclo di retroazione tra conoscenza condivisa e soggetto apprendista

Il secondo livello, invece, innesta la questione dell'affordance nei sistemi complessi che, nonostante incrementi l'entropia dei temi affrontanti dalla ricerca condotta, emerge come tema portante in materia di comprensione delle esperienze di apprendimento immersive, pertanto caratterizzante nel proseguo del lavoro.

Per mezzo di questo modello, è possibile immaginare come, per la buona riuscita dei trasferimenti, il flusso debba necessariamente svilupparsi in modo continuo e che ogni eventuale interruzione ne implichi, invece, l'insuccesso. In questi termini, si è resa indispensabile, l'identificazione delle dinamiche, che agendo sui differenti livelli, possono provocare interruzioni nel ciclo. Per quanto riguarda il livello superiore, le cause afferiscono prevalentemente a gap connessi a fraintendimenti tra le parti che possono dipendere da difficoltà di dialogo tra le parti oppure, come assimilato dalla seconda sezione, di carattere organizzativo. Sul piano intermedio, dunque al livello dell'affordance di sistema, trovano collocazione le difficoltà di familiarizzazione e di usabilità che incidono negativamente sul rapporto tra individuo e ambiente immersivo, in quanto l'input che esso riceve quale feedback determinato della progettazione a monte dell'esperienza genera un'informazione non sufficientemente significativa, che limita la comprensione e l'assimilazione del contenuto, influenzando sfavorevolmente la consapevolezza dell'utente ad agire all'interno della scena e impattando negativamente sul layer inferiore, strettamente connesso al precedente. L'individuazione della mancanza di consapevolezza nell'azione di input come deriva delle criticità di usabilità dei sistemi immersivi, ha indirizzato l'approfondimento in letteratura del tema del controllo e dell'esame di come i dispositivi che ne consentono l'esercizio siano evoluti ad oggi.

In sintesi, la trasformazione dei sistemi di interazione digitale ha seguito traiettorie che, a partire dalle prime forme di relazione uomo-strumento, hanno progressivamente ridefinito il ruolo dei controller, aprendo la strada a modalità sempre più complesse, e sfumate, di mediazione tecnologica. Come osservato nella letteratura più recente, il passaggio dal pulsante come simulazione di un salto, un "come se", fino ai controller mimetici capaci di indurre un "proprio come" (Jorgensen, 2013), segna il superamento della distanza morfologica tra gesto e azione virtuale, e configura la nascita di un paradigma in cui l'imitazione e l'embodiment diventano centrali (de Castell et al., 2014).

Durante questa traslazione si innesta ad esempio, in un quadro epistemologico più ampio, la Actor-Network Theory (Latour, 2005), che enfatizza il ruolo dei mediatori non-umani nel plasmare reti socio-tecniche, rivelando come gli artefatti tecnologici non siano meri strumenti passivi, bensì attori che contribuiscono a ridefinire pratiche e significati (Giddings, 2005; Vignali et al., 2024).

In tal senso, l'evoluzione dei controller evidenzia la necessità di concepire il rapporto uomo-macchina come processo dinamico di co-costruzione, in cui l'apprendimento e il trasferimento delle competenze si basano sull'intreccio tra affordance, agency e pratiche incarnate (Gee, 2003; Vignali et al., 2024).

Il concetto di transfer assume qui un valore centrale: la capacità di trasporre abilità e conoscenze da un contesto all'altro, rappresenta non solo un obiettivo istruttivo, ma una condizione necessaria per la sopravvivenza stessa dei sistemi di formazione immersiva (Weigel et al., 2022). Attraverso i meccanismi di trasferimento, l'esperienza acquisita tramite l'imitazione, la prova e l'errore all'interno di un ambiente simulato, può tradursi in competenze operative, pronte a essere applicate in contesti reali e non più confinati alla dimensione fittizia del gioco o della simulazione stessa (Limbu et al., 2018).
La riflessione sui controller diventa, allora, occasione per esplorare il continuum che va dall'uomo-strumento all'uomo-controller e oltre, verso interfacce cervello-computer (BCI) fondate sul rapporto diretto tra corpo e macchina.
La prospettiva antropologica ottocentesca, che definiva l'essere umano come "tool-user", ha ceduto il passo nel XX secolo all'idea dell'uomo come tool-maker, fino ad arrivare oggi a un orizzonte in cui l'essere umano stesso, trasformandosi, diventa parte integrante del sistema di controllo (Flaviano Celaschi & Casoni Giorgio, 2020).

L'embodiment dei dispositivi AR e VR non si limita più a essere indossato, ma si integra con la propriocezione e con i circuiti di retroazione comportamentale, ridefinendo la percezione del sé e dell'azione (Dourish, 2001).
A questo proposito, i recenti sviluppi delle interfacce BCI non invasive delle tecnologie di surface electromyography (sEMG) e, in particolare, delle interfacce non visive, come dimostrato dal crescente numero di casi studio presenti in letteratura e sul mercato, delineano scenari di trasformazione significativa. Dispositivi indossabili al polso, capaci di rilevare micro-attivazioni muscolari, permettono input volontari che non richiedono manipolazione fisica di controller tradizionali e si configurano come soluzioni sicure, ergonomiche e accessibili (Jacquemin et al., 2024); inoltre, la possibilità di eseguire gesti minimi, invisibili a osservatori esterni, apre a forme di interazione più discrete e inclusive (Farahany, 2023).

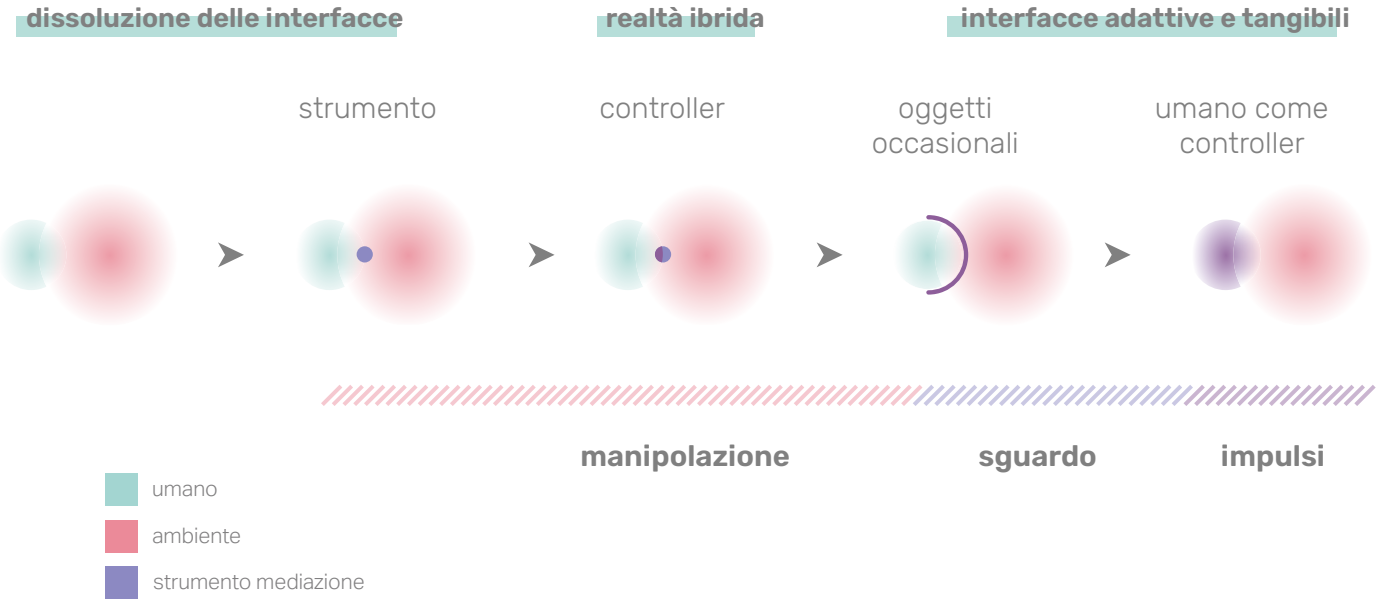


Fig. 31 Interpretazione visuale del continuum evolutivo dell'interazione uomo-ambiente virtuale

Nello scenario appena descritto e rappresentato, l'evoluzione dell'interazione da uomo-oggetto a uomo come controller, supportato dall'introduzione di sistemi di input non visuali, segna una traiettoria che non solo riflette lo sviluppo tecnologico, ma esprime una più ampia trasformazione culturale e cognitiva. La relazione con le macchine non è più circoscritta al dominio dell'uso, ma diventa parte di un ecosistema collaborativo multi-agente, in cui l'azione è distribuita, la responsabilità condivisa e la conoscenza continuamente trasferita e rielaborata (Leng et al., 2022; Vignali et al., 2024).

In questo senso, un'ulteriore conferma dell'urgenza di tali riflessioni deriva della prospettiva dell'Industria 5.0, dove l'inclusione di interfacce non visuali e multimodali nei processi formativi e produttivi, potrebbe rappresentare non soltanto una scelta tecnologica, bensì una strategia per valorizzare le capacità umane, ampliandone i confini in direzione di un'interazione sempre più simbiotica con i sistemi intelligenti.

5.2 Elaborazione e traduzione progettuale

Come introdotto nel paragrafo precedente, i sistemi di input e controllo stanno mostrando una forte tendenza all'embodiment, o incorporazione, con interesse assumibile a "forma di conoscenza somatica non concettuale"(Longo et al., 2008).
Questa dinamica contribuisce attivamente a delineare un nuovo scenario nel panorama dell'interazione, caratterizzato dalla progressiva dissoluzione delle interfacce visive, a vantaggio di sistemi che sfruttano forme di sensorialità altre, come nel caso dei comandi vocali e dell'aptica (Dash et al., 2020). Tutte le tecnologie di input, quindi, pongono i nostri corpi in circuiti di feedback con i computer che, quanto più la tecnologia è integrata e invisibile, tanto più stretto diventa il circuito di retroazione e, di conseguenza, tanto più facile è assorbire la macchina nella propria identità; in questi termini, riprendendo la figura 30, è possibile immaginare lo sviluppo verso il basso della spirale fino al raggiungimento di una convergenza finale unica tra input, sistema di controllo e individuo, quale raffigurazione di questo fenomeno. Quando un input raggiunge un livello così elevato di incorporazione da rendere difficile distinguere il sistema-dispositivo dal sé, diventa naturale assimilare i comportamenti e i malfunzionamenti dei dispositivi nella nostra esperienza corporea, rappresentando una sfida complessa per l'interaction design (Cortese, 2024). Su questo piano, acquisisce importanza introdurre nella considerazione anche la pervasività e intrusività degli input, i quali, se da un lato fisiologico tendono ad essere sempre più percettivamente ingombranti, a causa della loro vicinanza e sovrapposizione all'individuo, dall'altro, coerentemente con quanto riscontrato in termini di dissoluzione, mettono in risalto una ricerca di soluzioni che possano smussarne gli impatti, rendendoli i più silenziosi e naturali possibili (Case, 2015; Kettner et al., 2017).
Sono distinguibili sostanziali differenze negli approcci di interazione incorporata, ad esempio sono in esame tecnologie atte allo stimolo dei nervi tramite impulsi elettrici, generando eventi di azione forzata utili in applicazioni di HCI a ciclo chiuso, ad esempio per il supporto alla navigazione o per il miglioramento dei feedback nei videogiochi e interazione involontaria uomo-uomo. Le interfacce in questione sono ancora in fase di sviluppo, ma forniscono una prima validazione dei miglioramenti perseguibili nell'accuratezza di esecuzione dei compiti da parte degli agenti umani (Hundia et al., 2020).
In direzione opposta, invece, gli sviluppi orientati all'implementazione di segnali vibratori "sottili" sfruttati a carattere simulativo o induttivo, come nel caso del miglioramento della funzione cognitiva mediante regolazione delle emozioni e riduzione dello stress attraverso feedback aptici che riproducono il battito cardiaco, dimostrano quanto la frequenza di tali suggerimenti produca cambiamenti positivi a livello cognitivo, fisiologico e comportamentale.

Gli esempi riportati, aiutano ad esemplificare alcuni caratteri che le interazioni immersive potrebbero assumere in futuri non troppo distanti. I casi di studio, suggeriscono una fattibilità già presente, tuttavia l'implementazione diffusa in ambiti più comuni è tutt'altro che imminente, infatti, tornando al campo industriale, la norma ad oggi, annovera ancora uno stato di utilizzo prossimo alla dinamica uomo-controller, che come già discusso presenta molteplici complessità.
Partendo dal framework evolutivo individuato, facendo convergere l'esigenza di facilitare la fruibilità delle esperienze immersive in combinazione alle logiche dell'anticipazione, si è distinta la fase intermedia caratterizzata dall'occasional object (Gong et al., 2023) quale momento transitorio di trasformazione o, rubando i termini dal mondo della programmazione sliding window, all'interno del quale collocare un intervento progettuale teso a sperimentare e sviluppare un sistema di trasferimento delle informazioni in grado di fungere da sistema di mediazione della conoscenza e, al tempo stesso, capace di traghettare il virtual learning, dallo stato attuale a quello futuro plausibile e auspicabile descritto in precedenza.

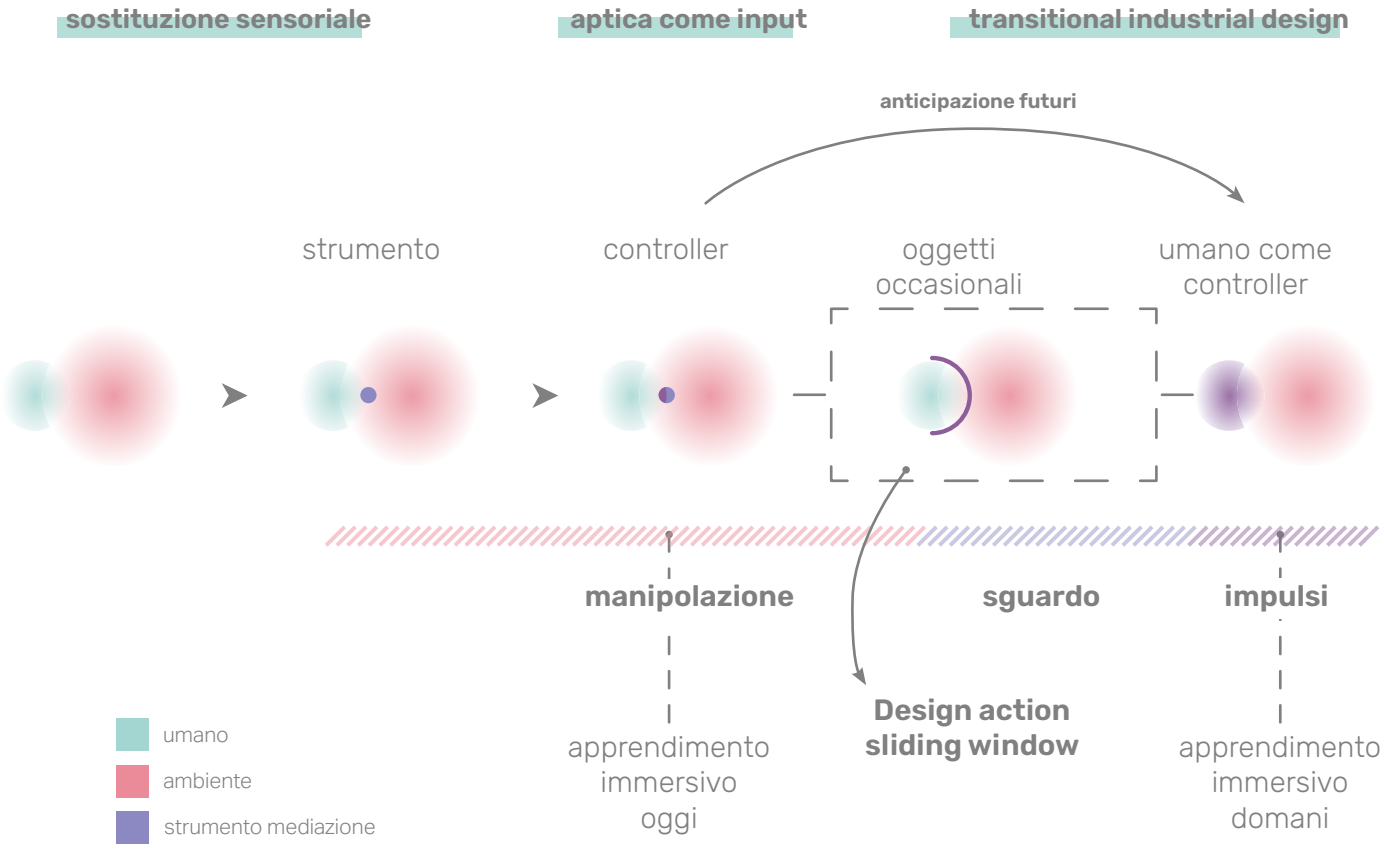


Fig. 32 Finestra di intervento progettuale per la transizione nel continuum evolutivo dell'interazione uomo-ambiente virtuale

Seguendo la direttrice individuata, la ricerca sulle interfacce tangibili adattive e sulle gestualità a mezz'aria sottolinea la pervasività della necessità di sostanziare le esperienze virtuali, nonostante muovano in contesti virtuali immateriali, e di superarne i limiti dell'assenza di feedback tattile, introducendo elementi fisici che possano ricreare parte della sensorialità perduta (Bouzbib et al., 2025; Campenhout et al., 2020; Dyck et al., 2020; Gong et al., 2023). Inoltre, l'integrazione di componenti aptici e tattili, sebbene mostri ampi margini di perfezionamento, evidenzia l'esigenza di mantenere un legame con l'affordance naturale degli oggetti, rendendo più intuitivi e sostenibili i processi di apprendimento immersivi (Ma et al., 2024).

Dall'analisi dei casi di studio riguardanti l'utilizzo dell'aptica in contesti informativi, appare in modo evidente la prevalenza di utilizzo nell'ambito della guida spaziale.
Numerosi studi hanno dimostrato che il supporto vibrotattile, può migliorare, anche sensibilmente, l'orientamento nello spazio e la rapidità nell'individuare un target, ne sono un esempio gli studi di Hsieh et al. (2019) i quali hanno contribuito ad evidenziare come interfacce indossabili sulla mano, abbinate a segnali aptici, possano facilitare compiti di target finding nel mondo reale, riducendo errori e tempi di esecuzione, oppure attraverso TactileGlove (Günther et al., 2018), dimostrando come la navigazione tridimensionale guidata da feedback vibrotattile migliori la consapevolezza spaziale e supporti in particolare utenti con limitazioni visive.
La letteratura, inoltre, annovera anche altri importanti contributi specializzati sull'indagine delle strategie specifiche di guida, come le metafore grasp-based, in cui vibrazioni localizzate riproducono la sensazione della forza di gravità per suggerire l'orientamento della mano (Baldi et al., 2020) confermando che approcci in queste direzioni possono ridurre lo sforzo mentale e fisico percepito e, al contempo aumentare la precisione nei compiti di manipolazione. Nello stesso solco si colloca il lavoro di Tajdari (2025), che mettendo a confronto differenti tecniche di guida vibrotattile, su tutte worst-axis e push-pull, mira ad individuare quale analogia funzionale riscontri la maggiore comprensibilità e intuitività, offrendo indicazioni preziose relative alle modalità più opportune di traduzione delle informazioni in stimoli vibrotattili.

A partire da questi elementi di base, l'ipotesi operativa presentata in questo elaborato, consiste nello spostare il baricentro dall'indicazione del dove (navigazione) alla codifica del come (gestualità e azione), cercando di mantenere l'attenzione dell'utente sull'ambiente fisico e alleggerendo il canale visivo, il più frequentemente saturo, mediante un canale non-visuale capace di portare "micro-istruzioni" prossimali alla mano che agisce.
Questo passaggio riflette l'evoluzione delle ricerche sulla multimodalità e sulla necessità di alleggerire il carico cognitivo dell'operatore.
Gli studi in materia riportano i benefici della combinazione di guida visiva e vibrotattile nel migliorare le prestazioni di esecuzione, riducendo errori e tempi di risposta (Wang et al., 2024). Tale evidenza suggerisce l'utilizzo più sofisticato della vibrazione come supporto per la gestione di procedure complesse, l'ambito della formazione per operazioni in "glovebox" approfondite da Hornsby et al. (Hornsby et al., 2025) fornisce un'ulteriore prova, avvalorando come la vibrazione possa scandire i passaggi di una sequenza procedurale, fornendo segnali tattili che supportino la memoria operativa e facilitano la conformità alle istruzioni. Un ulteriore passo in avanti in termini di complessità e possibilità, è introdotto dai dispositivi aptici a variazione di bordo, i quali consentono di percepire istruzioni di costruzione, qui il feedback tattile diventa linguaggio capace di comunicare cambi di forma, direzione o forza necessaria, trasformando ancora una volta la guida da indicazione spaziale a suggerimento motorio specifico (Tashiro et al., 2024).
Dal punto di vista del consolidamento teorico, risulta molto promettente il lavoro svolto nel costruire un quadro di riferimento per interpretare l'aptica come esperienza multilivello, integrante aspetti percettivi, cognitivi e contestuali (Dalsgaard & Schneider, 2025).
Il modello presentato consente di leggere la vibrazione non più come evento isolato, ma come parte di un ecosistema informativo che dialoga con le altre modalità sensoriali, favorendo un apprendimento situato e sostenibile.

Nonostante siano numerosi i progressi riportati, persistono tuttavia alcune criticità.
Uno dei principali limiti riguarda l'ampiezza del "vocabolario aptico", ancora circoscritto a pochi pattern, quindi poco adatto a codificare informazioni complesse o sequenziali. Inoltre, la difficoltà di disporre di feedback aptici continui e ricchi può compromettere la naturalezza dell'interazione, generando frustrazione o richiedendo addestramenti lunghi.

Dagli sforzi profusi nel tentativo di superare tali barriere, provengono un paio di soluzioni altresì meritevoli di attenzione, in quanto le "skin-attached haptic patches", mirano ad un'interazione tattile a più alta risoluzione, dunque, versatile e localizzata, adattabile a diverse parti del corpo e potenzialmente più discreta rispetto ai guanti tradizionali (Youn et al., 2025). L'introduzione di modelli generativi come elaborato nel progetto HapticGen, invece, contribuisce a rendere più agile la progettazione di tali stimoli, traducendo automaticamente descrizioni testuali in pattern vibrotattili coerenti, quindi creando librerie di feedback riutilizzabili e adattabili a diversi contesti industriali (Sung et al., 2025). L'attenzione alle criticità e i lavori indirizzati alla loro risoluzione, rappresentano quindi un forte segnale di interesse e potenzialità di sviluppo attorno al tema della guida gestuale attraverso stimoli vibrotattili, incentivando la prosecuzione della ricerca in tale ambito progettuale. In continuità con quanto riscontrato in letteratura, l'evoluzione proposta interpreta la vibrazione come evoluzione da marker di direzione, a linguaggio di azione: un canale prossemico e tattile che innesta nell'apprendimento tecnico l'equivalente di un "allenatore sulla mano", capace di suggerire la gestualità, aumentare la confidenza situazionale e sostenere la riproducibilità di processi complessi di montaggio e manutenzione. Si tratta di un passaggio dalla navigazione alla istruzione incarnata, in un'aptica task-oriented, che non si limiti a dire "dirigiti lì", ma sussurra "opera in questo modo". Il tema dell'"allenatore in mano" si inserisce come naturale evoluzione della metafora dell'"angelo sulla spalla" descritta da Pham (2021), sintetizzante le applicazioni di Wearable Cognitive Assistance come supporti just-in-time in grado di seguire l'utente passo dopo passo nelle attività. L'integrazione degli stimoli aptici potenzia ulteriormente questa immagine, trasformando il suggerimento esterno in una guida, capace di accompagnare l'operatore direttamente sulla mano e, dunque, sul gesto da compiere, suggerendo potenzialmente modalità d'azione contestuali e situate (Pham et al., 2022).
Proprio in questo passaggio, calando le possibilità offerte dagli stimoli vibrotattili per il suggerimento gestuale all'interno delle esperienze immersive, che l'intervento progettuale assume un ruolo strategico.

Tab. 3 Fasi di utilizzo proficuo degli strumenti per la realtà estesa nel settore manifatturiero, tratto da "A Review of Extended Reality (XR)" (Doolani,2020)

fasi produzione	attività	XR addestramento
introduttiva	training orientamento, training sicurezza, pianificazione	VR, MR
apprendimento	smistamento, selezione, assemblaggio, installazione	VR, AR, MR
operativa	ispezione, inscatolamento, assemblaggio, monitoraggio	MR
tangente	uso utensili elettrici, uso utensili rari	AR, MR
conclusiva	routine pulizia, ispezione	AR, MR

Utilizzando come spunto il lavoro svolto da Doolani (2020), riguardo l'uso degli strumenti XR in contesti industriali è possibile sintetizzare l'applicazione dei tre piani di realtà immersiva nelle rispettive fasi:

_la VR è molto utile nelle fasi introduttive e di apprendimento;

_la MR è la tecnologia più flessibile e potrebbe essere impiegata in quasi tutte le fasi;

_la tecnologia AR, invece, per diventare utile in tutte le fasi necessita di ulteriori sviluppi.

Considerando, in generale, che nell'industria manifatturiera esistono tre tipi di compiti per i quali le persone necessitano di formazione: attività di catena di montaggio, magazzino e compiti discreti (Doolani et al., 2020), la possibilità di intervenire tramite un dispositivo fisico in grado di funzionare trasversalmente in tutti e tre gli ambienti immersivi, associando la capacità di influenzare e stimolare singole attività, si delinea quale occasione di indagine stimolante per impattare positivamente la fruibilità delle esperienze di virtual learning immersivo.

Addizionalmente, la possibilità di utilizzare interfacce non testuali, di conseguenza reading-free, contribuisce ad eliminare i vincoli linguistici, semplificando la produzione di contenuti, aprendo a modalità di training più accessibili. In questa prospettiva, il focus si concentra sull'interazione utente-strumenti, secondo la chiave di lettura del "trasferente" quale traghettatore di conoscenza e guida all'interno dei sistemi complessi. In quest'ottica, il transfer, viene interpretato come la sovrapposizione al significante proprio dello strumento (Norman, 2019), sia esso fisico, sia esso virtuale, di uno strato di informazione costituito dall'impulso vibratorio come suggerimento dell'azione da compiere e come eseguirla. Su questa base si colloca l'ipotesi di sviluppare un sistema di mediazione delle esperienze immersive tramite un oggetto-avatar come condensazione dell'elemento individuato precedentemente dell'oggetto occasionale, capace di adempiere a molteplici funzioni semantiche. Se da un lato ha l'obiettivo di rendere l'utente il controller, cioè, trasformarlo, dall'altro ambisce a semplificarne l'usabilità delle interazioni tramite un elemento che risulti familiare, socialmente accettato, confortevole e non intimidatorio nell'utilizzo (Werrlich et al., 2018). Da questa elaborazione, scaturisce l'ipotesi di prototipare un dispositivo indossabile specializzato sfruttando tecniche e componenti specifiche che coinvolgono tessile, elettronica e software, tenendo in considerazione le diversità dei potenziali utenti e dei loro ambienti (Francés-Morcillo et al., 2018).

In particolare, è stata percorsa la possibilità di realizzare un guanto aptico intelligente costituito sugli insight emersi nelle dimostrazioni e coerenti con la letteratura:

_una interfaccia non visuale consente di concentrare lo sguardo sul compito, riducendo l'overload percettivo che spesso grava sulla UI visiva;

_basandosi su un contesto d'uso estremamente pratico occorre garantire la mobilità dell'utente ed evitare di vincolarne l'utilizzo delle mani, necessariamente impegnate nell'esecuzione delle operazioni;

_l'opportunità di offrire un supporto aptico strutturato che suggerisca la cinematica gestuale corretta nel momento opportuno, diminuendo l'incertezza d'esecuzione e la latenza decisionale (Fast-Berglund et al., 2018; Uva et al., 2018);

_la futura possibilità di essere sviluppato come dispositivo di protezione individuale sull'esempio del caso di studio Vuzix (Vuzix' Smart Glasses, s.d.).

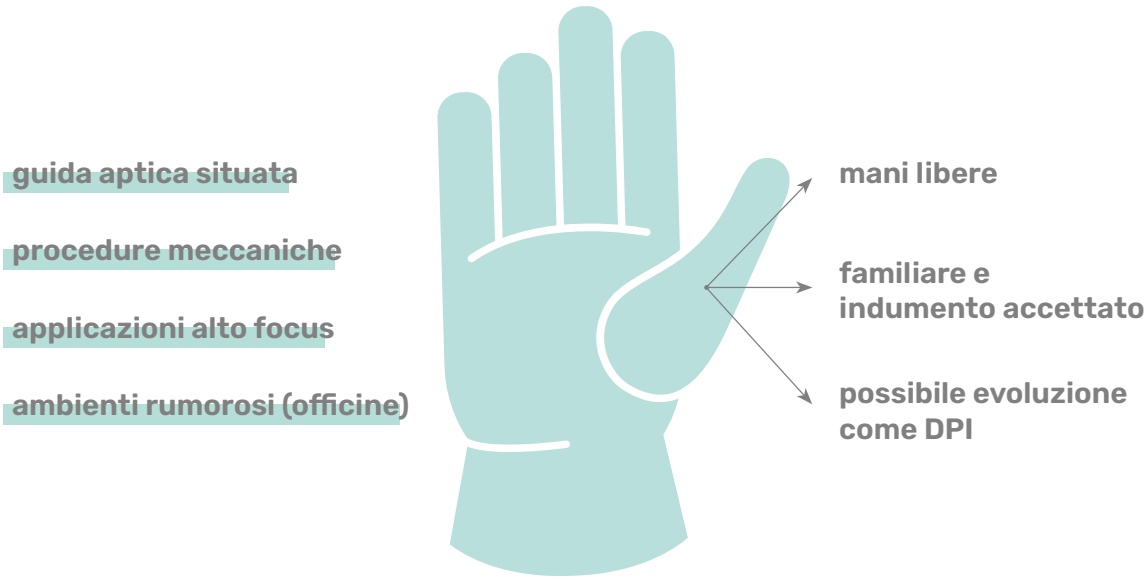


Fig. 33 Guanto come oggetto-avatar per la mediazione delle interazioni nelle procedure operative tramite stimolo aptico

L'ambito di un'interfaccia gestuale per l'HCI è strettamente legato alla corretta modellazione dei gesti della mano (Pavlovic et al., 1997), analogamente, l'input aptico che aumenta il significante attraverso un trigger gestuale, necessita particolare attenzione in fase di designazione al fine di proporre stimoli comprensibili. L'analisi dedicata ai gesti e alla loro possibile traduzione in pattern vibratori muove dallo studio appena introdotto e dal modello di comportamento che induce. Semplificando, i movimenti effettuati dagli arti possono essere suddivisi in non-intenzionali oppure intenzionali, ovvero i gesti. Nell'ambito di questo progetto l'attenzione è posta sui secondi e, in particolare, sui gesti manipolativi in quanto responsabili e necessari all'esecuzione delle operazioni, in questo caso di tipo meccanico. Con l'intento di creare e testare un sistema di suggerimento basato su vibrazioni per il trasferimento delle indicazioni, si è reso necessario un riesame delle procedure osservate e oggetto di lavoro nell'arco del percorso triennale, al fine di individuare ricorrenze e singolarità motorie sulle quali poter incardinare le basi dell'apparato comunicativo e, successivamente, i primi stimoli da mettere alla prova.

Tab. 4 Sintesi delle task analysis effettuate sulle esperienze oggetto di dimostrazione

procedura lock out/tag out VR

N°	operazioni	gesti
1.	spingere bottone	movimento assiale
2.	mettere lucchetto	azione complessa
3.	girare chiave	rotazione
4.	aprire porta	trattenere
5.	chiudere valvola	rotazione
6.	prendere oggetto	afferrare
7.	spingere bottone	movimento assiale

training sicurezza VR

N°	operazioni	gesti
1.	spingere bottone	movimento assiale
2.	chiudere schermo	trattenere
3.	chiudere porta	trattenere
4.	prendere flacone	afferrare
5.	fare screenshot	azione complessa

simulazione magazzino VR

N°	operazioni	gesti
1.	prendere scanner	trattenere
2.	prelevare dado	afferrare
3.	chiudere busta	trattenere
4.	spingere bottone	movimento assiale

L'approfondimento, pertanto, è stato condotto individuando le sequenze di attività per ogni procedura e associando a ognuna il gesto elementare più attinente, cercando di restringere il più possibile lo spettro di alternative e ottenendo la rosa di opzioni più importanti su cui sviluppare il lavoro. Come mostrato in tabella 4 si distinguono quattro movimenti fondamentali: afferraggi (grasping/holding); spostamenti (lungo assi x, y); rotazioni (x, y, z,); e movimenti complessi che racchiudono strutture motorie più articolate sia per traiettorie sia per significato dell'azione.

La natura della suddivisione appena presentata non sorprende certamente per innovazione, tuttavia la presenza di un gradiente crescente di complessità, ha condotto all'ipotesi di associare ad ogni cluster un numero incrementale di impulsi vibratori, identificando una prima regola progettuale.

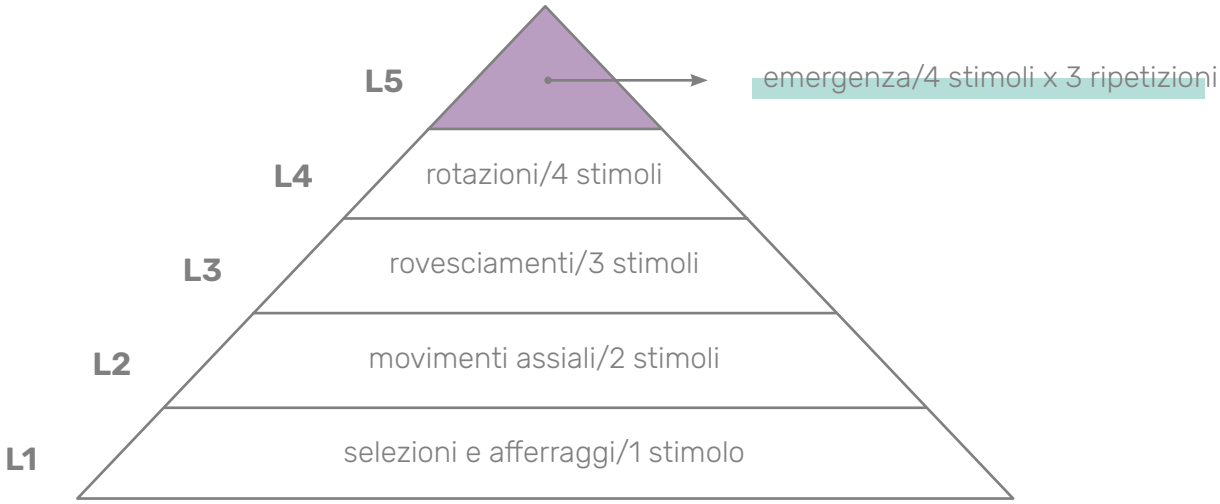


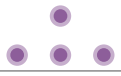
Fig. 34 Rappresentazione del rapporto tra complessità del gesto e articolazione dello stimolo corrispondente

In secondo luogo, è stata cercata una disposizione degli input che potesse risultare rappresentativa delle direzioni da suggerire, inizialmente in questo senso, particolarmente utile si è rivelata il parallelismo con la leva analogica dei joystick, potendo descrivere almeno i quattro cardini e un'informazione extra centrale.
A valle di una riflessione volta all'ottimizzazione del prototipo in termini di complessità, affidabilità e al tempo stesso di ingombri, il layout definitivo è stato configurato secondo la variante n° 3 (Fig. 35), permettendo di ridurre al minimo il numero di punti stimolati, mantenere singole le indicazioni direzionali lungo gli assi x e y, consentendo allo stesso tempo di disegnare sequenze sia cicliche, sia lineari altrimenti non replicabili.

Fig. 35 Evoluzione del layout degli attuatori di vibrazione sul dorso della mano

Alla luce della disposizione individuata e dalla combinazione delle due modalità selezionate, si è proceduto con l'elaborazione dell'alfabeto vibrotattile embrionale da valutare e riportato nella tabella 5 di seguito.

Tab. 5 Tabella di traduzione dei suggerimenti in segnali aptitci

	azione	archetipo strumento	input
L5	emergenza	tutti	
L4	avvitare		
	svitare		
L3	versare a destra		
	versare a sinistra		
L2	spostare avanti		
	spostare indietro		
	spostare a destra		
	spostare a sinistra		
L1	afferrare oggetto sx	tutti	
	afferrare oggetto centro	tutti	
	afferrare oggetto dx	tutti	
	trattenere	tutti	

Rispetto a quanto anticipato nella premessa alla tabella, si specifica l'inserimento di un ulteriore segnale che, in conformità con la capacità dei segnali ritmici di trasmettere sensazioni ed emozioni, anche grazie al meccanismo della metafora, sfruttando la frequenza degli stimoli tattili come suggerimento di una corrispondente densità del segnale o priorità dell'informazione (Dall'Osso & Pezzi, 2022), vede la comunicazione di uno stato di emergenza attraverso l'utilizzo contestuale e a intensità massima di tutti gli attuatori.

5.3 Procedure sperimentali e raccolta dati

Lo sviluppo della campagna di indagine relativa alla possibilità di utilizzare un sistema informativo fondato su un'interfaccia non visuale mediata da stimoli vibrotattili altresì definibile come reading-free, auspica a garantire vantaggi in termini di intuitività e usabilità delle esperienze virtuali e alla possibilità di semplificare in maniera sostanziale la produzione di contenuti, eliminando le componenti testuali e, contestualmente, i gravosi compiti di traduzione.

Pertanto, con il duplice obiettivo di proporre una soluzione che favorisca l'accettazione e l'adozione delle tecnologie immersive nel panorama della comunicazione tecnica e di studiare il potenziale degli haptic triggers come veicolo di significante nelle procedure virtuali si è resa necessaria la realizzazione di una controparte fisica strumentale, già individuata nel prototipo di guanto aptico intelligente.

La fabbricazione del prototipo è stata svolta all'interno dello "Smart Clothing Lab" presso la Aalto University, combinando quanto appreso in materia di Smart wearable durante il periodo di ricerca condotto all'estero. Il dimostratore consiste nell'hackeraggio di un semplice guanto di cotone al quale sono stati applicati sul dorso, in modo da mantenere la libertà di manipolazione e ridurre la possibilità di interferenze o danni derivati dagli strumenti impugnati, quattro attuatori di vibrazione ERM a 3V alimentati e comandati da un Arduino Uno, tramite cavetti elettrici e filamento conduttivo.
La scelta della scheda in questione deriva dalla volontà di prediligere la semplificazione del circuito, a scapito della maneggevolezza del dispositivo, necessariamente collegato via cavo al computer per consentire il trasferimento dei dati.
Entrando nel merito del controllo, i motori di vibrazione sono connessi a quattro PWN per garantire la modulazione dell'intensità di vibrazione attraverso onda quadra, mentre il programma eseguito dall'IDE di Arduino è esteso mediante uno script in Python che ne consente la gestione degli impulsi grazie alla tastiera del computer in utilizzo.

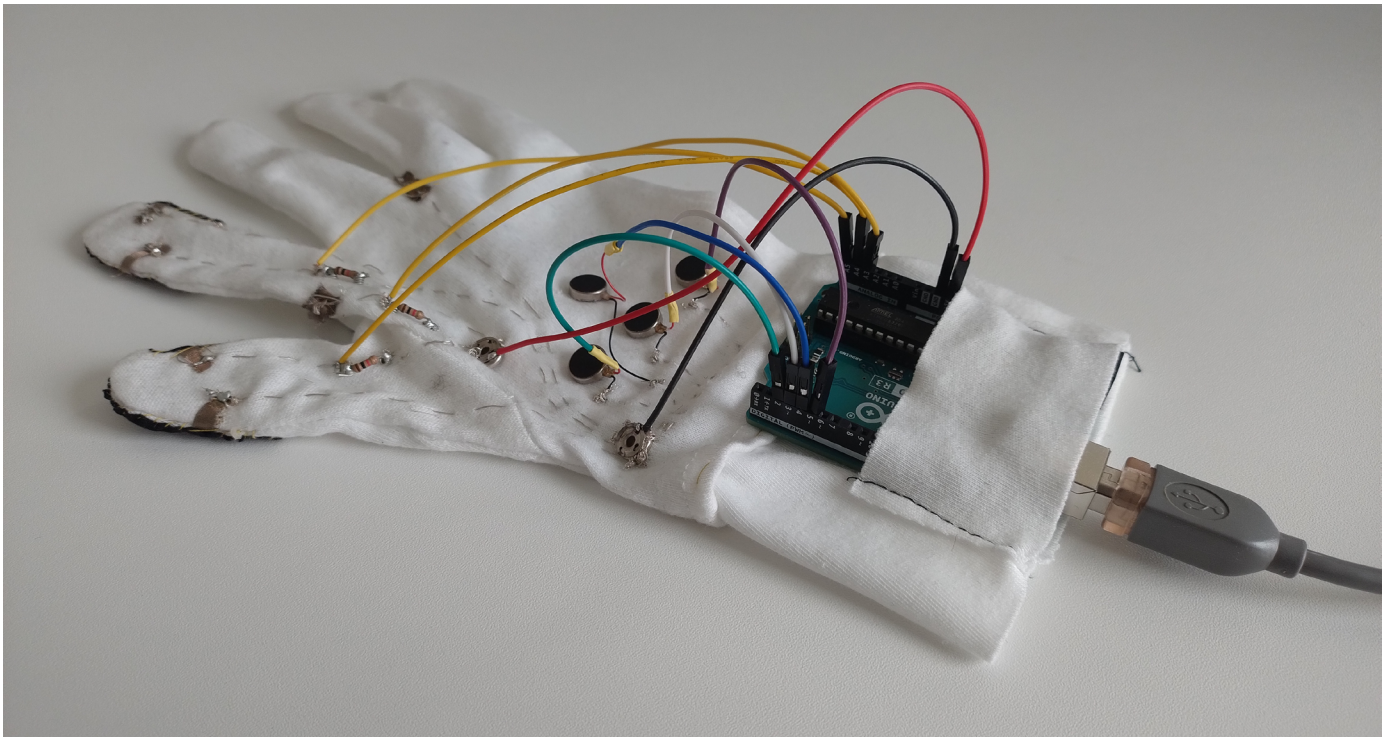


Fig. 36 Immagine del primo dimostratore di guanto per il suggerimento aptico, utilizzato nella prima campagna di test, dai gruppi di utenti G1 e G2

Per osservare l'impatto del suggerimento fornito dall'input aptico nelle procedure virtuali, è stata progettata una campagna di sperimentazione volta a valutare la comprensibilità dello stimolo, la memorabilità del suggerimento e l'accettabilità del sistema proposto. Dal punto di vista esecutivo, oltre a quanto già introdotto, sono stati impiegati un modulo di raccolta del consenso alla partecipazione alla sperimentazione e un questionario da sottoporre a ciascun utente al termine di ogni prova per valutazione di alcuni aspetti specifici e raccogliere idee e possibili miglioramenti con cui integrare l'indagine (Zammuner, 2000).

La sperimentazione è stata strutturata secondo due fasi: la prima, finalizzata al system setting, ovvero all'ascolto delle impressioni e dei suggerimenti degli utenti riguardo al possibile significato dei segnali aptici proposti in relazione agli oggetti con cui possono interagire e alle azioni suggerite.
La seconda fase, invece, è stata orientata allo studio sulla rappresentatività e memorabilità dei segnali attraverso l'esecuzione di un paio di sequenze di azioni predeterminate. Durante lo svolgimento di questa modalità, delle serie di impulsi vengono trasmesse all'utente, ora informato circa il significato attribuitogli, quindi abilitato a performare le attività necessarie al completamento della procedura suggerita; al termine del processo, viene richiesto di ripetere nuovamente la sequenza, questa volta sfruttando solo la memoria di quanto appena provato, descrivendola in tempo reale secondo l'approccio thinking aloud, in modo da rendere valutabili anche l'efficacia dell'informazione trasmessa e la velocità di apprendimento.

Il test ha visto il coinvolgimento di dodici utenti, caratterizzati da competenze eterogenee rispetto agli approcci immersivi e all'utilizzo di strumenti digitali, suddivisi in due sottogruppi composti da sei elementi ciascuno, ai quali sono stati proposti due protocolli differenziati.

Protocollo 1:

_parte prima: riproduzione di impulsi misti sulla mano libera, all'utente è richiesto di individuare la forma del segnale e descrivere che cosa lo induce a fare;

_parte seconda: scelta di un oggetto, l'utente non è istruito riguardo il funzionamento ipotizzato e la richiesta consiste nell'individuare la forma del segnale e descrivere l'oggetto che sceglierebbe;

_parte terza: scelta dell'oggetto consapevole, in seguito alla condivisione del funzionamento della selezione, l'utente deve riconoscere la forma dell'impulso e afferrare l'oggetto corretto;

_parte quarta: riproduzione di impulsi misti sulla mano impugnante uno degli oggetti, all'utente è richiesto di individuare la forma del segnale e descrivere come utilizzerebbe l'oggetto in questione;

_parte quinta: a seguito di un ulteriore parte di spiegazione del significato dei segnali vengono riprodotte le sequenze da operare, la prima composta da sei attività, la seconda da dieci; al termine di entrambe è richiesta la ripetizione a memoria di quanto eseguito (seconda fase descritta innanzi).

Protocollo 2:

_parte prima: durante l'esecuzione di tre gestualità concordate a priori con l'utente, il segnale con il significato associato è riprodotto ricorsivamente in background, al termine delle tre esecuzioni, all'utente è richiesto di replicare l'attività corrispondente all'input richiamato;

_parte seconda: a seguito di un ulteriore parte di spiegazione del significato dei segnali vengono riprodotte le sequenze operare, la prima composta da sei attività, la seconda da dieci, al termine di entrambe è richiesta la ripetizione a memoria di quanto eseguito.

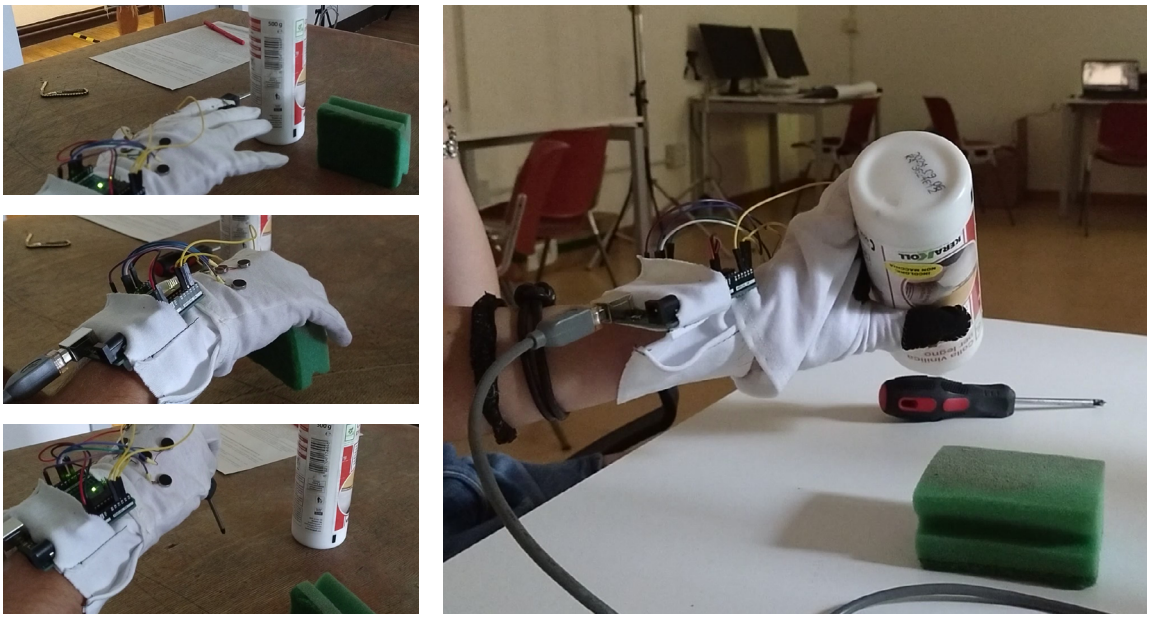


Fig. 37 Sequenza di frame estrapolata dalla registrazione effettuata durante l'esecuzione di una sperimentazione

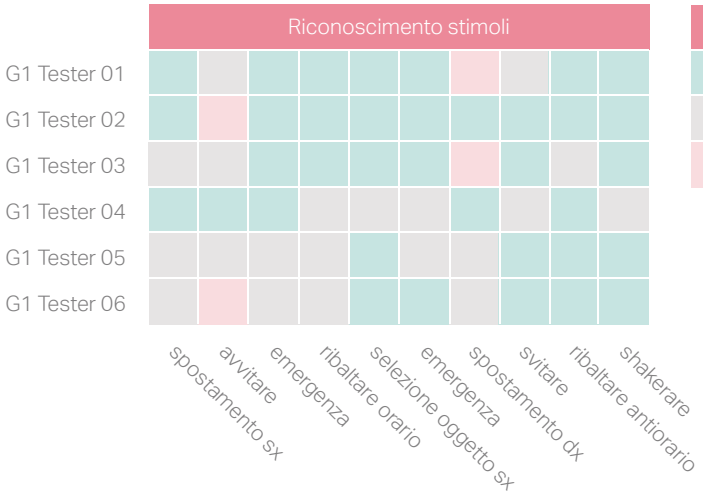
Risultati

In via generale, dalla conduzione dei primi test è possibile rilevare un buon grado di coinvolgimento e di interesse dimostrati nel corso delle sessioni, nonostante la lunghezza di circa un'ora per l'esecuzione dell'intero programma. In secondo luogo, è possibile constatare come i feedback ricevuti siano stati abbastanza omogenei, identificando in modo chiaro alcune lacune del sistema come l'usabilità del guanto e l'entropia causata dai segnali di direzione.
Per quanto riguarda i dati raccolti, è necessario segnalare che di seguito sono rappresentate le tabelle riportanti le sole fasi di esame dedicate allo svolgimento di azioni precise in risposta al comando vibrotattile inviato, poiché maggiormente focalizzate sul perimetro della ricerca e contestualmente più efficaci nella misurazione gli esiti.
Vengono dunque tralasciate le considerazioni singolari eccessivamente dettagliate, talvolta fuori traccia, e le rilevazioni relative alla prima parte del secondo protocollo, poiché hanno rivelato criticità fondamentali che richiedono un lavoro ulteriore di indagine che conduca alla completa riformulazione dello svolgimento al fine di poter estrapolare indicazioni sufficientemente rilevanti.

Il riconoscimento della forma degli stimoli

Il primo aspetto approfondito interessa la capacità degli utenti di percepire e localizzare i punti di applicazione degli stimoli vibratori per comprendere se la sensibilità del dorso e l'intensità dei segnali siano sufficienti al fine di riprodurre una sensazione riconoscibile e soprattutto ripetibile. In questo frangente, in particolare si è cercato di approfondire se l'architettura del dimostratore, taglia del guanto, tensione del tessuto e distanza tra gli attuatori fossero consentissero la trasmissione di chiara dei pattern progettati.
Contemporaneamente questo primo esercizio è stato condotto in modo da permettere all'utente un'ambientazione iniziale con il dispositivo mirando inoltre a creare tramite il dialogo un ambiente di scambio confortevole nel quale i tester si sentissero a loro agio nell'esprimere le proprie opinioni riguardo l'andamento delle prove.
La tabella 6 riportata intende visualizzare la matrice di risposte ottenute in questo frangente, tenendo in considerazione una riga per ogni utente e una colonna per ogni stimolo eseguito.

Tab. 6 Matrice degli stimoli aptici riconosciuti dal gruppo di studio G1



Tot input G1
34/60 (57%)
22/60 (37%)
4/60 (7%)

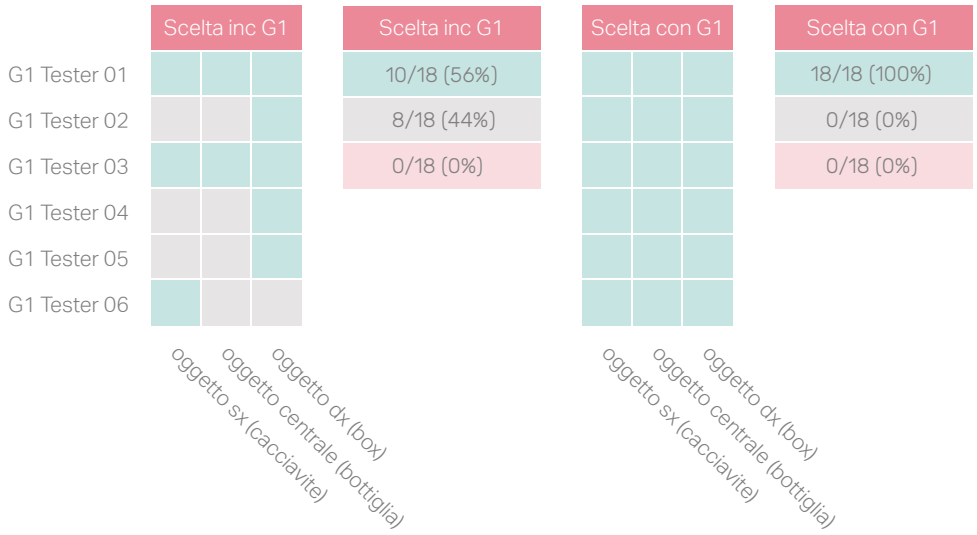
La tabella sulla destra, invece riporta numericamente i risultati e le percentuali di stimoli riconosciuti correttamente (in verde), quelli riconosciuti erroneamente (in rosa) e quelli riconosciuti, ma in senso contrario a quanto effettivamente trasmesso (in grigio).
Ciò che emerge è una tendenza positiva a favore dei riconoscimenti corretti rispetto a quelli errati offrendo un'indicazione incoraggiante sul proseguo dell'interpretazione.
In secondo luogo, osservando la distribuzione è possibile ipotizzare come i primi stimoli risultino più complessi da comprendere a causa della mancanza di preparazione del tester che ancora deve comprendere cosa aspettarsi dall'esperienza di trigger.
Quello che invece è stato possibile riconoscere da questa prima valutazione sono le criticità riconducibili agli stimoli rotatori e alla difficoltà di distinzione della vibrazione tra gli attuatori centrali, spesse volte è stata percepita l'azione del motore anteriore quando quello attivo era il posteriore e viceversa, sottolineando da subito un fattore chiave sul quale porre attenzione nel proseguo del lavoro.

La scelta dell'oggetto

In seguito ad una prima verifica circa la possibilità di generare segnali riconoscibili, il secondo principio base di cui era necessaria la prova era la possibilità di operare una scelta di oggetti o, come in questo caso di strumenti, nella fattispecie dal lavoro condotto sulla task analysis sono emerse le tipologie: bottiglia, scatola e cacciavite quali maggiormente impiegate nella conduzione delle operazioni studiate. L'impianto comunicativo proposto in questa sede per effettuare tale selezione è basilare e fondato sulla distinzione spaziale legata alla collocazione originale degli elementi, concettualmente, allo stimolo sul lato sinistro della mano, corrisponde la selezione dell'oggetto a sinistra della rosa, lo stimolo destro richiama l'oggetto disposto a destra, mentre lo stimolo centrale (in basso) l'oggetto collocato medialmente. Gli esiti riportati sotto sono suddivisi in due tabelle, la prima identifica le risposte ipotizzate dagli utenti prima che gli fosse fornita la chiave di lettura, la seconda successiva all'informazione.

Come si può vedere, a sinistra i risultati positivi, quando singolari, sono da ritenersi fortuiti, mentre è interessante constatare come due utenti siano riusciti da subito ad individuare intuitivamente la dinamica corretta. In aggiunta l'integralità delle risposte corrette a seguito dell'esplicazione della logica di funzionamento permette di ritenere tale strategia funzionante e utilizzabile nello sviluppo dello studio.

Tab. 7 Matrici della selezione strumenti guidata dagli stimoli aptici.
La sigla "inc" identifica il test eseguito prima di fornire istruzioni.
La sigla "con" identifica il test dopo aver fornito le istruzioni.



Esecuzione delle procedure

Una volta compresa la fattibilità delle singole componenti, le esercitazioni sono evolute in sequenze più articolate utili ad esplorare la reale possibilità di eseguire processi guidati senza l'ausilio di indicazioni visuali. Al fine di eliminare la possibilità di eseguire azioni dettate dalla logica, gli input sono stati ordinati in modo da non ricalcare combinazioni ovvie, anche perché la sperimentazione si basa su un cluster di indicazioni ancora ristrette ed essenziali. Entrando nel merito di quanto suggerito all'utente tramite l'azione dell'input aptico, di seguito si riportano le operazioni richieste:

Attività 1

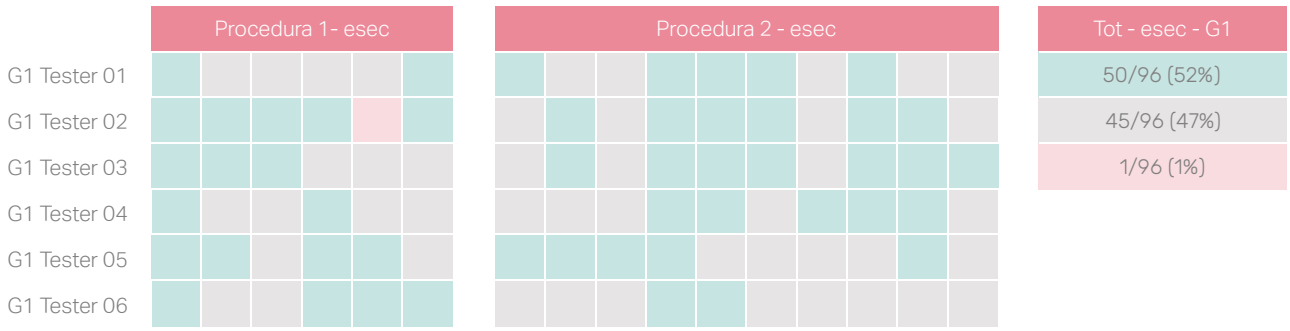
Selezione oggetto scatola / spostamento a destra dell'oggetto / ripristino stato iniziale / selezione oggetto cacciavite / esecuzione svitamento / ripristino stato iniziale.

Attività 2

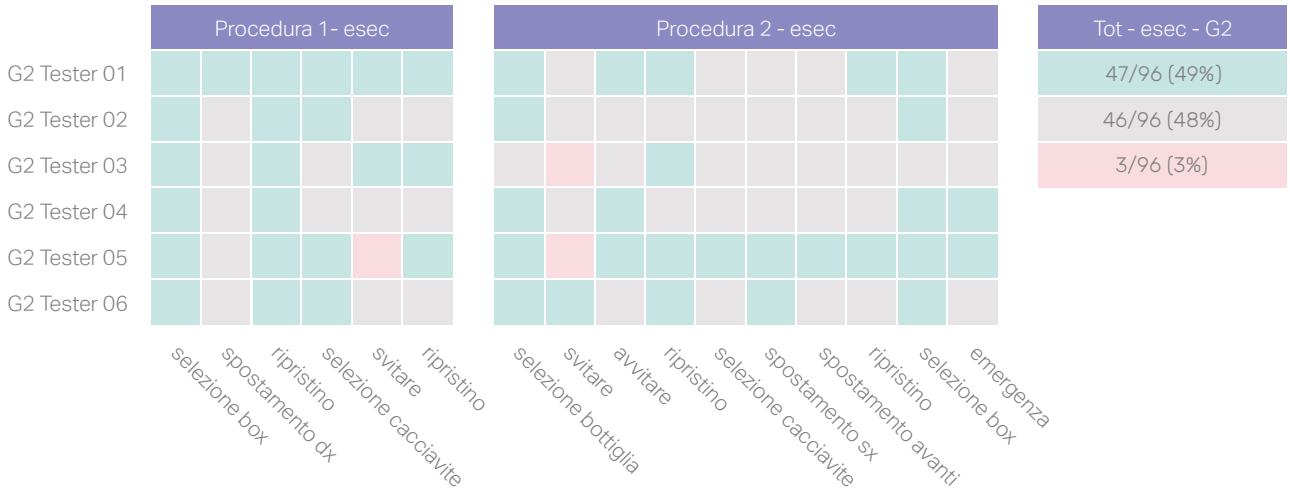
Selezione oggetto bottiglia / esecuzione svitamento / esecuzione avvitamento / ripristino stato iniziale / selezione oggetto cacciavite / spostamento a sinistra dell'oggetto / spostamento in avanti dell'oggetto / ripristino stato iniziale / selezione oggetto scatola / segnale di emergenza.

Come è possibile notare dalla struttura di ambedue i programmi, l'architettura di funzionamento è basata sul principio: selezione oggetto, utilizzo dell'oggetto, deposito dell'oggetto, affinché l'evasione della singola richiesta risulti più semplice e, allo stesso tempo, rendere indipendenti le diverse porzioni di procedura evitando così che l'errore in un segmento pregiudichi l'intera successione. Le matrici seguenti mostrano quanto rilevato durante l'esecuzione delle prove, in particolare, la prima riporta l'attività 1, la seconda l'attività 2 e la terza tabella i risultati combinati delle due prove.
Con i codici G1 e G2 si fa riferimento ai gruppi di test, a differenza dei precedenti, infatti, le porzioni di sperimentazione sono state somministrate a tutti e dodici gli utenti coinvolti. Dal punto di vista numerico, è interessante estrapolare come, sebbene gli esiti siano tutt'altro che eccellenti, dimostrando la necessità di lavorare ulteriormente sul sistema sia in termini di disegno dei segnali sia di funzionamento del dimostratore, i dati raccolti mostrino valori numericamente consistenti tra i due gruppi.

Tab. 8 Matrice delle operazioni eseguite sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G1



Tab. 9 Matrice delle operazioni eseguite sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G2



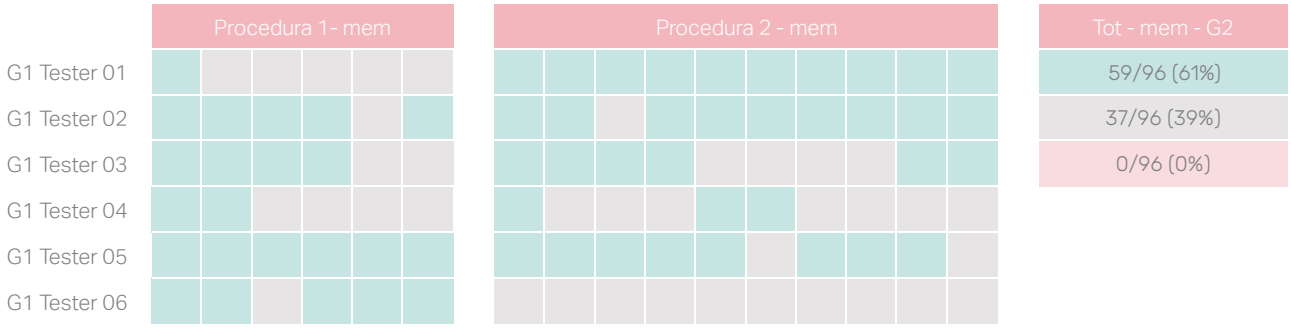
Questo aspetto è da ritenersi positivo in quanto nonostante le distribuzioni siano piuttosto variegate, pertanto non segnalino specifiche difficoltà nei pressi di una determinata azione o segnale, la percentuale di esecuzioni positive appaiano attendibili, anche se basse.
Analizzando in modo più puntuale le singole esecuzioni, occorre inoltre annotare la coerenza delle incertezze riportate in termini di orientamento della rotazione solamente in riferimento alle gestualità connesse al cacciavite e che gran parte degli errori registrati, deriva dall'interpretazione errata dei segnali provenienti dagli attuatori centrali, sintomo che suggerisce un potenziale miglioramento sensibile delle percentuali a fronte di una maggiore chiarezza del segnale.

Memorizzazione delle procedure

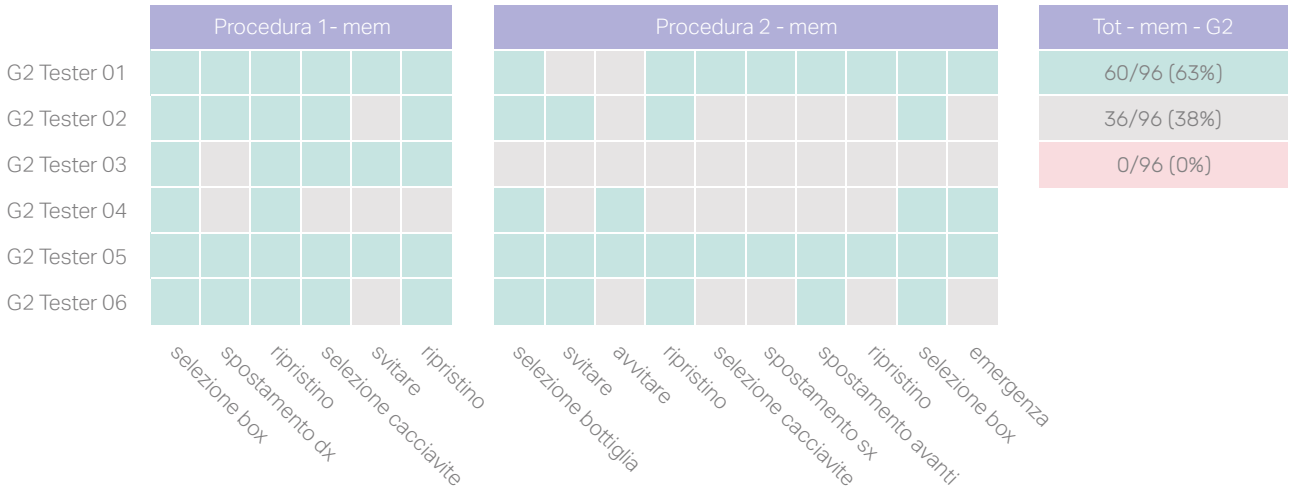
Modificando l'ordine della sperimentazione, che vede le fasi di riproduzione a memoria delle attività immediatamente dopo la loro esecuzione guidata dai segnali vibrotattili, la rassegna di esiti si conclude con il raggruppamento delle risposte mnemoniche.
Sulla base dell'osservazione delle prove condotte, si specifica che la correttezza o meno dell'esecuzione delle fasi non è da riferirsi in senso assoluto agli input trasmessi quanto più alle azioni compiute. Grazie all'approccio "thinking aloud", infatti, anche se preventivabile, è stato chiaro fin da subito come in questo frangente fosse estremamente intuitivo ed immediato indirizzare il ricordo anziché allo stimolo, verso il gesto eseguito.
Questa chiave di lettura, innanzitutto, motiva il perché non siano stati registrati errori nei sensi di rotazione, inoltre, ammonisce su quanto sia importante al fine di un buon processo di trasferimento/apprendimento, che l'azione eseguita in risposta al nudge sia corretta, e di come in caso contrario l'assimilazione venga influenzata negativamente.

Anche questa volta, la costanza dei valori risulta essere significativa, indicando da un lato una certa attendibilità di quanto raccolto e dall'altro un andamento del 10% costantemente migliore di quanto rilevato in fase di esecuzione, suggerendo come l'impatto sulla memorabilità delle fasi sia discreta e possa ambire al raggiungimento di risultati anche buoni.

Tab. 10 Matrice delle operazioni memorizzate sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G1



Tab. 11 Matrice delle operazioni memorizzate sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G2



Questionario (considerazioni e suggerimenti generali)

Sintetizzando le indicazioni ricevute durante le prove e le informazioni collezionate tramite i questionari post-sperimentazione, emergono differenti aspetti notevoli:

_in generale, l'utilità del sistema percepita è risultata piuttosto alta, facendo intendere che il margine per provare ad introdurre una futura evoluzione della soluzione in modo più verticale esista;

_l'usabilità del dimostratore, come anticipato per via del collegamento via cavo con il computer è risultata limitata, attirando l'attenzione su una caratteristica certamente da migliorare;

_l'abilità e la dimestichezza pregresse degli utenti, maturate sia con dispositivi smart, sia in ambito videoludico, incide considerevolmente sulla sensibilità percettiva e la capacità di interpretare i feedback individuale;

_le già menzionate difficoltà nel riconoscimento della provenienza degli stimoli centrali, ha comportato il ricorrente suggerimento relativo all'ampliamento del distanziamento tra gli attuatori di vibrazione;

_gli utenti stessi, trovando difficoltà a distinguere i segnali di spostamento (attivazione input centrale seguito da input nella direzione suggerita) dai segnali di ripristino allo stato iniziale (input centrale in posizione avanzata), hanno suggerito la modifica della prima indicazione sostituendola con una doppia vibrazione direttamente nella direzione desiderata.

Gli elementi riportati e la propositività mostrata dai tester, sottolinea un impatto iniziale molto buono per il sistema in esame, inoltre le tendenze positive a favore dei riconoscimenti corretti, rispetto a quelli errate, seppur lontane da rese ottimali sembrano poter gettare le basi per poter ritenere plausibile la fattibilità di questa modalità di trasferimento.

5.4 Controtest e convergenza

Al termine della prima campagna di sperimentazione e di elaborazione degli esiti, la riflessione sugli aspetti positivi e quelli negativi portati alla luce, ha orientato il lavoro di implementazione del dimostratore. Il secondo hardware ha, dunque, l'obiettivo di risolvere alcune delle lacune evidenziate e consentire il raggiungimento di risultati che possano supportare la validazione del sistema e del processo di progettazione svolto.

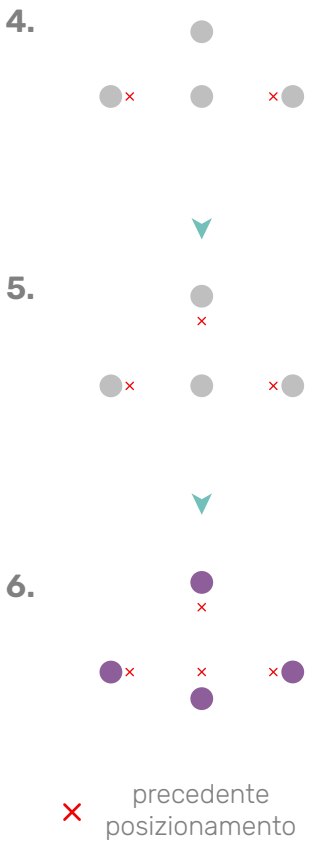


Fig. 38
Secondo step evolutivo del layout degli attuatori di vibrazione sul dorso della mano

Tab. 12 Tabella di trasduzione evoluta dei suggerimenti in segnali aptici

	azione	archetipo strumento	input
L5	emergenza	tutti	
L4	avvitare		
	svitare		
L3	versare a destra		
	versare a sinistra		
L2	spostare avanti		x2
	spostare indietro		x2
	spostare a destra		x2
	spostare a sinistra		x2
L1	afferrare oggetto sx	tutti	
	afferrare oggetto centro	tutti	
	afferrare oggetto dx	tutti	
	trattenere	tutti	

Il prototipo ha visto tre fronti di aggiornamento, incidenti tutti i tre differenti piani coinvolti nella realizzazione, ovvero quello del supporto, del circuito elettronico e del software.
Partendo da quest'ultimo aspetto, il lavoro sul codice è stato ridotto, operando principalmente il solo adattamento delle indicazioni di spostamento secondo quanto suggerito dagli utenti della prima fase di utilizzare un doppio impulso nella direzione desiderata. Il secondo ambito è quello che ha visto i cambiamenti più significativi, infatti, per fronteggiare la criticità riscontrata nell'usabilità della prima soluzione, vincolata dall'utilizzo del cavo di collegamento al computer, si è reso necessario il cambio della scheda di controllo. L'Arduino Uno utilizzato in precedenza, ha ceduto il passo ad una scheda Arduino MKR wi-fi 1010, con il quale è possibile raccogliere e inviare dati al computer quale server, senza dover effettuare connessioni fisiche. Tale upgrade comporta l'introduzione nell'apparato di una batteria, in questo caso è stata selezionata una Li-Po 3,7V e 1000mHa per via delle sue ridotte dimensioni e peso, risultando però ancora insufficiente per l'alimentazione contestuale della scheda e degli attuatori senza un'ulteriore modifica del circuito. A questo proposito, il disegno è stato rivisto inserendo prima di ogni motore eccentrico un transistor tipo BC 547C al fine di regolare il corretto afflusso di corrente al componente, permettendo all'intero sistema di funzionare. L'incremento di complessità nella realizzazione dei collegamenti e la necessità di distanziare maggiormente gli attuatori riconfigurandone il layout, ha indotto ad effettuare un cambio anche nel guanto di supporto, questa volta realizzato da zero utilizzando un tessuto elastico in grado di migliorare l'adesione degli attuatori alla mano e allo stesso tempo di migliorarne l'indossabilità, estendendone la rosa di taglie coperte. Il confezionamento, sebbene più complesso dal punto di vista sartoriale, è stato strategico potendo realizzare il circuito su una sagoma bidimensionale composta da palmo e dita, solo in un secondo momento unita ad un'altra sagoma analoga e al pollice per completarne la fabbricazione.

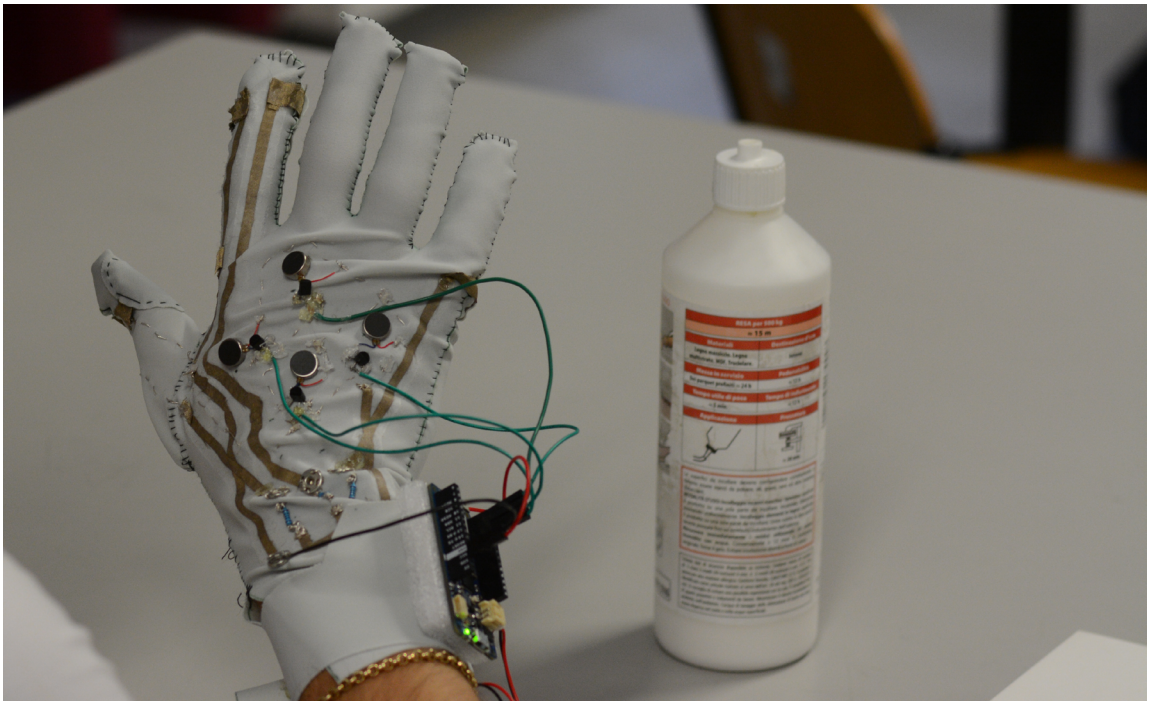


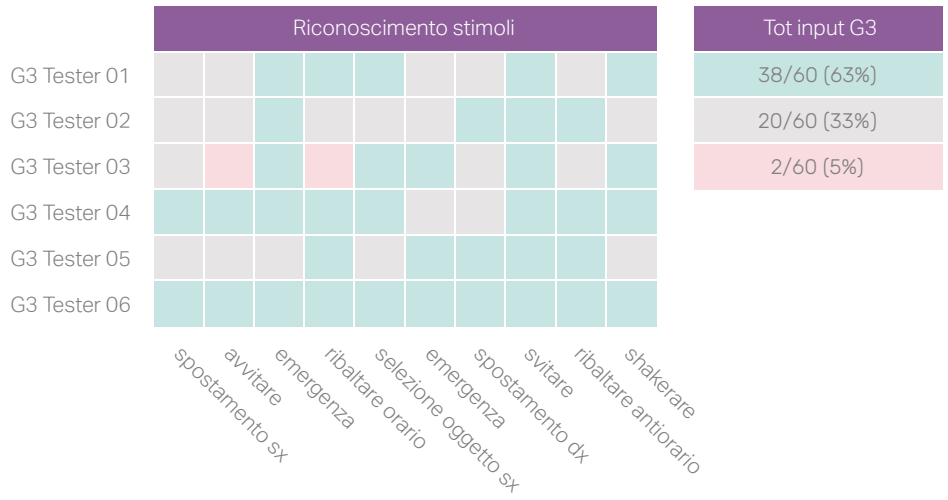
Fig. 39 Immagine del secondo prototipo di guanto evoluto per il suggerimento aptico, utilizzato nella seconda campagna di test, dal gruppo di tester G3

Addentrandosi nella seconda campagna di sperimentazione, nell'ottica di rilevare esiti confrontabili con i precedenti, la struttura della sperimentazione è rimasta invariata e la somministrazione è stata effettuata con un gruppo di utenti, anche in questo caso, composto da sei elementi dalle competenze e dimestichezza con gli strumenti immersivi eterogenea. Di seguito si riportano i dati raccolti, raggruppati secondo la tipologia di prova.

Il riconoscimento della forma degli stimoli

Come anticipato, il layout degli attuatori ha subito qualche variazione, innanzitutto la distanza tra i quattro elementi è aumentata, passando da 20mm a 25mm di interasse, inoltre il componente centrale inferiore è stato abbassato e quello superiore alzato, entrambe di 5mm, ricercando una maggiore diffusione degli input sul dorso della mano e creando maggiore separazione e chiarezza tra i singoli impulsi. In generale, la prima osservazione che è possibile effettuare è che, nonostante i valori di incremento importanti, i primi riscontri abbiano fornito risultati positivi, anche se leggermente inferiori alle aspettative.

Tab. 13 Matrice degli stimoli aptici riconosciuti dal gruppo di studio G3

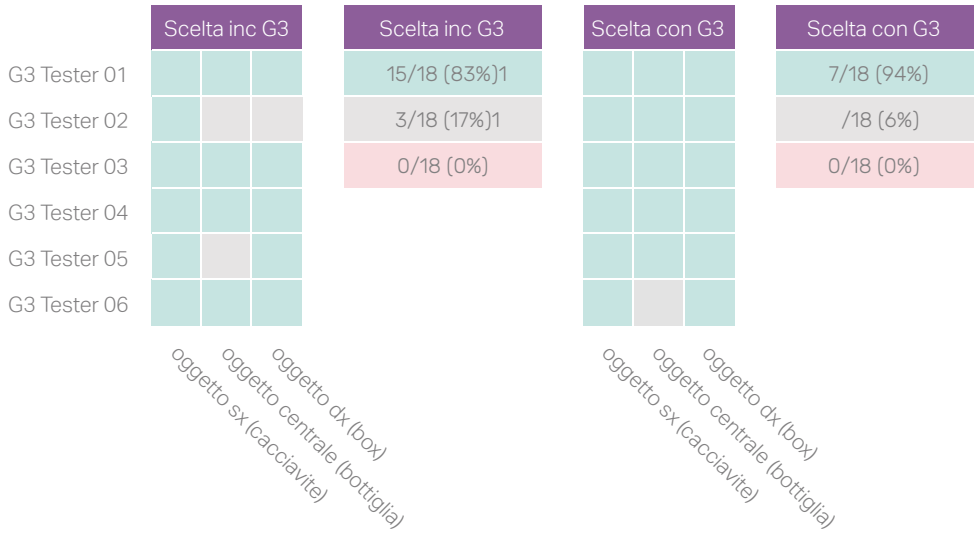


Riportando considerazioni più accurate, si registra comunque un miglioramento in tutte le percentuali di risposta, identificando dunque che la direzione di sviluppo intrapresa sia quella corretta, suggerendo che tentativi con assetti ancora più periferici possano fornire indicazioni ancora più distinguibili. Inoltre, è interessante notare, come per il gruppo precedente, durante lo svolgimento della prova, l'accuratezza delle risposte incrementi, confermando quindi che la sensibilità agli stimoli aptici si costituisca e affini rapidamente con la pratica. Anticipando gli esiti riportati successivamente, questa tendenza pare ulteriormente trovare riscontro.

La scelta dell'oggetto

In questa prova i risultati ottenuti utilizzando il secondo prototipo sono sensibilmente migliori. Escludendo l'errore nella colonna dedicata alla scelta consapevole, dettato da uno sbaglio nella localizzazione dell'input, l'efficacia della logica di selezione può ritenersi confermata.
A contribuire a tale considerazione, sia l'elevata percentuale di risposte corrette ottenuta durante la fase consapevole, sommandosi ai già ottimi precedenti risultati, sia il sorprendente esito della fase inconsapevole che suggerisce come la maggiore spaziatura amplifichi significato intuitivo del trasferente di scelta.

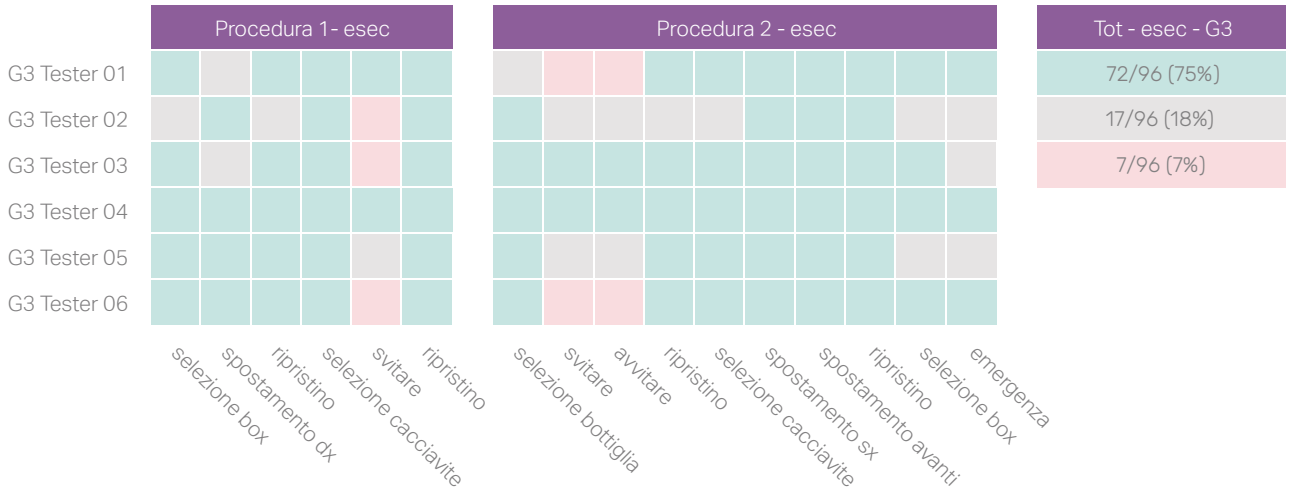
Tab. 14Matrici della selezione strumenti guidata dagli stimoli aptici.
La sigla "inc" identifica il test eseguito prima di fornire istruzioni.
La sigla "con" identifica il test dopo aver fornito le istruzioni.



Esecuzione delle procedure

Per quanto concerne la terza prova in esame, l'impatto positivo dell'evoluzione del dimostratore apre una forbice significativa con il suo predecessore, consentendo di raggiungere buone percentuali di correttezza nel compimento delle attività suggerite dal sistema.

Tab. 15 Matrice delle operazioni eseguite sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G3



Anche in questo caso, risulta interessante notare come gli utenti sembrino acquistare sempre più confidenza, a mano a mano che le procedure si sviluppano, un ulteriore sintomo che i test qui presentati, effettuati senza specifico allenamento pregresso, potrebbero trarre notevole vantaggio da sessioni di pratica ed esercizio.
Dall'ultima colonna della matrice legata alla seconda procedura, infine, è curioso rilevare come il segnale di emergenza, tra i pochi compresi intuitivamente senza spiegazioni e tra le traduzioni vibrotattili preferite degli utenti, causi qualche complicazione se percepita all'interno di procedure più lunghe, suggerendo così un'area di approfondimento per il futuro al fine di incrementarne la comprensibilità.

Tab. 16 Confronto tra le percentuali esecutive registrate dai tre gruppi di test

Tot - esec - G1	Tot - esec - G2	Tot - esec - G3
50/96 (52%)	47/96 (49%)7	2/96 (75%)
45/96 (47%)	46/96 (48%)1	7/96 (18%)
1/96 (1%)	3/96 (3%)	7/96 (7%)

Accostando le tabelle riassuntive degli esiti di esecuzione dei tre gruppi di tester, appare chiaro l'importante progresso ottenuto, raggiungendo risultati che possono essere considerati promettenti riguardo la possibilità di trasferire significanti di processo senza utilizzare interfacce visuali, bensì solamente stimoli aptici.
Certamente, non è possibile omettere la rilevazione del peggioramento relativo all'incertezza direzionale delle attività di rotazione, pertanto ne derivano le seguenti considerazioni:

_in generale può ritenersi comunque un effetto positivo, sia perché l'entità degli errori si dimostra comunque contenuta, sia perché emerge solo in questo frangente rimanendo prima sottotraccia alle criticità di distinzione tra azioni di ribaltamento e azioni di rotazione;

_come dichiarato inizialmente le sequenze non prevedevano volutamente associazioni tra gestualità e oggetto ovvie; pertanto, errori di comprensione sono da mettere in conto;

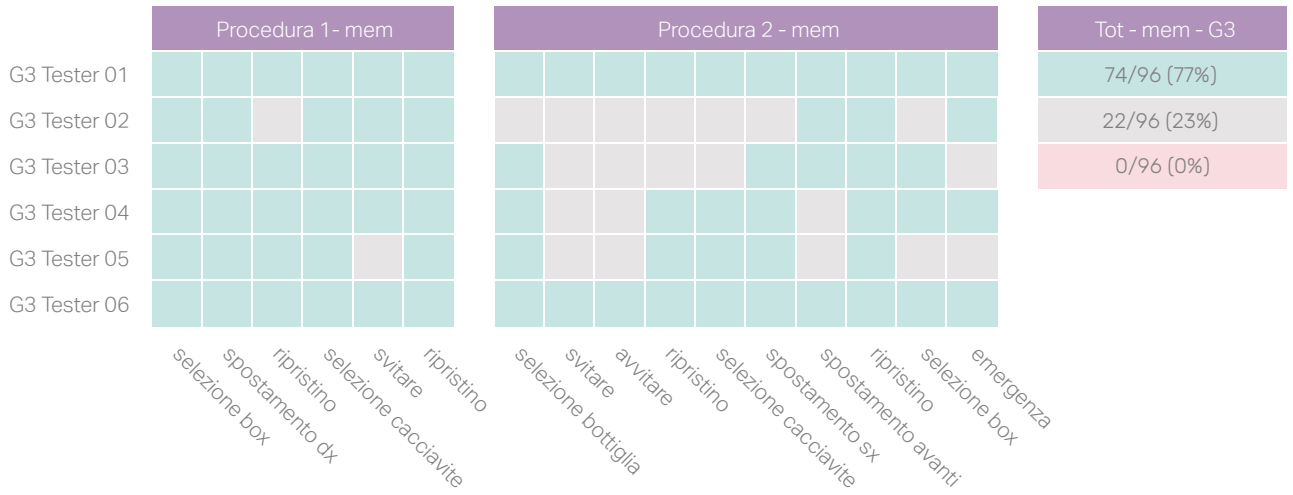
_dando seguito al punto precedente, la sequenza di rotazione con la borraccia in mano può risultare fuorviante, in questo senso l'utilizzo di un secondo guanto sulla mano sinistra potrebbe aiutare a disambiguare se la rotazione in questione indichi la rotazione effettiva dell'oggetto oppure lo svitamento del tappo. Allo stesso tempo, l'aggiunta di un ulteriore fonte di input, consentirebbe di estendere la gamma delle informazioni trasferite, potendo ottenere variazioni degli stimoli basate sulla sincronia o asincronia dei dispositivi (Dall'Osso et al., 2022);

_infine, come dimostrato nella grande differenza tra primo e secondo prototipo, per ottenere maggiore precisione nel riconoscimento potrebbe essere sufficiente la revisione di qualche parametro del segnale di suggerimento, ad esempio riducendo il tempo tra i quattro impulsi o viceversa allungandone la durata di vibrazione e aumentando la sovrapposizione tra un segnale e il successivo, creando maggiore senso di continuità.

Memorizzazione delle procedure

In tema di apprendimento delle sequenze, i miglioramenti perseguiti in termini di comprensibilità e correttezza delle esecuzioni, sembrano incidere positivamente. L'importanza di trasferire l'informazione e renderne la codifica corretta era già stata osservata, ma qui risulta ancora più evidente in quanto le matrici, se sovrapposte alle corrispettive di esecuzione, mostrano come le incertezze si verifichino tendenzialmente in prossimità degli errori commessi. La sovrapponibilità delle aree, quindi, evidenzia ulteriormente come la chiarezza e l'inequivocabilità dei segnali trasmessi non solo incida sulla correttezza di esecuzione, bensì sulla sicurezza con la quale gli utenti assorbono il gesto appena effettuato.

Tab. 17 Matrice delle operazioni memorizzate sulla base degli stimoli aptici trasferiti al gruppo di studio G3



Tab. 18 Confronto tra le percentuali delle memorizzazioni registrate dai tre gruppi di test

Tot - mem - G1	Tot - mem - G2	Tot - mem - G3
59/96 (61%)	60/96 (63%)7	4/96 (77%)
37/96 (39%)	36/96 (38%)2	2/96 (23%)
0/96 (0%)	0/96 (0%)	0/96 (0%)

Dall'accostamento degli esiti dei tre gruppi in questa fase di sperimentazione, invece, non emergono particolari considerazioni aggiuntive al di fuori del miglioramento generale nelle risposte, rimarcando percentuali positive che contribuiscono a supportare la potenzialità di questo approccio.

Questionario (considerazioni e suggerimenti generali)

Concludendo la rassegna legata allo svolgimento della sperimentazione e all'interpretazione dei risultati, occorre riportare sinteticamente quanto emerso dai questionari compilati dal terzo gruppo di valutazione:

_il nuovo guanto di supporto ha effettivamente migliorato l'indossabilità del dispositivo rendendo le operazioni di predisposizione dell'esperienza molto più agibili e semplici;

_la sostituzione della scheda e la possibilità di svincolarsi dalla connessione via cavo ha avuto ricadute positive sulla percezione di intrusività e utilizzabilità del prototipo;

_la nuova modalità di suggerire le direzioni è stata apprezzata e riconosciuta come una delle modalità più intuitive;

_diversi utenti suggeriscono di aumentare l'intensità degli input vibrotattili per incrementare la facilità di individuazione dell'area della mano sollecitata.

Questo secondo test, in definitiva conferma le impressioni generali relative al buon grado di coinvolgimento dell'esperienza e di propositività nell'accettazione del dispositivo, portando di fatto a convergenza gli esiti e le risposte ottenute da tutti e tre i gruppi coinvolti nella sperimentazione.

6. Trans[In]formazione

Un nuovo significante per l'affordance virtuale

Il percorso dell'elaborato si apre con un inquadramento generale che prende forma attraverso una rassegna di casi di studio, tecnologie e contributi teorici utili a definire lo stato dell'arte. L'attenzione è posta sugli sviluppi recenti della digitalizzazione e sulle trasformazioni che essa comporta nei sistemi industriali, con particolare riferimento ai processi di transizione da modelli materiali a modelli immateriali.
In questa fase, le tecnologie immersive e l'intelligenza artificiale vengono considerate non come semplici strumenti, ma come fenomeni che incidono profondamente sul modo in cui le organizzazioni apprendono, distribuiscono conoscenza e gestiscono le risorse. L'analisi dei casi studio e delle pratiche già avviate consente di osservare sia i benefici potenziali, sia le criticità legate all'utilizzo delle tecnologie immersive aumentate.
Da qui scaturisce la necessità di un approccio progettuale che, attraverso la disciplina del design, sappia individuare nodi di ricerca, porre domande pertinenti e aprire scenari di sperimentazione capaci di connettere tecnologia e dimensione umana in ottica collaborativa.
Su questa base si innesta la seconda sezione, che restringe il campo d'indagine e colloca gli strumenti della realtà estesa all'interno del contesto produttivo. L'attenzione si sposta dunque dalle dinamiche generali alle condizioni organizzative e di processo, con l'obiettivo di comprendere come le tecnologie immersive possano sostenere la trasformazione dei modelli operativi. Il discorso si articola lungo tre direttrici principali: l'analisi dello stato di fatto di processi, la gestione delle informazioni e dei dati, includendo la necessità di integrare processi e ruoli evitandone la frammentazione, e lo sviluppo di alcune sperimentazioni preliminari atte a indagare in quale ambito sviluppare approcci collaborativi tra agenti umani e agenti non umani immersivi veicolino l'impatto più efficace. In questa prospettiva, le tecnologie non vengono viste solo come supporti, ma come mediatori capaci di facilitare il trasferimento della conoscenza, di alleggerire i carichi cognitivi e di generare nuove forme di cooperazione tra attori eterogenei.
La terza sezione introduce infine la dimensione più sperimentale, restituendo i risultati emersi dai processi di prototipazione e dalle attività condotte in contesti reali.
Qui la questione si sposta dall'osservazione all'azione. Le sperimentazioni diventano spazi di verifica in cui testare le ipotesi formulate e valutarne la reale applicabilità. I risultati raccolti mettono in evidenza tanto le potenzialità delle interfacce non visuali mediate dall'aptica nel rafforzare il canale di dialogo tra feedback e azione tra utente e ambiente virtuale, quanto le difficoltà di tradurre le informazioni e i suggerimenti in linguaggi immediatamente operativi. I test permettono così di riflettere sui limiti ancora presenti e sulla necessità di definire framework progettuali più solidi, in grado di rendere le esperienze di realtà estesa realmente fruibili e scalabili.
La sequenza delle tre sezioni segue un filo logico che procede dal generale al particolare: dall'analisi critica dei processi di transizione digitale, alla focalizzazione sull'uso delle tecnologie immersive in ambito produttivo, fino alla sperimentazione concreta di alcune soluzioni.

A partire da questa traiettoria, i paragrafi conclusivi dell'elaborato presentano i risultati osservati, le considerazioni conclusive e le prospettive future, offrendo una panoramica complessiva sugli esiti di questa ricerca che vede nel design e nella progettazione delle interazioni per le tecnologie immersive una pratica per pensare e abilitare il cambiamento.

6.1 Risultati e Outcome

Ricalcando il percorso riassunto nell'introduzione, si riportano i frutti del progetto maturati durante il percorso di ricerca triennale e raggruppati secondo quattro piani di intervento, tra loro connessi e sui quali, nel seguente sottocapitolo si dirameranno le considerazioni e le riflessioni evolute a partire dalle domande fondamentali che hanno guidato il lavoro durante tutto il suo l'arco di sviluppo. Partendo dalla ricognizione desk, condotta con l'obiettivo di ricostruire un quadro aggiornato sullo stato dell'arte dei sistemi immersivi che mettesse in relazione esperienze scientifiche, tecnologie e contributi teorici che negli ultimi anni hanno dato forma a un campo in rapida espansione, un primo asse di indagine ha riguardato il regesto degli strumenti, dei sistemi e delle sperimentazioni dei prodotti interattivi virtuali. L'esame mostra come i processi di valutazione e validazione non si limitino alla verifica tecnica delle soluzioni, ma necessitino l'inclusione di dimensioni più ampie legate alle user experience e ai contesti d'uso, confermando la natura multidimensionale delle tecnologie e degli approcci immersivi.

Un secondo tema emerso, riguarda l'analisi dell'evoluzione del concetto di affordance durante lo spostamento dalla realtà al contesto virtuale. La letteratura e i casi di studio considerati mettono in luce come l'interazione con gli ambienti virtuali e aumentati dipenda dalla capacità degli oggetti in scena di suggerire, attraverso significanti, modalità di utilizzo intuitive e percepibili. In questo senso, il significante, come nel mondo fisico, si configura come fattore necessario e comprensibile in quanto, condividendone il supporto offerto dal canale visivo, ne garantisce la riconoscibilità degli elementi e consentendo di accedere alle esperienze d'uso pregresse.
Per quanto riguarda l'esecuzione dematerializzata di operazioni più articolate o procedure complesse, invece, i significanti richiamati dal canale visivo risultano talvolta insufficienti, ad oggi infatti, per guidare questi comportamenti si utilizzano sovrastrutture composte da indicazioni testuali e grafiche, spesso simboliche. Ciò indica come il tema del veicolare informazioni nel contesto immersivo non sia solo un tema di interfaccia, bensì di progetto dell'interazione.
Questa fase di ricerca, inoltre, ha poi incluso uno studio comparativo dei principali scenari applicativi per il contesto della Virtual e Mixed Reality, i cui esempi analizzati, spaziando dall'addestramento industriale alla manutenzione assistita, dalla progettazione collaborativa al supporto remoto, mostrano come le tecnologie immersive stiano progressivamente passando da dimostratori sperimentali a prototipi potenzialmente operativi in diversi settori. L'elemento comune che emerge, da tali scenari è la capacità di ampliare i margini di collaborazione e di condividere in tempi ridotti dati e informazioni maggiormente intelleggibili e interoperabili.

La ricerca sul campo ha permesso di collocare in modo più preciso gli strumenti della realtà estesa all'interno dei processi produttivi. Innanzitutto, il lavoro svolto in collaborazione con l'azienda ha condotto, attraverso interviste, alla realizzazione di una mappa di tracciamento dei flussi relativi alla realizzazione della documentazione tecnica, utile per comprendere le dinamiche dell'ambito, quelle organizzative sottostanti e, soprattutto, i bisogni e le criticità riscontrate dagli utenti.
In secondo luogo, le riflessioni legate alle potenzialità degli approcci immersivi e della necessaria parallela strutturazione dei dati, ha contribuito alla generazione di Proof of Concept all'interno dei quali, la possibilità di collaborare alla designazione degli obiettivi, alla conduzione degli sviluppi e alla valutazione dei risultati è risultata estremamente utile nell'acquisto della consapevolezza critica necessaria all'osservazione e interpretazione delle dimostrazioni quali strumenti inizialmente sperimentali poi diventati fondamentali nel problem setting della ricerca.

Nella fattispecie, l'attenzione si è concentrata sull'interazione uomo-macchina, osservando come le tecnologie immersive consentano di attivare forme di comunicazione bidirezionale tra operatore e sistema. I dimostratori analizzati, hanno mostrato la centralità dei loop di feedback non solo per la corretta esecuzione dell'esperienza immersiva, ma anche per il corretto dialogo tra gli individui, carattere fondamentale nei processi di trasferimento della conoscenza. L'osservazione in situ ha evidenziato come la propensione all'uso delle tecnologie immersive sia fortemente condizionata non solo dall'ergonomia dei dispositivi, ma anche dal contesto culturale e organizzativo.
Gli operatori coinvolti hanno manifestato interesse e sorpresa per le esperienze immersive proposte, ma hanno segnalato anche resistenze legate alla percezione di complessità, ai tempi di adattamento e alla complessa compatibilità con le pratiche già consolidate.

Infine, un asse specifico della ricerca è stato dedicato alla progettazione di scenari applicativi in cui i sistemi di visione aumentata si configurano come risorsa alternativa per la fruizione della documentazione tecnica. In particolare, un focus sul troubleshooting ha mostrato che l'integrazione di manuali digitali e contenuti interattivi, riduce i tempi di diagnosi e supporta l'operatore nell'individuazione delle soluzioni più appropriate.
La prospettiva che ne deriva è quella di un ecosistema in cui le tecnologie immersive, lungi dall'essere meri strumenti accessori, diventano mediatori capaci di rafforzare la continuità tra conoscenza tacita e conoscenza esplicita, generando valore sia per l'organizzazione sia per i lavoratori coinvolti. Nel loro insieme, queste direttrici restituiscono un panorama, in cui la digitalizzazione si intreccia con le trasformazioni organizzative e culturali, segnando la transizione verso modalità di lavoro innovative e dinamiche che richiedono l'intervento di figure ibride non solo capaci di operare trasversalmente ma anche verticalmente acquisendo competenze digitali specifiche (Ricci et al., 2023).
La prima fase di progettazione applicata, derivata dal blocco di ricerca iniziale, e orientata all'accrescimento di skill e alla formazione delle figure appena individuate, ha condotto all'ideazione e alla prototipazione di uno spazio immersivo intitolato Immersive Design Lab. Si tratta di un ambiente sperimentale dedicato all'apprendimento e alla sperimentazione attraverso la creazione di modelli simulativi e test di raccolta dati con utenti. Il laboratorio nasce dall'esigenza di integrare le potenzialità delle tecnologie immersive con pratiche di analisi ed esercizio progettuale, configurandosi come piattaforma in cui la ricerca e la didattica trovano un terreno comune e un luogo di scambio.

Fig. 40 Immagine scattata in una delle prime sessioni di lavoro all'interno dell'Immersive Design Lab

La creazione ha previsto la definizione di un ecosistema in cui dispositivi di realtà virtuale, aumentata e mista e strumenti di monitoraggio fisiologico operano in sinergia, consentendo di osservare i comportamenti degli utenti e tradurli in dati significativi.
L'ambiente prototipato, dunque, permette di costruire e simulare scenari complessi e al contempo di raccogliere metriche utili a valutare ergonomia, usabilità e carico cognitivo. In questo senso, l'Immersive Design Lab si configura come strumento duplice: da un lato supporta la didattica mettendo a disposizione tecnologie avanzate e dall'altro offre l'opportunità di coinvolgere persone al fine di collezionare dati preziosi per affinare processi e modelli di interazione.
In prospettiva, l'obiettivo del laboratorio è divenire un luogo di scambio che trasformi le sperimentazioni in processi iterativi, in cui le esperienze designate alimentino nuove simulazioni e soluzioni progettuali, rappresentando così un punto incontro tra teoria e pratica, per l'esplorazione dei limiti delle tecnologie immersive e della valorizzazione del loro potenziale nel generare conoscenza condivisa e innovazione applicata.

Il quarto ed ultimo piano, ha riguardato l'approfondimento del tema del veicolo delle informazioni nel contesto immersivo sotto la lente del progetto dell'interazione.
Questa porzione di lavoro è stata sviluppata a partire da quanto distillato dalle esperienze precedentemente descritte e rielaborato cercando un'intersezione tra gli ambiti in esame che consentisse individuare uno scenario specifico in cui contestualizzare una fase progettuale e sperimentale nella quale valutare la fattibilità di aumentare il grado informativo degli ambienti di training attraverso la trasmissione di impulsi vibrotattili. Tale obiettivo, ha indirizzato l'attività svolta durante il periodo di ricerca all'estero presso lo "Smart Clothing Lab" alla Aalto University che ha portato alla realizzazione di due prototipi evolutivi con i quali sono state condotte due campagne di utilizzo e relativa raccolta dati con i quali poter indagare la possibilità di utilizzare un alfabeto aptico per trasferire suggerimenti riguardo l'esecuzione di sequenze di operazioni procedurali. La fase sperimentale è stata condotta in parte proprio all'interno dell'Immersive Design Lab e ha visto il coinvolgimento di 18 tester suddivisi in tre gruppi di studio, i cui suggerimenti e feedback sono stati raccolti e aggregati al fine di delineare e validare un protocollo di progettazione utile alla definizione di un sistema di comunicazione tattile, senza tocco, applicabile agli arti superiori per la guida funzionale degli utenti negli spazi immersivi.

Lo sviluppo dei prototipi ha permesso il raggiungimento di un discreto livello di corrispondenza tra input trasmessi e correttezza di esecuzione, dimostrando la potenzialità applicativa dell'apparato che, ancora lontano dalla sua massima ottimizzazione, suggerisce ulteriori ampi margini di miglioramento. Inoltre, la realizzazione dei guanti ha richiamato l'attenzione sul vasto mondo degli smart textiles e degli e-textiles, consentendo di assaggiare alcune delle qualità offerte da questi materiali e dagli approcci che ne vedono il loro centrale coinvolgimento, aprendo interessanti traiettorie di approfondimento all'interno delle future evoluzioni di questo progetto e, più in generale, di esplorazione per il gruppo di ricerca tutto.

La sintesi riportata, oltre ad offrire il riepilogo dello stato di avanzamento attuale del progetto di ricerca, mira a rispondere il più adeguatamente possibile all'insieme di macro e meso obiettivi definiti all'inizio del percorso, costituendo un corpo operativo che, sicuramente non senza lacune, ha coperto la maggior parte dei temi prefissati portando all'elaborazione del contributo essenziale descritto nel sottocapitolo successivo.

6.2 Osservazione e valutazioni

Nel complesso, il percorso di ricerca ha riscontrato come le tecnologie immersive e i sistemi aptici possano effettivamente svolgere un ruolo di rilievo nella digitalizzazione dei processi produttivi e formativi nel contesto industriale. L'analisi, inoltre, ne conferma il potenziale trasformativo ancora in gran parte da sviluppare, da un lato per via della necessità di costruire cornici metodologiche solide per la progettazione e la validazione dei sistemi, dall'altro l'urgenza di riflettere sull'esperienza reale degli enti e soprattutto dei fruitori, ai vari livelli dell'esperienza, e sulle condizioni concrete di adozione.

Questa prima panoramica si colloca al termine del progetto non più solo come ipotesi sulla base della quale orientare i primi passi nell'esplorazione di un ambito che, nonostante sia caratterizzato da una velocità di proliferazione tecnica maggiore di quella teorica, si è ugualmente rivelato estremamente complesso da approfondire, in quanto sfaccettato e dagli estremi di difficile definizione. Gli studi effettuati e la direzione di sviluppo delle soluzioni nell'arco degli anni in cui il percorso si è svolto, hanno contribuito ad assimilare che approcci derivati da strumenti quali i gemelli digitali, le simulazioni assistite e la realtà estesa, specialmente se combinati con le potenzialità espresse dall'intelligenza artificiale, rappresenteranno gli utensili principali nel futuro della progettazione e della produzione industriale. Volgendo lo sguardo in questa direzione, è necessario sottolineare l'importanza di svolgere interventi e azioni progettuali tese a costruire una consapevolezza diffusa che tali soluzioni non rappresentino un fine del lavoro, bensì mezzi di transizione con i quali sia possibile mediare indirettamente nuove modalità organizzative e di lavoro affinché il loro impiego nell'accompagnamento dei processi di sviluppo li renda più efficaci e, quando possibile, sostenibili.

Durante lo svolgimento della ricerca, l'urgenza di manipolare in modo appropriato gli strumenti e di disporre di corrette infrastrutture all'interno delle quali utilizzare proficuamente i sistemi digitali, ha posto l'attenzione sul tema della messa a disposizione delle informazioni, dei dati e dei modelli al fine di poter sfruttare al meglio le possibilità offerte, in particolar modo dagli approcci virtuali. In quest'ottica, un'importanza crescente è rivestita dalle tecniche di ricostruzione, sia che si tratti di video o catture a 360°, sia che si tratti di gaussian splatting, fotogrammetria o photometric stereo, rivelandosi soluzioni convenienti poiché capaci di snellire i processi di costruzione delle informazioni. Una volta a disposizione, i materiali e gli ambienti derivanti, opportunamente preparati e aggregati a valle di corrette analisi dei bisogni e utilizzati entro misurati progetti di interazione, contribuiscono alla creazione di esperienze aumentate e virtuali in grado di generare impatti positivi producendo valore aggiunto sia per i fruitori finali in termini di immersività, sia di chi tali ambienti li sviluppa trovandosi a svolgere operazioni meno onerose.

Addentratasi nell'indagine relativa alle potenzialità di questi sistemi, un asse specifico della ricerca è stato dedicato alla progettazione di scenari applicativi in cui i sistemi di visione aumentata si configurano come risorsa per la fruizione della documentazione tecnica. La possibilità di accedere a schede, istruzioni e video direttamente sul campo, senza interrompere le attività, si è rivelata una modalità apprezzabile, con effetti positivi sul coinvolgimento degli e tra gli utenti, consentendo di esplorare nuove modalità di formazione. La prospettiva che ne deriva è quella di un ecosistema in cui le tecnologie immersive, lungi dall'essere meri strumenti accessori, diventano agenti capaci di rafforzare la continuità tra conoscenza tacita e conoscenza esplicita, generando valore sia per l'organizzazione sia per i lavoratori coinvolti. Nello specifico, gli operatori partecipanti hanno manifestato interesse per strumenti capaci di supportare la collaborazione e di facilitare

l'apprendimento situato, ma hanno anche segnalato resistenze legate alla percezione di complessità, ai tempi di adattamento e alla necessità di compatibilità con le pratiche già consolidate. L'osservazione sul campo ha quindi ribadito come la propensione all'uso delle tecnologie immersive sia fortemente condizionata dal contesto culturale e organizzativo, evidenziando inoltre, l'impatto negativo dell'ergonomia dei dispositivi e delle modalità di interazione con i sistemi di controllo. A questo esito concorre un panorama rarefatto di esperienze progettuali catalogate che definiscano precetti e indicazioni riconosciute per la realizzazione e di esperienze virtuali omogenee e trasversalmente comprensibili, riducendo così la rosa di interazioni universali a un ridotto numero di gestualità, la cui conoscenza comunque richiede una familiarità minima con questa tipologia di dispositivi.

Alla luce di quanto individuato, una delle sfide raccolte durante il lavoro sperimentale è stata la ricerca di esprimere suggerimenti senza dichiararli, con il fine di porre la tecnologia a livello di aiuto non invasivo anziché di strumento preponderante. L'intento è prendere le distanze dalla necessità di imparare le logiche vincolate dei controller, a vantaggio di introduzioni nei flussi comunicativi intuitive che offrano dialoghi sfumati, in cui sia l'utente a decidere se cogliere o meno il suggerimento. In questi termini, l'esercizio cognitivo richiesto nell'interpretazione dei segnali, non si delinea come elemento esterno di fatica, ma come sforzo proficuo che faciliti la memorizzazione delle informazioni applicate. Su questa base, si è mossa la proposta di un impianto comunicativo che attraverso l'uso di stimoli vibrotattili non si limiti ad indicare la direzione, ma suggerisca il gesto, mirando alla trasformazione di un aptica che "guidi verso" ad una che "guidi attraverso".

L'esito della sperimentazione non ha l'ambizione di rappresentare una soluzione definitiva, ma di porsi a seguito di innumerevoli progetti e soluzioni dimostrative e prototipali, come sforzo progettuale che contribuisca, attraverso l'aggiunta di una dimensione multisensoriale agli approcci immersivi, a tessere un panorama in cui le esperienze virtuali raggiungano maggiori gradi di rappresentatività e significatività, ponendoli come strumenti applicativi funzionali e utili in quanto collocati in scenari e contesti d'uso reali che abbiano la possibilità di permanere. Il lavoro svolto, contribuisce alla realizzazione di alcuni primi strumenti, a servizio dei progettisti che lavorano in ambito immersivo, per lavorare sull'esperienza e sull'interfaccia, o in sua assenza, affinché si possano restituire all'utente una quantità di feedback più prossima a quelli ricevuti da uno strumento in uso in uno spazio reale, in questi termini esistono sperimentazioni, ma poche si focalizzano sul ruolo e sul contributo del progettista.

Lo studio di Rokhsaritalemi (2020), propone un framework che identifica e relaziona i componenti necessari alla realizzazione di applicazioni in XR, come mostrato in figura 41. Questa rassegna può aiutare a sviluppare sistemi immersivi avanzati per la formazione in ambito manifatturiero e industriale, offrendo uno spunto per la contestualizzazione di base di un ulteriore inquadramento evolutivo dedicato all'esplosione delle componenti di UI con declinazione alle esperienze immersive mediate da input aptici.

Il protocollo delineatosi applicato per la costruzione del sistema di comunicazione aptico sugli arti superiori per la guida procedurale, esito della valutazione sperimentale, è articolato in sei fasi:

_individuazione della procedura e suddivisione di essa in operazioni;

_scomposizione delle operazioni in azioni tipologiche;

_gerarchizzazione dei livelli di complessità delle informazioni da veicolare;

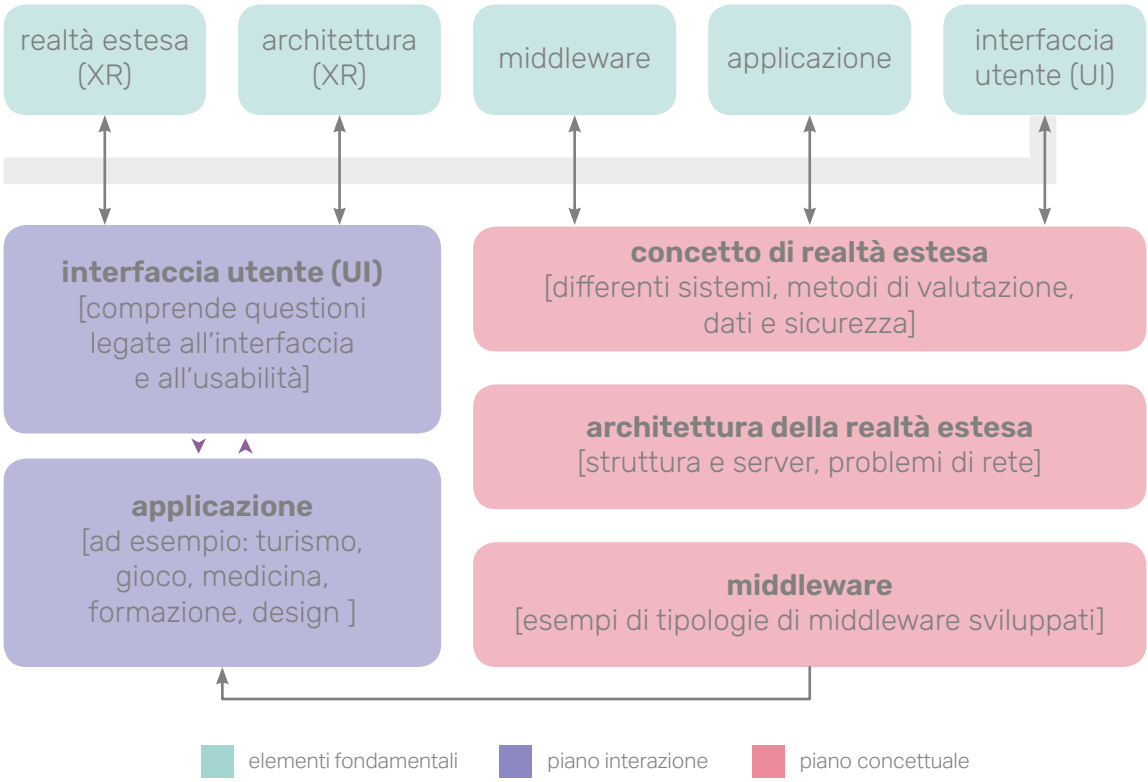


Fig. 41 Framework per le applicazioni immersive nell'ambito manifatturiero tratto dallo studio di Rokhsaritalemi (2020)

_trasduzione le informazioni da trasmettere in impulsi con cui inviare i suggerimenti;

_armonizzazione della struttura delle trasduzioni ai livelli di complessità;

_progettazione dell'esperienza di onboarding.

A corollario di tale pratica, si evidenziano alcuni altri punti a cui dedicare attenzione durante lo sviluppo progettuale, nella fattispecie, occorre bilanciare il modo in cui viene guidato l'utente e la sua agency, cercando un equilibrio tra sicurezza di azione (evitandone la frustrazione) e autonomia (lasciandolo il più possibile libero di navigare nello spazio virtuale). In secondo luogo, siccome la sensibilità agli stimoli vibrotattili, si è dimostrata un'abilità addestrabile e assimilabile in tempi relativamente rapidi, risulta estremamente importante l'ultimo stadio legato all'onboarding al fine di mettere nelle condizioni l'utente di familiarizzare con i dispositivi e le modalità di comunicazione prima dell'esecuzione vera e propria dell'esperienza; questo aspetto infatti incide positivamente sull'accuratezza dell'interpretazione dei segnali e della conseguente correttezza di esecuzione delle operazioni, aspetto da perseguire poiché direttamente influenzante la memorizzazione dei processi, maggiormente dipendente dalle esecuzioni che dalle indicazioni trasmesse.

Indipendentemente dall'aspetto mnemonico, il carattere informativo del protocollo proposto rimane centrale in quanto la sperimentazione dell'uso del progetto dell'interazione nella creazione di esperienze immersive aumentate, orbita attorno alla possibilità di aggiungere agli oggetti in utilizzo uno strato che aumenta il significante e insieme ad esso costituisce l'elemento di trasferimento della conoscenza, identificato come transinformazione virtuale.

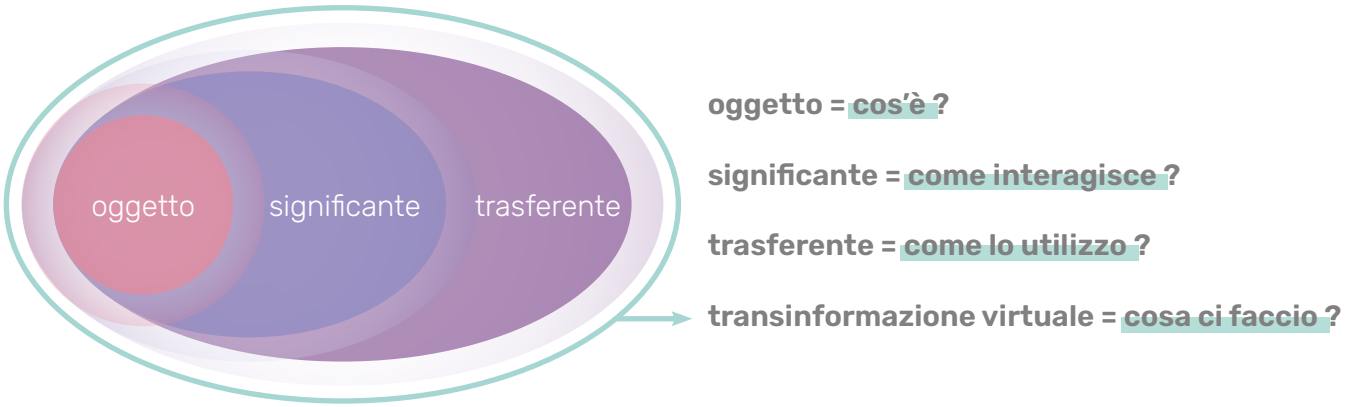


Fig. 42 Visualizzazione del concetto di transinformazione virtuale

L'interpretazione della transinformazione virtuale è fortemente influenzata dall'affordance e in particolar modo dai significanti dell'oggetto o dello strumento in utilizzo, ciò può consentire di approcciare la creazione degli stimoli vibrotattili in modo dedicato, assegnando ad un oggetto un input, oppure raggruppato, assegnando a più oggetti il medesimo segnale, che verrà interpretato differentemente a seconda dell'oggetto impugnato.

Come già ribadito a più riprese, la questione dell'affordance degli oggetti virtuale rimane strettamente dipendente dall'esperienza reale. In questo scenario di esperienza indiretta, la ricerca propone la mediazione di un oggetto avatar, che sfrutti una dimensione indossabile per dimostrare la possibilità di migliorare l'usabilità delle esperienze immersive attraverso la trasmissione di input tattili, in questo caso vibratori, come elementi significanti e di comunicazione tra dispositivo e corpo. Il framework che ne deriva prevede l'impiego di ausili indossabili che, pur destinati in futuro ad assumere forme differenti e progressivamente a dissolversi, si concretizzano attualmente nella forma di un guanto aptico. Questo dispositivo, oltre a guidare l'utente durante l'esperienza aumentata, conserva una valenza operativa nel mondo fisico: la sua presenza materiale richiama gesti e abitudini d'uso, favorendo così la continuità percettiva tra ambiente virtuale e reale.
Per questo motivo, si è scelto di dare precedenza come dinamica di sperimentazione al contesto reale, poiché a fronte di una realizzazione più semplice, rappresenta anche lo scenario più sfidante, in quanto oltre allo stimolo vibrotattile, l'utente è soggetto ad una moltitudine di stimoli esterni.

Da quanto emerso dalla fase pratica di questo progetto, sembra esistere la possibilità di utilizzare forme di stimoli vibrotattili maggiormente articolate al fine di facilitarne la riconoscibilità e distinzione. Questa operazione può comportare l'allungamento dei tempi di memorizzazione del linguaggio, contemporaneamente, però, tale riflessione consente di ampliare l'orizzonte della ricerca nella direzione della sostituzione sensoriale quale possibile ulteriore evoluzione dell'impianto comunicativo aptico per la guida operativa nelle esperienze immersive (Berta, 2020; Novich & Eagleman, 2015).
Il tema in questione e le considerazioni che seguiranno nel paragrafo successivo, dunque, delineano le tracce future di indagine, in cui design e sperimentazione dovranno continuare a operare in sinergia per rendere le esperienze immersive più accessibili, significative e funzionali.

6.3 Confini ed estensioni future

Quanto emerso dalla ricerca condotta rappresenta solo un primo passo, gli sviluppi futuri dovranno concentrarsi sull'estensione del campo di prova e sulla diversificazione dei contesti applicativi. Una delle prime linee di indagine riguarda la possibilità di testare i principi elaborati non soltanto in ambienti reali, ma anche in scenari virtuali, verificando se la trasposizione in spazi simulati possa mantenere lo stesso livello di efficacia e di trasferimento delle competenze. Questa fase di ampliamento consentirebbe di valutare la solidità del modello e la sua adattabilità a situazioni non direttamente connesse al contesto produttivo originario. Parallelamente, è necessario incrementare la numerosità e la varietà dei campioni coinvolti, includendo operatori con differenti livelli di esperienza, provenienza settoriale e competenze pregresse. L'allargamento della base sperimentale permetterà di osservare come le differenze individuali incidano sulla ricezione dei segnali tattili, offrendo indicazioni utili per raffinare la progettazione dei protocolli e delle interfacce. Un altro punto chiave riguarda la necessità di stressare il sistema con procedure complesse, introducendo sequenze più lunghe e articolate di stimoli, così da testare la robustezza del metodo e la sua capacità di reggere la scalabilità.
La prospettiva di estendere la sperimentazione apre, inoltre, alla possibilità di monitorare il comportamento degli utenti su tempi più lunghi, valutando il grado di memorizzazione dei gesti, la riduzione della dipendenza dagli stimoli e l'acquisizione di maggiore autonomia.

In sintesi, l'estensione della sperimentazione mira a trasformare l'impianto concettuale in una metodologia stabile, validata in contesti eterogenei e capace di offrire risposte concrete alle esigenze di formazione, manutenzione e supporto operativo in diversi domini applicativi. Accanto agli sviluppi pratici, il percorso futuro della ricerca prevede l'apertura di linee di approfondimento teorico capaci di consolidare le basi epistemologiche del lavoro. Una prima direzione riguarda l'esplorazione del campo dei wearable e degli e-textiles, intesi come dispositivi in grado di integrare sensori e attuatori all'interno di tessuti intelligenti. In tale prospettiva, l'elemento aptico non viene più pensato come accessorio, ma come parte integrante del corpo, con implicazioni rilevanti in termini di percezione, ergonomia e accettazione sociale.

Un secondo tema di riflessione riguarda l'inquadramento del concetto di controller: non più inteso soltanto come strumento fisico di input, ma come stimolo per individuare e progettare nuove forme di interazione. In questo senso, i dispositivi aptici possono essere interpretati come meta-controller, capaci di suggerire non solo comandi puntuali ma strategie d'azione e schemi procedurali. Questo approccio invita a riconsiderare la relazione tra oggetto, significante e trasferente, aprendo la strada a una teoria più ampia della mediazione aptica come linguaggio.

Un ulteriore filone di approfondimento concerne la possibilità di sviluppare varianti del framework di riferimento, che estendano la descrizione del sistema di comunicazione aptica: dalla definizione delle tipologie di segnali, alla classificazione dei livelli di complessità, fino alla costruzione di grammatiche tattili che possano guidare le fasi progettuali. La formalizzazione di tali framework, integrata da altre campagne di sperimentazioni controllate, potrà contribuire al superamento della frammentarietà attuale di tale contesto, fornendo linee guida replicabili in diversi ambiti applicativi. In conclusione, l'approfondimento teorico si configura come terreno indispensabile per trasformare gli esiti della sperimentazione in conoscenza strutturata, capace di orientare la ricerca futura e di concorrere all'evoluzione del design dell'interazione per i sistemi immersivi.

Espandendo i contesti già esplorati, la ricerca apre prospettive considerevoli in differenti altri campi applicativi, dove l'integrazione di stimoli aptici e di interfacce non visuali può generare benefici tangibili. In primo luogo, la riabilitazione, con particolare attenzione alla terapia occupazionale, rappresentando un campo promettente in cui l'uso di dispositivi indossabili o patch tattili potrebbe condurre i pazienti nell'esecuzione di esercizi motori, fornendo pungoli che facilitino la corretta esecuzione dei movimenti.
L'aptica, in questo caso, si configura come allenatore silenzioso, capace di personalizzare l'intensità e la frequenza dei feedback in funzione delle esigenze riabilitative e delle soglie di tolleranza individuali.

Altra possibile applicazione riguarda l'apprendimento nel campo musicale, dove la guida vibrotattile può suggerire la posizione corretta delle dita, il ritmo o la pressione da esercitare. Questo approccio potrebbe supportare non solo i principianti, ma anche musicisti avanzati interessati a perfezionare la propria tecnica attraverso trigger rapidi e specifici (Gemicioglu et al., 2024).

Infine, il tema degli input aptici può estendersi a una serie di altri contesti emergenti, dalla formazione in scenari di emergenza e sicurezza, al supporto nelle attività chirurgiche, fino ad applicazioni educative dedicate a persone con difficoltà visive.
In ciascuno di questi casi, il valore aggiunto consiste nella possibilità di ridurre la dipendenza dal canale visivo e ampliare le modalità di apprendimento e interazione.
Il quadro che si delinea è, dunque, quello di un approccio trasversale, capace di adattarsi a domini diversi mantenendo invariata la sua funzione principale: accompagnare l'utente in un processo di conoscenza incarnata, dove il gesto guidato dall'aptica diventa strumento di apprendimento e di esplorazione.

Bibliografia - Terza Sezione

Ispirazioni e referenze

Baldi, T. L., D'Aurizio, N., & Prattichizzo, D. (2020). Hand Guidance Using Grasping Metaphor and Wearable Haptics. *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 961–967. https://doi.org/10.1109/HAPTICS45997.2020.ras.HAP20.3.3eea0b25

Berta, Y. (2020). Sensory Augmentation and the Tactile Sublime. *Debates in Aesthetics*, *15*(1), 11–33.

Bouzbib, E., Sarasate, I., Fernandez, U., Fernandez, I., López-Amo, M., Ezcurdia, I., & Marzo, A. (2025, aprile). FlexiVol: A Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'25)*. https://doi.org/10.1145/3706598.3714315

Campenhout, L., Camp, M., & Vancoppenolle, W. (2020). Exploring Tangible VR as a Tool for Workplace Design. *Companion Proceedings of the 2020 Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 33–36. https://doi.org/10.1145/3380867.3426202

Case, A. (2015). *Calm Technology: Principles and Patterns for Non-Intrusive Design*. O'Reilly Media, Inc.

Ceccacci, S., Gentilozzi, C., Marfoglia, A., Santilli, T., Mengoni, M., Capellini, S. A., & Giaconi, C. (2023). Haptic Feedback to Support the Conceptualization of the Shape of Virtual Objects: An Exploratory Study. In M. Antona & C. Stephanidis (A c. Di), *Universal Access in Human-Computer Interaction* (pp. 215–228). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35681-0_14

Dall'Osso, G., Zannoni, M., & Licaj, A. (2022). Design Elements for the Implementation of Threshold Crossing In and Out of Mixed Reality: In F. M. Ugliotti & A. Osello (A c. Di), *Advances in Human and Social Aspects of Technology* (pp. 15–41). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-6684-4854-0.ch002

Dall'Osso & Pezzi. (2022). Haptic microinteractions, silent details in human-space interaction. In *Human Body Interaction* (p. 12). https://cris.unibo.it/handle/11585/912364

Dalsgaard, T.-S., & Schneider, O. (2025). A Unified Model for Haptic Experience. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3711842. https://doi.org/10.1145/3711842

Daniel Kahneman. (2013). *Pensieri lenti e veloci*. Mondadori.

Dash, D., Ferrari, P., Dutta, S., & Wang, J. (2020). NeuroVAD: Real-Time Voice Activity Detection from Non-Invasive Neuromagnetic Signals. *Sensors*, *20*(8), Articolo 8. https://doi.org/10.3390/s20082248

de Castell, S., Jenson, J., & Thumlert, K. (2014). From Simulation to Imitation: Controllers, Corporeality, and Mimetic Play. *Simulation & Gaming*, *45*(3), 332–355. https://doi.org/10.1177/1046878114542316

de Souza, C. S. (1993). The semiotic engineering of user interface languages. *International Journal of Man-Machine Studies*, *39*(5), 753–773. https://doi.org/10.1006/imms.1993.1082

de Souza, C. S. de, Prates, R. O., & Carey, T. (2000). Missing and declining affordances: Are these appropriate concepts? *Journal of the Brazilian Computer Society, 7*, 26–34. https://doi.org/10.1590/S0104-65002000000200004

Doolani, S., Wessels, C., Kanal, V., Sevastopoulos, C., Jaiswal, A., Nambiappan, H., & Makedon, F. (2020). A Review of Extended Reality (XR) Technologies for Manufacturing Training. *Technologies, 8*(4), Articolo 4. https://doi.org/10.3390/technologies8040077

Dourish, P. (2001). Seeking a Foundation for Context-Aware Computing. *Human–Computer Interaction, 16*(2–4), 229–241. https://doi.org/10.1207/S15327051HCI16234_07

Dyck, F., Stöcklein, J., Eckertz, D., & Dumitrescu, R. (2020). Mixed Mock-up – Development of an Interactive Augmented Reality System for Assembly Planning. In J. Y. C. Chen & G. Fragomeni (A c. Di), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction* (pp. 37–49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49695-1_3

Farahany, N. A. (2023). *The Battle for Your Brain: Defending the Right to Think Freely in the Age of Neurotechnology*. St. Martin's Publishing Group.

Fast-Berglund, Å., Gong, L., & Li, D. (2018). Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manufacturing, 25*, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054

Flaviano Celaschi, & Casoni Giorgio. (2020). *Human Body design*. Franco Angeli.

Francés-Morcillo, L., Morer-Camo, P., Rodríguez-Ferradas, M. I., & Cazón-Martín, A. (2018). *The role of user-centred design in smart wearable systems design process*. 2197–2208. https://doi.org/10.21278/idc.2018.0405

Gee, J. P. (2003). What video games have to teach us about learning and literacy. *Comput. Entertain., 1*(1), 20. https://doi.org/10.1145/950566.950595

Gemicioglu, T., Hopper, E., Dwivedi, B., Kulkarni, R., Bhandarkar, A., Rajan, P., Eng, N., Ramanujam, A., Ramey, C., Gilliland, S. M., Mason, C., Seim, C., & Starner, T. (2024). Passive Haptic Rehearsal for Augmented Piano Learning in the Wild. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 8*(4), 1–26. https://doi.org/10.1145/3699748

Gibson, W. (1984). *Neuromancer*. Ace Books.

Giddings, S. (2005, gennaio 1). Playing With Non-Humans: Digital Games as Techno-Cultural Form. *Proceedings of DiGRA 2005 Conference: Changing Views: Worlds in Play*. Proceedings of DiGRA 2005 Conference: Changing Views: Worlds in Play. https://doi.org/10.26503/dl.v2005i1.219

Gong, W., Santosa, S., Grossman, T., Glueck, M., Clarke, D., & Lai, F. (2023). Affordance-Based and User-Defined Gestures for Spatial Tangible Interaction. *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 1500–1514. https://doi.org/10.1145/3563657.3596032

Günther, S., Müller, F., Funk, M., Kirchner, J., Dezfuli, N., & Mühlhäuser, M. (2018). TactileGlove: Assistive Spatial Guidance in 3D Space through Vibrotactile Navigation. *Proceedings of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference*, 273–280. https://doi.org/10.1145/3197768.3197785

Heinonen, H. (2023). *The Benefits of Extended Reality for Technical Communication: Utilizing XR for Maintenance Documentation Creation and Delivery*. Tampere University. https://trepo.tuni.fi/handle/10024/149933

Hornsby, J. H., Arnwine, A., Stowe, A., Lin, M., Mason, C., Eakins, M., Veller, D., Mendoza, C., Metcalf, D., Oriaifo, V., Dunar, A., & Crockett, B. (2025). VR haptics for glovebox operations training. *Frontiers in Virtual Reality, 6*, 1560713. https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1560713

Hsieh, Y.-T., Jylhä, A., Orso, V., Andolina, S., Hoggan, E., Gamberini, L., & Jacucci, G. (2019). Developing hand-worn input and haptic support for real-world target finding. *Personal and Ubiquitous Computing, 23*(1), 117–132. https://doi.org/10.1007/s00779-018-1180-z

Hundia, R., Vijayvargiya, A., & Quigley, A. (2020). Closed loop feedback nudges using nerve stimulation. *Companion Proceedings of the 12th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, 1–6. https://doi.org/10.1145/3393672.3398642

Jacquemin, P. H., Gräf, M., Hendriks, P., & Wahl, N. (2024). *Beyond the Screen: Developing Design Principles and Nudges for Enhancing Virtual Team Collaboration in the Metaverse*.

Jorgensen, K. (2013). *Gameworld Interfaces*. MIT Press.

Kettner, R., Bader, P., Kosch, T., Schneegass, S., & Schmidt, A. (2017). Towards pressure-based feedback for non-stressful tactile notifications. *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. https://doi.org/10.1145/3098279.3122132

Latour, B. (2005). *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory*. OUP Oxford.
Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems, 65*, 279–295. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017

Limbu, B., Fominykh, M., Klemke, R., Specht, M., & Wild, F. (2018). Supporting Training of Expertise with Wearable Technologies: The WEKIT Reference Framework. In S. Yu, M. Ally, & A. Tsinakos (A c. Di), *Mobile and Ubiquitous Learning: An International Handbook* (pp. 157–175). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6144-8_10

Long, T., Gero, K. I., & Chilton, L. B. (2024). Not Just Novelty: A Longitudinal Study on Utility and Customization of an AI Workflow. *Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 782–803. https://doi.org/10.1145/3643834.3661587

Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P. M., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition, 107*(3), 978–998. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004

Ma, J., Kim, J.-S., & Kyung, K.-U. (2024). A Hybrid Haptic Device for Virtual Car Door Interactions: Design and Implementation. *IEEE Robotics and Automation Letters, 9*(10), 8850–8857. https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3405813

Morosi, F., Carli, I., Caruso, G., Cascini, G., Dhokia, V., & Ben Guefrache, F. (2018). Analysis of co-design scenarios and activities for the development of a spatial-augmented reality design platform. *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 381–392. https://doi.org/10.21278/idc.2018.0504

Norman, D. (2019). La caffettiera del masochista: Il design degli oggetti quotidiani. (Prima edizione riveduta e ampliata). *Giunti Psychometrics Srl*.

Novich, S. D., & Eagleman, D. M. (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput. *Experimental Brain Research*, *233*(10), 2777–2788. https://doi.org/10.1007/s00221-015-4346-1

Pavlovic, V. I., Sharma, R., & Huang, T. S. (1997). Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *19*(7), 677–695. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. https://doi.org/10.1109/34.598226

Pham, T. an, Moesgen, T., Siltanen, S., Bergström, J., & Xiao, Y. (2022). ARiana: Augmented Reality Based In-Situ Annotation of Assembly Videos. *IEEE Access*, *10*, 111704–111724. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3216015

Pham, T. A., Wang, J., Iyengar, R., Xiao, Y., Pillai, P., Klatzky, R., & Satyanarayanan, M. (2021). Ajalon: Simplifying the authoring of wearable cognitive assistants. *Software: Practice and Experience*, *51*(8), 1773–1797. https://doi.org/10.1002/spe.2987

Ricci, M., Scarcelli, A., & Fiorentino, M. (2023). Designing for the Metaverse: A Multidisciplinary Laboratory in the Industrial Design Program. *Future Internet*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/fi15020069

Rokhsaritalemi, S., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S.-M. (2020). A Review on Mixed Reality: Current Trends, Challenges and Prospects. *Applied Sciences*, *10*(2), 636. https://doi.org/10.3390/app10020636

Sung, Y., John, K., Yoon, S. H., & Seifi, H. (2025). HapticGen: Generative Text-to-Vibration Model for Streamlining Haptic Design. *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–24. https://doi.org/10.1145/3706598.3713609

Tajdari, M., Forsyth, J., & Lim, S. (2025). *Navigating with Haptic Gloves: Investigating Strategies for Horizontal and Vertical Movement Guidance* (No. arXiv:2503.23484). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.23484

Tashiro, N., Faulkner, R., Melnyk, S., Rosales Rodriguez, T., Javot, B., Tahouni, Y., Cheng, T., Wood, D., Menges, A., & Kuchenbecker, K. J. (2024). Building Instructions You Can Feel: Edge-Changing Haptic Devices for Digitally Guided Construction. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3698235. https://doi.org/10.1145/3698235

Uva, A. E., Gattullo, M., Manghisi, V. M., Spagnulo, D., Cascella, G. L., & Fiorentino, M. (2018). Evaluating the effectiveness of spatial augmented reality in smart manufacturing: A solution for manual working stations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *94*(1), 509–521. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0846-4

Vignali, V., Zannoni, M., & Pucci, D. (2024, ottobre 17). The future evolution of design-oriented practices in the context of human and non-human collaboration. *Design Across Borders: United in Creativity*. Cumulus Monterrey 2024, Monterrey.

Wang, G., Wang, H.-H., & Ren, G. (2024). Visual and Haptic Guidance for Enhancing Target Search Performance in Dual-Task Settings. *Applied Sciences*, *14*(11), Articolo 11. https://doi.org/10.3390/app14114650

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *7*(3), 225–240. https://doi.org/10.1162/105474698565686

Youn, J.-H., Jang, S.-Y., Hwang, I., Pei, Q., Yun, S., & Kyung, K.-U. (2025). Skin-attached haptic patch for versatile and augmented tactile interaction. *Science Advances*, *11*(12), eadt4839. https://doi.org/10.1126/sciadv.adt4839

Zammuner, V. (2000). *Tecniche dell'intervista e del questionario.* ITA. https://www.research.unipd.it/handle/11577/1471937

Zannoni, M., Saponelli, R., Pucci, D., & Rosato, L. (2025). *Haptic perception and enhancement of the interactive textile XR experience.* ITA. https://cris.unibo.it/handle/11585/1020857

Sitografia

Cortese, M. (2024). *Embodying the Machine.* Embodying the Machine. https://www.embodyingthemachine.com

Vuzix' Smart Glasses Leadership Continues as Blade is Officially Safety Certified. (s.d.). Vuzix Corporation. Recuperato 16 maggio 2025, da https://www.vuzix.com/blogs/vuzix-blog/vuzix-smart-glasses-leadership-continues-as-blade-is-officially-safety-certified

Allegati
Documento esteso

04.

La quarta sezione di questo elaborato contiene alcune schede di approfondimento utili a riassumere e specificare gli elementi più tecnici delle sperimentazioni, suddivise per i tre gruppi di test. Infine è presentato un blocco composto da settanta casi di studio utile a chiarirne i criteri di scelta e delineare uno spaccato del panorama attuale degli approcci immersivi all'interno del quale la ricerca presentata ha tratto sviluppo.

Allegato / 01 Scheda riassuntiva del Test effettuato con il Gruppo 1 159

Allegato / 02 Scheda riassuntiva del Test effettuato con il Gruppo 2 160

Allegato / 03 Scheda riassuntiva del Test effettuato con il Gruppo 3 161

Codice / 01 Codice Python per il comando del prototipo 163

Codice / 02 Codice Arduino per il controllo del guanto 164

Casi di studio / 01-70 Schede di sintesi di una selezione di progetti 168

Allegato / 01

Test Gruppo 1 (G1)

Struttura - Protocollo 1

Tempo svolgimento prova intera	60 minuti
Introduzione al test e consenso raccolta dati	5 minuti
Spiegazione delle modalità e delle fasi del test	5 minuti
Riconoscimento degli stimoli e proposta gesto assegnato	15 minuti
Scelta oggetto senza alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Scelta oggetto con alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura corta	5 minuti
Ripetizione a memoria procedura corta	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura lunga	10 minuti
Ripetizione a memoria procedura lunga	5 minuti

Obiettivi

> Valutare l'indossabilità e l'usabilità del dimostratore
> Valutare la comprensibilità degli stimoli
> Valutare la memorabilità del suggerimento
> Valutare l'accettabilità del sistema proposto
> Raccogliere suggerimenti riguardo possibili traduzioni azione-stimolo aptico

Raccolta dati e valutazione

Osservazione dell'esecuzione e raccolta dei feedback ricevuti.
Sono state prese in considerazione come esecuzioni corrette solamente le gestualità corrispondenti all'input ricevuto. Sono state escluse le interpretazioni scorrette, le esecuzioni in senso contrario e le esecuzioni corrette successivamente modificate.
Per non perdere informazioni preziose, le fasi di esecuzione e memorizzazione delle procedure sono state registrate consensualmente tramite ripresa video.

Spazio e setting

La prova si è svolta all'interno di un'aula universitaria dotata di prese di corrente.
Le prove sono state condotte individualmente su un tavolo dedicato, contestualmente era in svolgimento un lavoro di gruppo per simulare un ambiente con rumorosità media 60-70 dB per comprendere se i segnali fossero percepibili anche a canale uditivo disturbato.
Area di lavoro 100x60cm nel quale erano predisposti il guanto dimostratore, il pc collegato tramite cavo e i tre strumenti archetipici: cacciavite, bottiglia e scatola.

Partecipanti / n° 6 su base volontaria

	età	sesso	elettronica	smart	videogiochi	VR	aptica
Tester 01	18-25	uomo	5/5	4/5	2/5	4/5	3/5
Tester 02	25-35	donna	5/5	5/5	4/5	4/5	3/5
Tester 03	18-25	uomo	4/5	4/5	2/5	1/5	1/5
Tester 04	18-25	donna	4/5	4/5	4/5	3/5	3/5
Tester 05	18-25	donna	4/5	3/5	4/5	3/5	3/5
Tester 06	18-25	donna	5/5	4/5	2/5	2/5	2/5

Test Gruppo 2 (G2)

Struttura - Protocollo 2

Tempo svolgimento prova intera	60 minuti
Introduzione al test e consenso raccolta dati	5 minuti
Spiegazione delle modalità e delle fasi del test	5 minuti
Esecuzione azioni con segnale in sottofondo + riconoscimento	15 minuti
Scelta oggetto senza alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Scelta oggetto con alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura corta	5 minuti
Ripetizione a memoria procedura corta	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura lunga	10 minuti
Ripetizione a memoria procedura lunga	5 minuti

Obiettivi

> Valutare l'indossabilità e l'usabilità del dimostratore
> Valutare la comprensibilità degli stimoli trasmessi in contemporanea all'esecuzione
> Valutare la memorabilità del suggerimento
> Valutare l'accettabilità del sistema proposto
> Raccogliere suggerimenti riguardo possibili traduzioni azione-stimolo aptico

Raccolta dati e valutazione

Osservazione dell'esecuzione e raccolta dei feedback ricevuti.
Sono state prese in considerazione come esecuzioni corrette solamente le gestualità corrispondenti all'input ricevuto. Sono state escluse le interpretazioni scorrette, le esecuzioni in senso contrario e le esecuzioni corrette successivamente modificate.
Per non perdere informazioni preziose, le fasi di esecuzione e memorizzazione delle procedure sono state registrate consensualmente tramite ripresa video.

Spazio e setting

La prova si è svolta all'interno di un'aula universitaria dotata di prese di corrente.
Le prove sono state condotte individualmente su un tavolo dedicato, contestualmente era in svolgimento un lavoro di gruppo per simulare un ambiente con rumorosità media 60-70 dB per comprendere se i segnali fossero percepibili anche a canale uditivo disturbato.
Area di lavoro 100x60cm nel quale erano predisposti il guanto dimostratore, il pc collegato tramite cavo e i tre strumenti archetipici: cacciavite, bottiglia e scatola.

Partecipanti / n° 6 su base volontaria

	età	sesso	elettronica	smart	videogiochi	VR	aptica
Tester 01	18-25	Uomo	4/5	4/5	4/5	2/5	2/5
Tester 02	18-25	Donna	5/5	5/5	5/5	3/5	2/5
Tester 03	18-25	Donna	5/5	5/5	2/5	3/5	1/5
Tester 04	18-25	Uomo	5/5	4/5	5/5	2/5	2/5
Tester 05	18-25	Uomo	5/5	5/5	5/5	3/5	3/5
Tester 06	18-25	Donna	4/5	3/5	3/5	2/5	1/5

Allegato / 03

Test Gruppo 3 (G3)

Struttura - Protocollo 1

Tempo svolgimento prova intera	60 minuti
Introduzione al test e consenso raccolta dati	5 minuti
Spiegazione delle modalità e delle fasi del test	5 minuti
Riconoscimento degli stimoli e proposta gesto assegnato	15 minuti
Scelta oggetto senza alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Scelta oggetto con alfabetizzazione sui segnali	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura corta	5 minuti
Ripetizione a memoria procedura corta	5 minuti
Esecuzione sequenza procedura lunga	10 minuti
Ripetizione a memoria procedura lunga	5 minuti

Obiettivi

> Valutare l'indossabilità e l'usabilità del dimostratore
> Valutare la comprensibilità degli stimoli
> Valutare la memorabilità del suggerimento
> Valutare l'accettabilità del sistema proposto
> Verificare e Validare i dati raccolti nelle precedenti due campagne

Raccolta dati e valutazione

Osservazione dell'esecuzione e raccolta dei feedback ricevuti.
Sono state prese in considerazione come esecuzioni corrette solamente le gestualità corrispondenti all'input ricevuto. Sono state escluse le interpretazioni scorrette, le esecuzioni in senso contrario e le esecuzioni corrette successivamente modificate.
Per non perdere informazioni preziose, le fasi di esecuzione e memorizzazione delle procedure sono state registrate consensualmente tramite ripresa video.

Spazio e setting

La prova si è svolta all'interno di un'aula universitaria dotata di prese di corrente.
Le prove sono state condotte individualmente su un tavolo dedicato, contestualmente era in svolgimento un lavoro di gruppo per simulare un ambiente con rumorosità media 60-70 dB per comprendere se i segnali fossero percepibili anche a canale uditivo disturbato.
Area di lavoro 100x60cm nel quale erano predisposti il guanto dimostratore, il pc collegato tramite cavo e i tre strumenti archetipici: cacciavite, bottiglia e scatola.

Partecipanti / n° 6 su base volontaria

	età	sesso	elettronica	smart	videogiochi	VR	aptica
Tester 01	25-35	Uomo	5/5	5/5	4/5	4/5	2/5
Tester 02	18-25	Uomo	5/5	5/5	5/5	4/5	2/5
Tester 03	18-25	Donna	4/5	4/5	1/5	2/5	3/5
Tester 04	25-35	Uomo	5/5	5/5	4/5	2/5	1/5
Tester 05	18-25	Uomo	5/5	3/5	3/5	3/5	2/5
Tester 06	25-35	Donna	5/5	5/5	5/5	4/5	4/5

Codice / 01

Codice in ambiente Python per il comando del guanto tramite tastiera del pc:

```python
import serial
import keyboard
import time

# Imposta la porta seriale corretta per il tuo sistema
ser = serial.Serial('COM3', 9600)
time.sleep(2)  # Attendi che Arduino si resetti

print("Premi un tasto tra Q-X per attivare una sequenza. ESC per uscire.")

try:
    while True:
        for key in "qwertyuiafdszx":
            if keyboard.is_pressed(key):
                ser.write(key.upper().encode())
                print(f"Sequenza {key.upper()} inviata.")
                time.sleep(0.5)  # Anti-rimbalzo

        if keyboard.is_pressed('esc'):
            print("Uscita...")
            break

except KeyboardInterrupt:
    print("Interrotto manualmente.")

finally:
    ser.close()
```

Codice in ambiente Arduino per il comando degli input aptici:

```
const int motorPins[] = {3, 5, 6, 9};
 const int MOTOR_3 = 0;
 const int MOTOR_5 = 1;
 const int MOTOR_6 = 2;
 const int MOTOR_9 = 3;
 void setup() {
  Serial.begin(9600);
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    pinMode(motorPins[i], OUTPUT);
    analogWrite(motorPins[i], 0);
  }
 }
 void vibrateMotor(int index, int intensity_percent, int duration_ms) {
  int pwm_value = map(intensity_percent, 0, 100, 0, 255);
  analogWrite(motorPins[index], pwm_value);
  delay(duration_ms);
  analogWrite(motorPins[index], 0);
 }
 void allMotors(int intensity_percent, int duration_ms) {
  int pwm_value = map(intensity_percent, 0, 100, 0, 255);
  for (int i = 0; i < 4; i++) analogWrite(motorPins[i], pwm_value);
  delay(duration_ms);
  for (int i = 0; i < 4; i++) analogWrite(motorPins[i], 0);
 }
 void loop() {
  if (Serial.available()) {
    char cmd = Serial.read();
    switch (cmd) {
      case 'Q':                                          // Move to the left
        vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
        break;
      case 'W':                                          // Clockwise Rotation
        vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
        break;
      case 'E':                                          // Move clockwise
        vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
        break;
      case 'R':                                          // Rescue = stop everithing
        for (int i = 0; i < 3; i++) {
          allMotors(100, 300);
          delay(500);
        }
        break;
      case 'T':                                          // Left motor activation
        vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
        break;
      case 'Y':                                          // Center low motor activation
        vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);
        break;
      case 'U':                                          // Center high motor activation
        vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
        break;
      case 'I':                                          // Right motor activation
        vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
        break;
      case 'A':                                          // // Move to the right
        vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);
        delay(300);
        vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
        break;
      case 'S':                                          // Counterclockwise Rotation
```

```
74          vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);
75          delay(300);
76          vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
77          delay(300);
78          vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
79          delay(300);
80          vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
81          break;
82        case 'D':                                       // Move counterclockwise
83          vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
84          delay(300);
85          vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
86          delay(300);
87          vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
88          break;
89        case 'F':                                       // Shaking
90          for (int i = 0; i < 3; i++) {
91            vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
92            delay(300);
93            vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
94            delay(300);
95          }
96          break;
97        case 'Z':                                       // Block selection - move to right -
98                                                        //rotation - state of rest
99          vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);               // Block selection
100         delay(7000);
101         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // move to right
102         delay(300);
103         vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
104         delay(7000);
105         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);               // state of rest
106         delay(7000);
107         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);               // screwdriver selection
108         delay(7000);
109         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // counterclockwise rotation
110         delay(300);
111         vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
112         delay(300);
113         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
114         delay(300);
115         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
116         delay(7000);
117         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);               // state of rest
118         break;
119       case 'X':                                       // Bottle selection - counterclockwi
120                                                       // screwdriver selection - move to l
121                                                       // Rescue = stop everithing
122         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // Block selection
123         delay(7000);
124         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // Counterclockwise rotation
125         delay(300);
126         vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
127         delay(300);
128         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
129         delay(300);
130         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
131         delay(7000);
132         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // Clockwise rotation
133         delay(300);
134         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
135         delay(300);
136         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
137         delay(300);
138         vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);
139         delay(7000);
140         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);               // State of rest
141         delay(7000);
142         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);               // Screwdriver selection
143         delay(7000);
144         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);               // Move to left
145         delay(300);
146         vibrateMotor(MOTOR_3, 60, 300);
```

```
147         delay(7000);
148         vibrateMotor(MOTOR_5, 60, 300);                    // Move foreward
149         delay(300);
150         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);
151         delay(7000);
152         vibrateMotor(MOTOR_6, 60, 300);                    // State of rest
153         delay(7000);
154         vibrateMotor(MOTOR_9, 60, 300);                    // Block selection
155         delay(1500);
156         vibrateMotor(MOTOR_3, 100, 0 );                   // Rescue = stop everithing
157         vibrateMotor(MOTOR_5, 100, 0 );
158         vibrateMotor(MOTOR_6, 100, 0 );
159         vibrateMotor(MOTOR_9, 100, 0 );
160         for (int i = 0; i < 3; i++) {
161           allMotors(100, 300);
162           delay(500);
163         }
164         break;
165       default:
166         break;
167     }
168   }
169 }
```

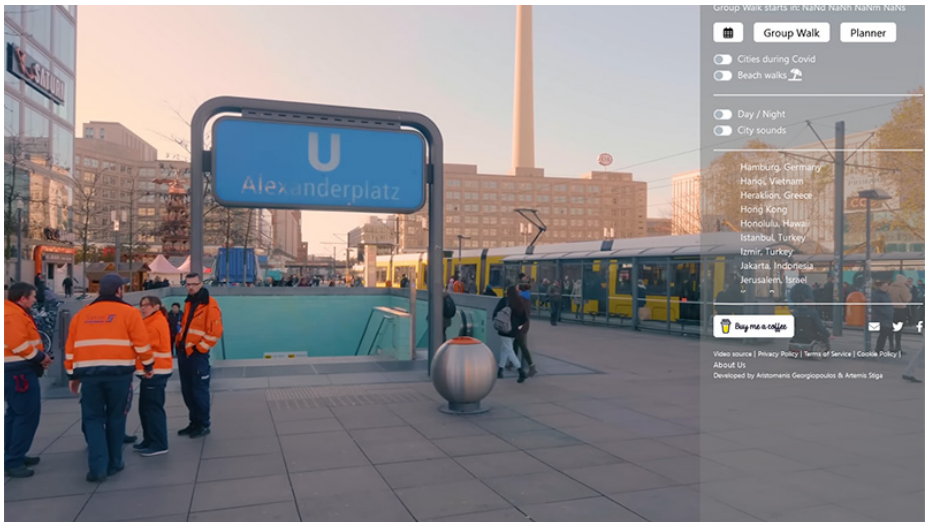
Casi di Studio
Documento esteso

I progetti riportati nelle seguenti pagine rappresentano i settanta casi di studio più significativi della selezione integrale limitata a centocinquanta.
Di seguito si riporta l'elenco dei progetti catalogati ma non inclusi dall'approfondimento:

71 / 2Sync
72 / 3D Experience Dassault System
73 / Actual Reality
74 / AI2RE Image to 3D
75 / ARTIS - Intervention & Surgery
76 / Bioelastic State Recovery
77 / Brelyon Ultra Reality
78 / Builderxrobotics
79 / Catch Pixel
80 / Cortona 3D
81 / Cubism AR (dynamic occlusion)
82 / EKR
83 / EmoTense suit
84 / Enovia
85 / EVOVA Fashion 3D Service
86 / EyeCane
87 / FAA and EASA - Flight Training
88 / Figma AR Plugin
89 / Fluid.So
90 / Frame AR by BriliantLabs
91 / Framless (London Museum)
92 / Haply Haptic Controller
93 / Holotile floor (Disney)
94 / Hover.fit
95 / Infinity Football XR
96 / InflatableBots
97 / iRhino3D (Apple's roomplan API)
98 / Jump Limtless flight
99 / Lungy (Vision Pro)
100 / M5Stack AR UX
101 / Magnetomyography (MMG)
102 / Meshtron
103 / Mixed Reality Makeup
104 / MOJIE's ultra lightweight
105 / Mood Mirror
106 / Motiglove
107 / Mudra Link
108 / Multi-floor tool (virtualgoreality)
109 / MYO electromyography
110 / MYVRS Virtual Pod & App
111 / NaQi logic
112 / Niagara Fluids (Unreal Plugin)
113 / Panorama Ambient VR
114 / Pininfarina AR/VR styling
115 / Puttview
116 / Ready Player Me avatar
117 / RealMeasure AR
118 / Reskin reality dpt.
119 / Rokid Cupcake AR Glasses
120 / Roto VR Explorer
121 / SeeSignals BadVR
122 / ShapesXR
123 / Simtryx
124 / SitePrint (HP Construction)
125 / Skyreal VR
126 / Sony XR Head-Mounted Display
127 / Spacetop G1
128 / Surgical AR (MedVis)
129 / Tanvas Haptic Surface
130 / Teamcenter
131 / Teledomica
132 / Theater Elsewhere
133 / Transferscope
134 / Transparent peelable display
135 / UCloth (for Unity)
136 / Ultraleap
137 / Unware Holodeck
138 / Vein illumination (Christie Medical)
139 / Vellum for Houdini
140 / ViPins
141 / VIRNECT VisionX
142 / Virtual Art Gallery
143 / Vision Pro Cooking assistant
144 / Voxon volumetric holograms
145 / Vuforia
146 / Windchill
147 / Xr Vizion
148 / Xspaces
149 / Zero10AR
150 / Zibra AI (liquid simulation)

Caso di studio / 01

2City Walks Live



Stato del progetto

Soluzione in commercio

TRL

9

Anno

2021

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Simulativo

Tag

VR / Live Exploration / Training

Descrizione

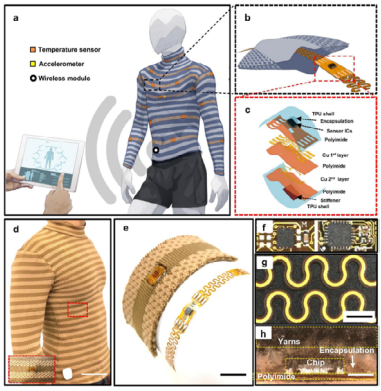
2City Walks Live offre passeggiate virtuali immersive in città reali tramite video ad alta qualità. Pensata per turismo digitale, fitness leggero e relax, permette esplorazioni urbane realistiche con suoni ambientali e una vasta varietà di località. La piattaforma è usata per educazione, scoperta culturale e intrattenimento.

Link riferimento

https://citywalks.live/

Caso di studio / 02

Electronic Textile Suit



Anno

2021

Nazionalità

Cina

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

Smart Textile / Physiological Sensing / Hardware

Descrizione

E?TeCS è una tuta tessile intelligente dotata di rete sensoriale per monitorare segnali fisiologici come temperatura, respirazione e frequenza cardiaca. Concepita per medicina preventiva, sport e telemonitoraggio, combina comfort, flessibilità e precisione tramite tecniche di tessitura avanzata e sensori integrati.

Link riferimento

https://www.media.mit.edu/projects/a-tailored-electronic-textile-conformable-suit/overview/

Caso di studio / 03

Afference

AFFERENCE

Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

Haptic Feedback / Wearable / Hardware

Descrizione

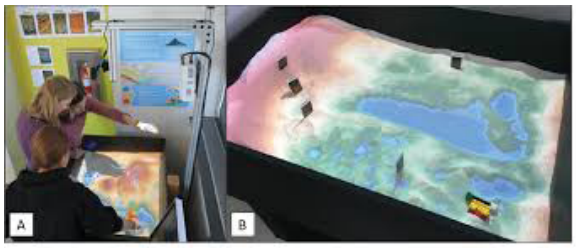
Afference sviluppa un sistema di neural haptics che genera sensazioni tattili tramite stimolazione elettrica non invasiva. L'Afference Ring consente feedback realistici senza attuatori meccanici, permettendo interazioni naturali in XR, robotica e teleoperazione. Tecnologia basata sul fenomeno della referred sensation.

Link riferimento

https://www.afference.io/

Caso di studio / 04

AR Sandbox



Anno

2015

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione educativa open?source

Categoria

Applicativo

TRL

8

Tag

AR / Education / Software

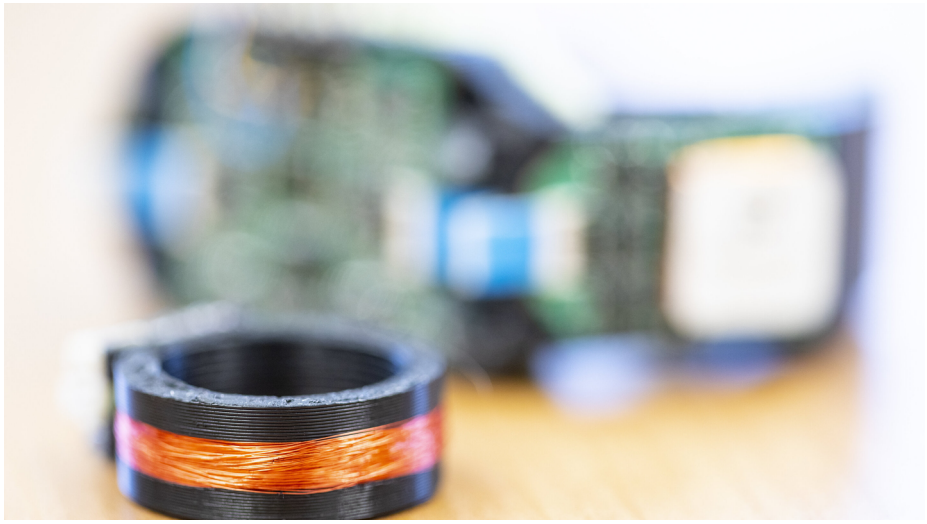
Descrizione

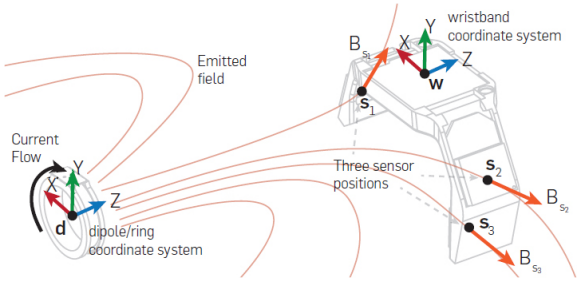
AR Sandbox combina sabbia reale, proiezioni e visione 3D per creare modelli topografici interattivi con simulazioni idrologiche in tempo reale. Usata in musei, scuole e programmi STEM, facilita comprensione di curve di livello, bacini idrografici ed erosione attraverso un'esperienza didattica pratica e immersiva.

Link riferimento

https://web.cs.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/

AuraRing





Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

Electromagnetic Finger Tracking / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

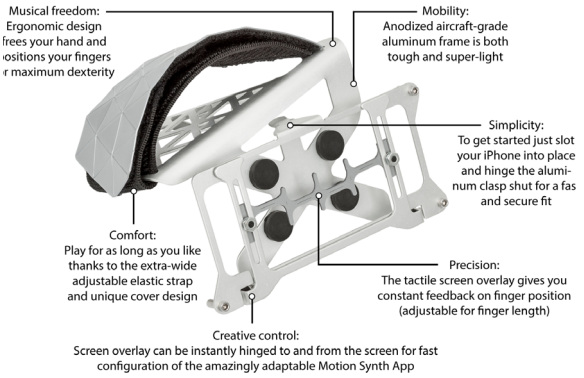
AuraRing è un sistema di tracciamento elettromagnetico miniaturizzato basato su un anello con coil trasmittente e un bracciale sensorizzato. Consente tracciamento fine dei movimenti delle dita in 5 DOF con accuratezza millimetrica, abilitando interazioni più naturali in applicazioni AR/VR e wearable computing.

Link riferimento

https://ubicomplab.cs.washington.edu/publications/auraRing/

Caso di studio / 06

AUUG Motion



Stato del progetto

Prodotto commerciale

TRL

9

Anno

2015

Nazionalità

Australia

Categoria

Applicativo

Tag

Musical Interface / Wearable / Software

Descrizione

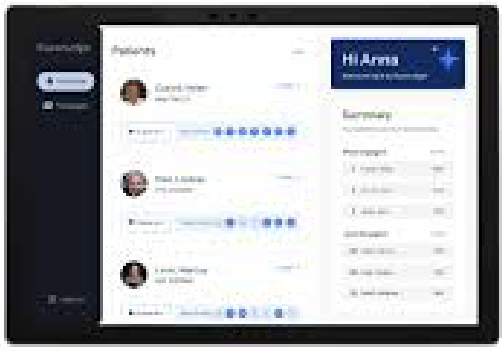
AUUG Motion Synth trasforma un iPhone in uno strumento musicale controllato dal movimento. Un grip dedicato e un'app proprietaria permettono di modulare suoni tramite gesti, combinando input tattili e motion sensing. Usato da musicisti digitali, offre una nuova forma espressiva e intuitiva di performance.

Link riferimento

https://www.auug.com/product/

Caso di studio / 07

BuzzNudge



Stato del progetto

Applicazione sperimentale

TRL

4

Anno

2022

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Applicativo

Tag

Behavioral Feedback App / Software / Applicazione

Descrizione

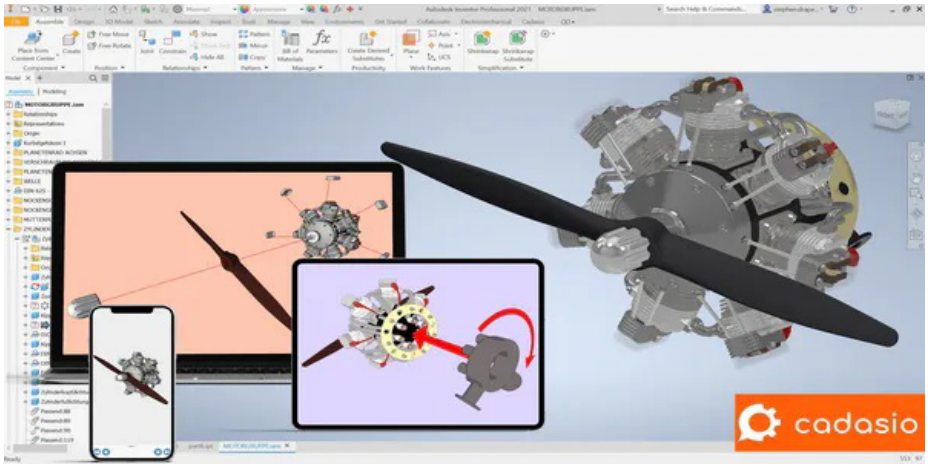
BuzzNudge è un'app basata su principi di behavioral design che fornisce micro segnali aptici o visivi per supportare cambiamenti comportamentali. Utilizzata in ambito clinico e wellness, crea nudges personalizzati per migliorare aderenza terapeutica, routine quotidiane e produttività.

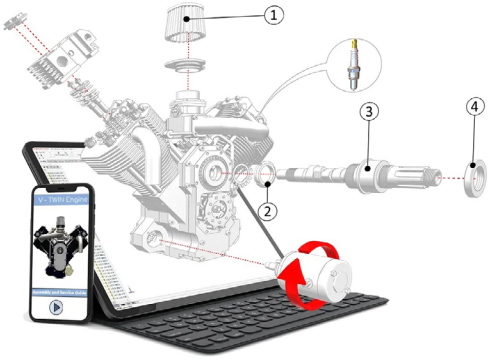
Link riferimento

https://eoye.nz/project/buzznudge-clinician's-app

Caso di studio / 08

Cadasio





Anno

2023

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Organizzativo

TRL

9

Tag

Digital Twin / Industrial machiner / Organization

Descrizione

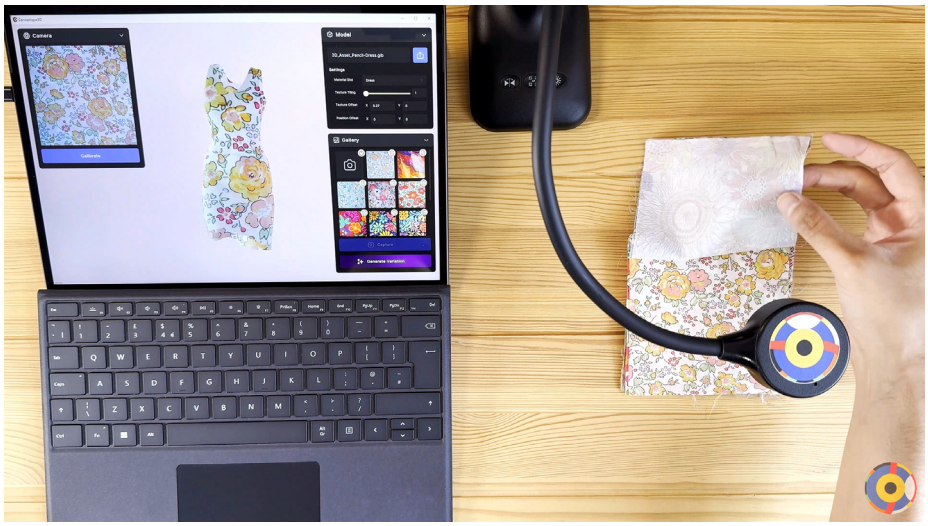
Cadasio converte dati CAD in presentazioni 3D interattive per manualistica, formazione, marketing e assistenza tecnica. La piattaforma cloud permette di creare procedure animate e contenuti condivisibili via browser, aggiornabili automaticamente con il modello CAD originale.

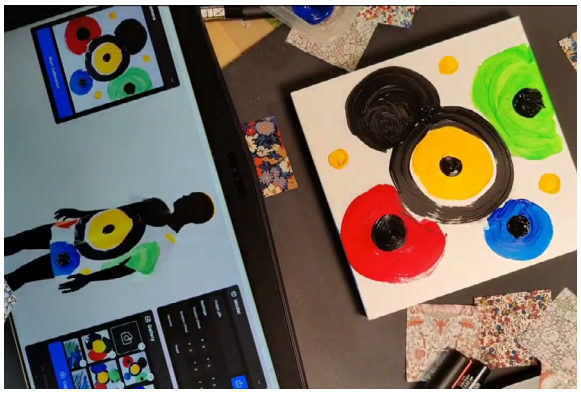
Link riferimento

https://www.cadasio.com/

Caso di studio / 09

Canvastique 3D





Anno

2022

Nazionalità

Francia

Stato del progetto

Software commerciale early?stage

Categoria

Applicativo

TRL

8

Tag

3D Modeling Software / Software / Applicazione

Descrizione

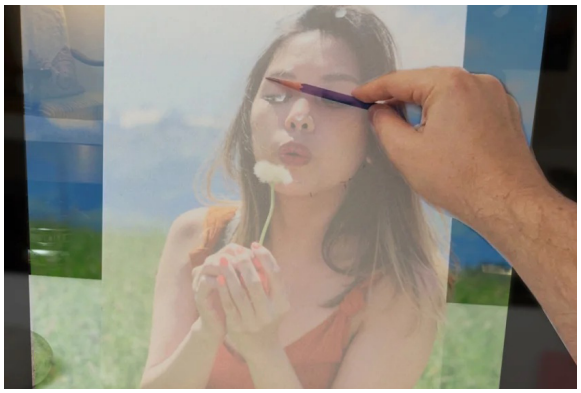
Canvastique 3D unisce input fisici e rendering 3D, consentendo di catturare schizzi reali tramite webcam e proiettarli su modelli digitali. Include texture live, import/export GLB e generazione varianti via AI. Riduce tempi di prototipazione e supporta workflow creativi ibridi.

Link riferimento

https://app.canvastique3d.com/

Caso di studio / 10

Da Vinci Eye



Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

App commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

AR Drawing App / Software / Applicazione

Descrizione

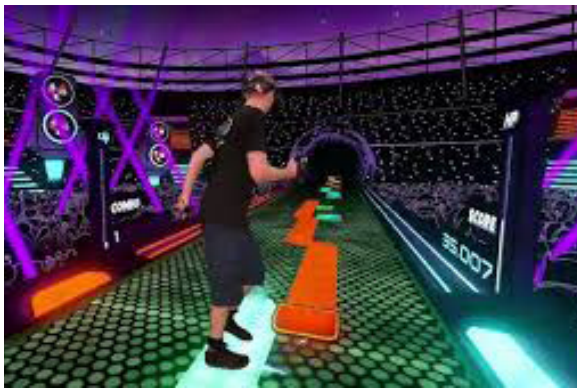
Da Vinci Eye Vision Pro utilizza AR per proiettare immagini semi?trasparenti su superfici reali, facilitando tracciamento e composizione artistica. Integrata con funzioni di analisi tonale, guide e tutorial, è utilizzata da artisti, tatuatori e maker come evoluzione del proiettore tradizionale.

Link riferimento

https://apps.apple.com/app/art-projector-da-vinci-eye/id6467633766

Caso di studio / 11

Dance Dash



Anno

2022

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prodotto commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

VR Game / Software / Applicazione

Descrizione

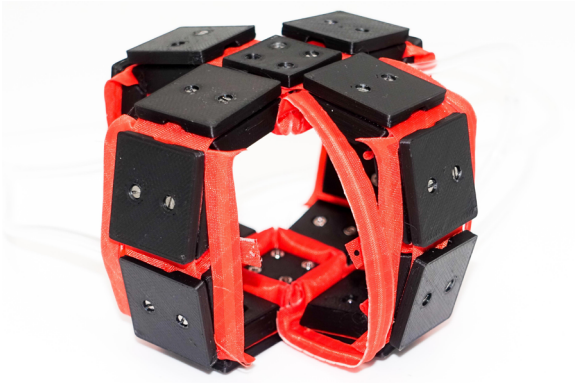
Dance Dash è un videogioco VR ritmico che combina movimento fisico, musica EDM e interazione immersiva. Il giocatore usa il proprio corpo per evitare ostacoli, seguire pattern ritmici e colpire elementi sincronizzati con la musica. Con un forte orientamento all'attività fisica, offre un'esperienza di fitness ludico all'interno di ambienti vibranti e dinamici. Pensato per intrattenimento e allenamento leggero in realtà virtuale.

Link riferimento

https://www.rebuffreality.com/pages/dance-dash

Caso di studio / 12

Digits



Anno

2025

Nazionalità

Svizzera

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

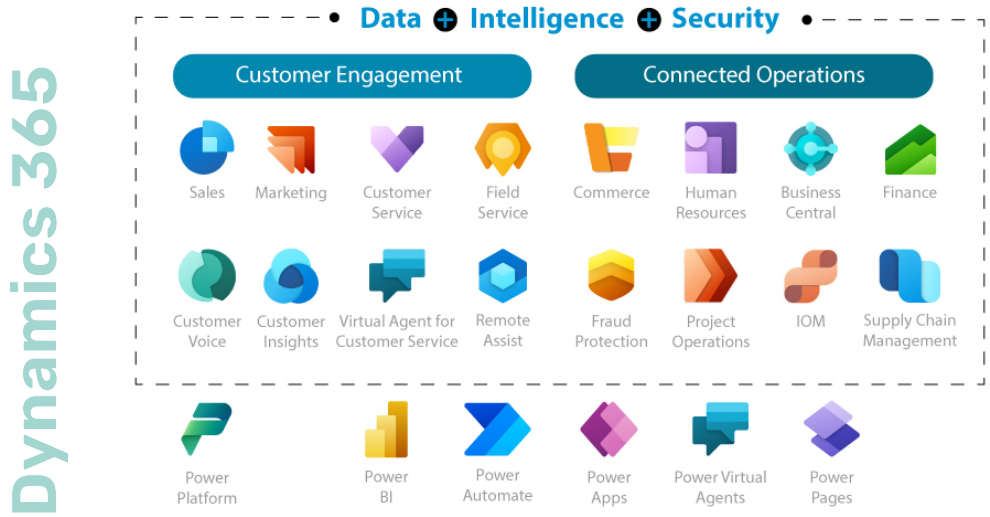
Haptics / Hardware / VR

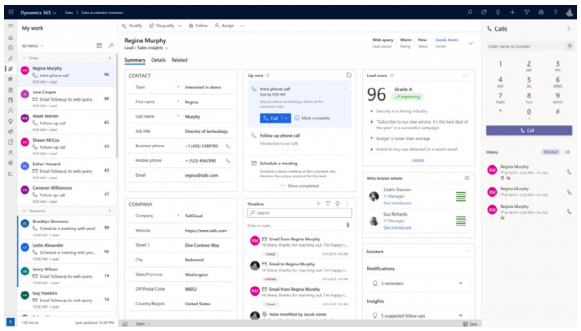
Descrizione

Digits è un sistema modulare di robotica soffice che utilizza attuatori pneumatici per generare forme variabili, vibrazioni e feedback tattile. Progettato per diventare un'interfaccia riconfigurabile, può assumere la forma di guanti aptici, dispositivi palmari o superfici interattive. Integrato con algoritmi ML e software open?source, supporta co?design emozionale, riabilitazione, manipolazione virtuale e interazione XR personalizzabile.

Link riferimento

https://doi.org/10.1002/aisy.202500142





Microsoft Dynamics 365

Anno

2016

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Organizzativo

TRL

9

Tag

Enterprise Software / Cloud / PLM

Descrizione

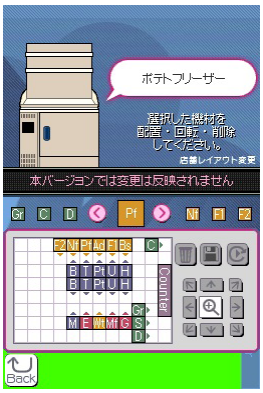
Dynamics 365 è una suite integrata di applicazioni per CRM, ERP, supply chain, analisi e automazione dei processi aziendali. Unifica dati e workflow per vendite, marketing, operations e customer service, con forti integrazioni cloud, AI e strumenti low-code. È utilizzato in ambito enterprise per supportare scalabilità, governance del dato e processi critici distribuiti.

Link riferimento

https://dynamics.microsoft.com

Caso di studio / 14

eCrew



Stato del progetto

Soluzione interna

TRL

9

Anno

2010

Nazionalità

Giappone

Categoria

Simulativo

Tag

Food & beverage / Gamification / Simulation

Descrizione

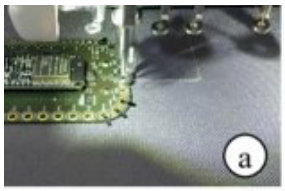
L'eCrew Development Program è un serious game sviluppato per Nintendo DS per formare il personale McDonald's. Simula la preparazione dei cibi, la gestione delle interazioni con i clienti, procedure standard e valutazioni delle performance. Il sistema consente una formazione omogenea su larga scala, sfruttando dinamiche videoludiche per aumentare coinvolgimento e memorizzazione.

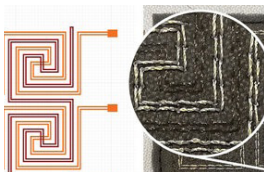
Link riferimento

https://www.youtube.com/watch?v=uvOFm0GL9-s

Caso di studio / 15

Resistive Pressure Sensor





Anno

2020

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

4

Tag

Smart Textile / Sensor Interface / Hardware

Descrizione

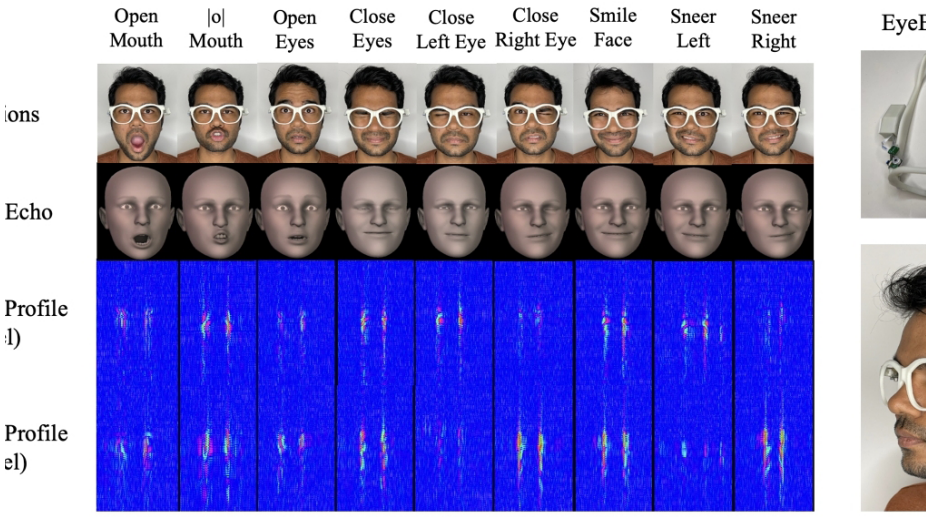
Questa tecnologia esplora la realizzazione di sensori di pressione tramite ricamo conduttivo integrato in tessuti flessibili. La struttura ricamata permette variazioni di resistenza misurabili in funzione della deformazione, aprendo la strada a interfacce morbide, abbigliamento intelligente e superfici tattili indossabili. Mira a combinare comfort, sensibilità e affidabilità in applicazioni HCI, sport, assistive tech e monitoraggio posturale.

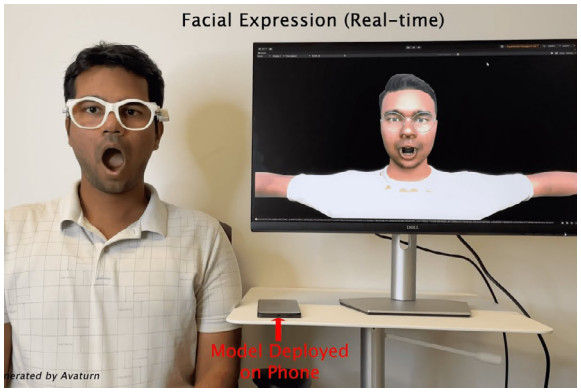
Link riferimento

https://doi.org/10.1145/3313831.3376305

Caso di studio / 16

EyeEcho





Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

AR Glasses / Communication / Hardware

Descrizione

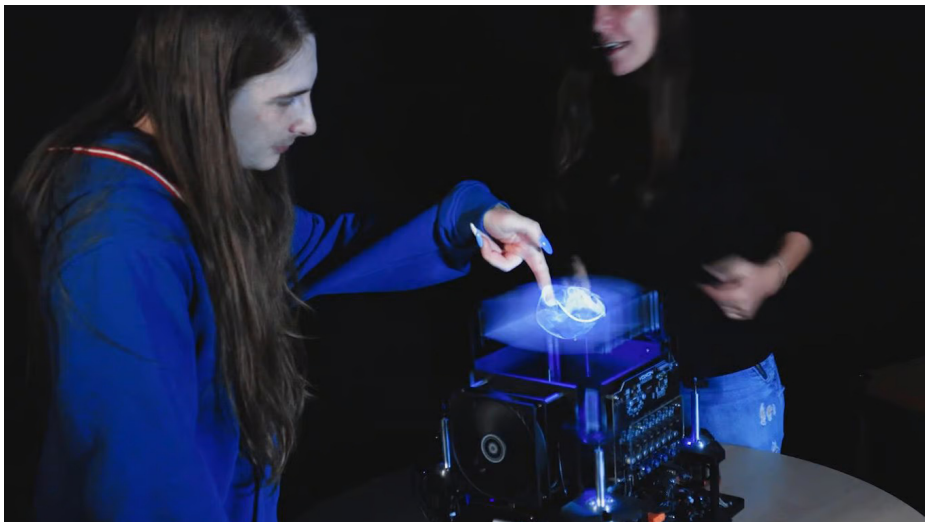
EyeEcho è un dispositivo wearable basato su occhiali AR progettato per facilitare comunicazione e interazioni visive attraverso overlay digitali contestuali. Integra sensori per riconoscimento gestuale, feedback visivi e assistenza alla comunicazione interpersonale. Pensato per inclusione, supporto educativo e applicazioni sociali, sfrutta computer vision e display spaziali leggeri.

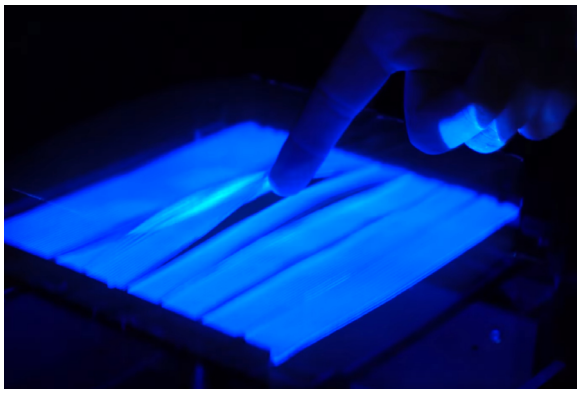
Link riferimento

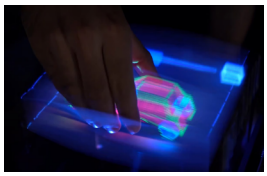
https://doi.org/10.1145/3613904.3642613

Caso di studio / 17

FlexiVol







Stato del progetto

Prototipo di ricerca

TRL

5

Anno

2023

Nazionalità

Giappone

Categoria

Tecnologico

Tag

Holographic Interface / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

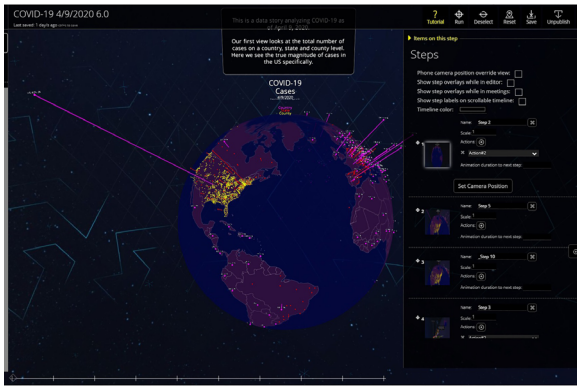
FlexiVol è un'interfaccia olografica con feedback volumetrico che permette agli utenti di percepire la forma di proiezioni 3D come se fossero fisiche. Sfrutta attuatori olografici e controllo dinamico dell'intensità per generare sensazioni tattili nello spazio libero. È pensata per scenari XR, modellazione 3D intuitiva, telepresenza e addestramento immersivo.

Link riferimento

https://doi.org/10.1145/3706598.3714315

Caso di studio / 18

Flow Immersive



Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

Data Visualization / AR / Software

Descrizione

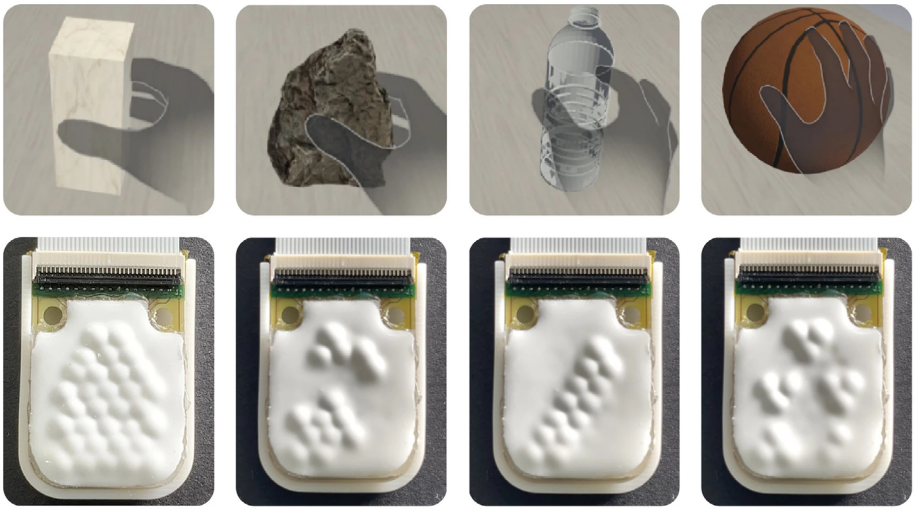
Flow Immersive permette di trasformare set di dati complessi in visualizzazioni AR/VR 3D altamente interattive. Utilizzata da aziende e istituzioni per presentazioni, formazione e divulgazione, consente storytelling immersivo in cui dati, timeline e grafici emergono nello spazio circostante. Supporta collaborazione remota e integrazione con piattaforme enterprise.

Link riferimento

https://flowimmersive.com

Caso di studio / 19

Fluid Reality



Anno

2023

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

Haptic Gloves / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

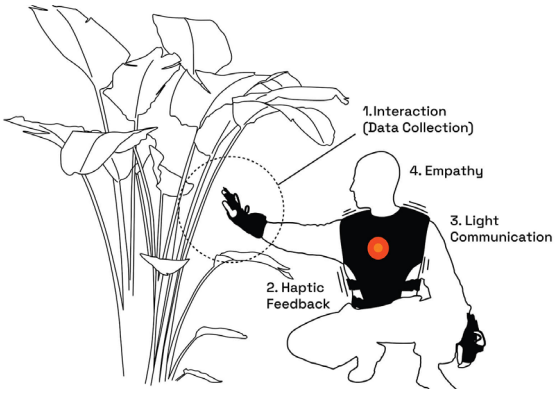
Fluid Reality è un guanto aptico leggero che utilizza attuatori fluidici per simulare pressioni e sensazioni tattili realistiche in ambienti VR/AR. Il sistema offre elevata portabilità, risposta rapida e costi ridotti rispetto agli attuatori meccanici tradizionali. Ideale per interazioni XR naturali, training immersivo e applicazioni ludiche, ampliando l'accesso a haptics avanzati.

Link riferimento

https://www.fluidreality.com

Caso di studio / 20

Gaia



Anno

2022

Nazionalità

Finlandia

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

Swarm Communication / Robotics / Hardware

Descrizione

Gaia è un sistema di comunicazione distribuito per robotica “swarm-based”, progettato per coordinare gruppi di robot in ambienti dinamici. Implementa protocolli adattivi per condivisione dati, localizzazione e comportamenti collettivi emergenti. Il sistema è orientato a esplorazione, monitoraggio ambientale, agricoltura autonoma e operazioni multi agente resilienti.

Link riferimento

https://inxects.com/Gaia-Communication-System

Game night

Anno

2025

Nazionalità

New Zealand

Stato del progetto

Soluzione commerciale (Early Access)

Categoria

Applicativo

TRL

8

Tag

Game design / Application / MR

Descrizione

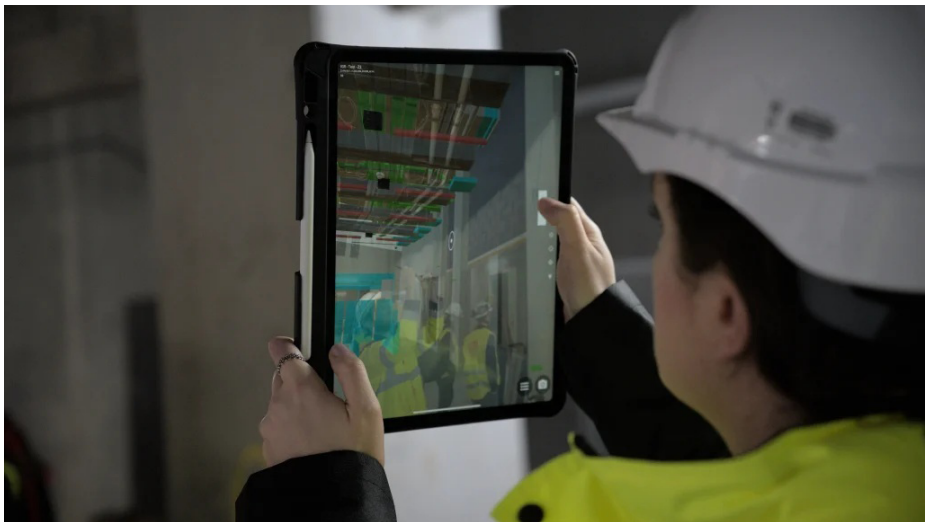
Game Night è un party game in Mixed Reality progettato per trasformare qualsiasi stanza in uno spazio interattivo. Utilizza hand?tracking e passthrough per offrire mini giochi fisici e cooperativi che si adattano automaticamente alla disposizione reale dell'ambiente. Pensato per sessioni brevi e per giocatori di ogni età, supporta multiplayer locale sincronizzato tra più visori, rendendo l'esperienza altamente sociale. L'obiettivo è favorire interazione reale e digitale, con livelli che sfruttano movimento, riflessi e strategia.

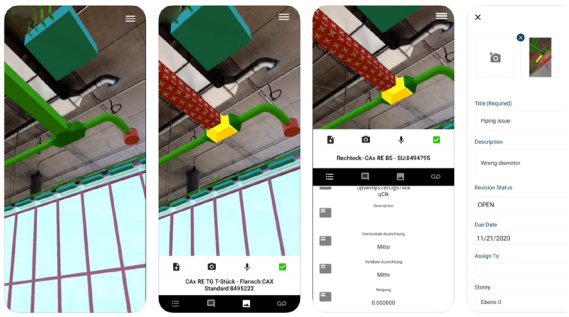
Link riferimento

https://sidequestvr.com/app/39646/game-night

Caso di studio / 22

Gamma AR





GAMMA AR

Anno

2020

Nazionalità

Germania

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

AR Construction Management / Software / Applicazione

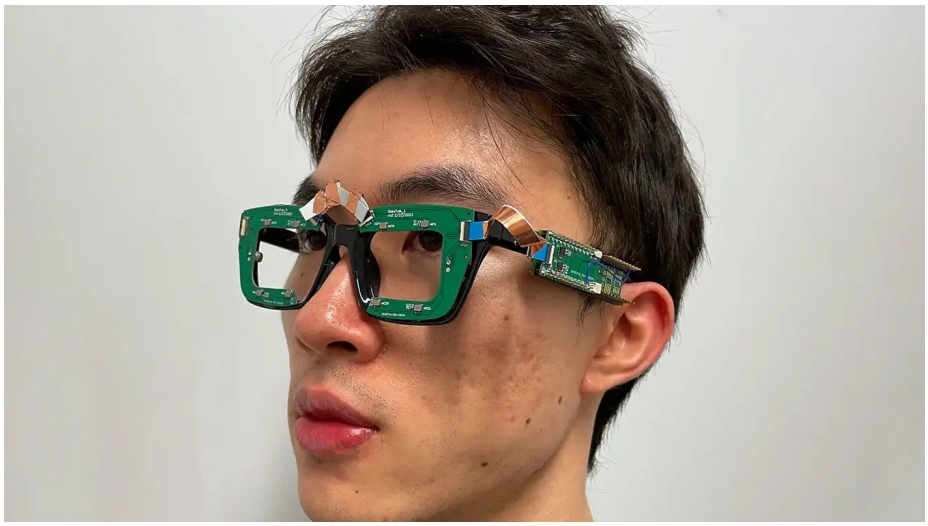
Descrizione

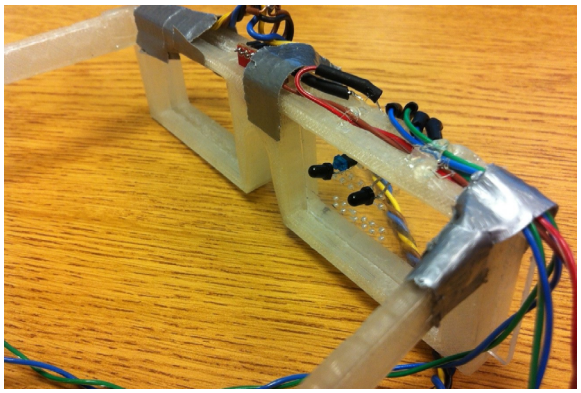
Gamma AR è un'applicazione professionale per il settore edilizio che sovrappone modelli BIM 3D agli ambienti reali tramite AR su tablet e smartphone. Consente il controllo qualità, l'identificazione di collisioni, la verifica delle installazioni e il tracciamento dello stato di avanzamento dei lavori. Integra sistemi come Autodesk, Procore e BIMCollab e supporta import di IFC, Revit, Navisworks e point?cloud. L'obiettivo è ridurre errori, costi e tempi fornendo una visualizzazione intuitiva e collaborativa del progetto direttamente in cantiere.

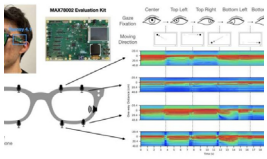
Link riferimento

https://gamma-ar.com

GazeTrak







Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

AR Glasses / Eye Tracking / Hardware

Descrizione

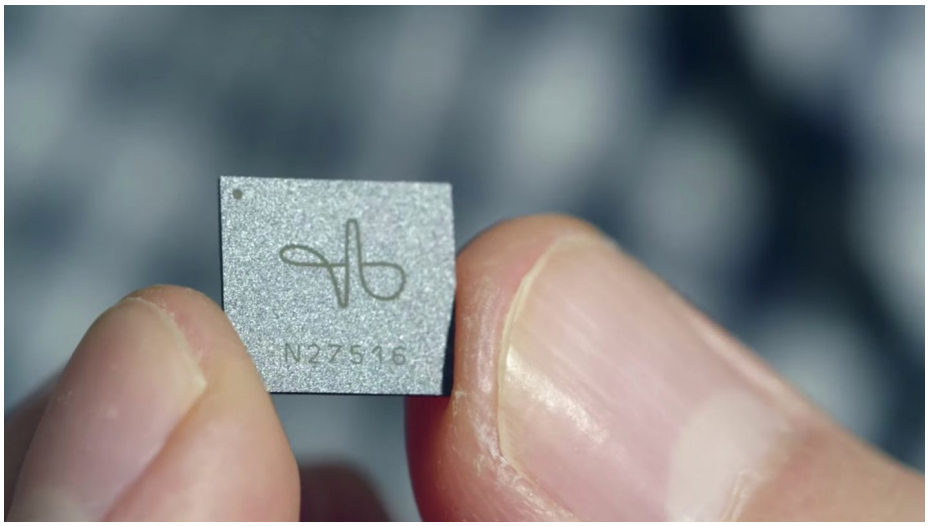
GazeTrak è il primo sistema di eye tracking basato su acustica, integrabile in montature per smart glasses. Usa un altoparlante e quattro microfoni per rilevare micro variazioni nella forma dell'occhio tramite segnali ultrasonici. I dati vengono elaborati da una pipeline di deep learning che ricostruisce la direzione dello sguardo con bassa potenza e latenza ridotta. La tecnologia è pensata per dispositivi XR leggeri e privi di telecamere, con vantaggi in termini di privacy, consumo energetico e portabilità.

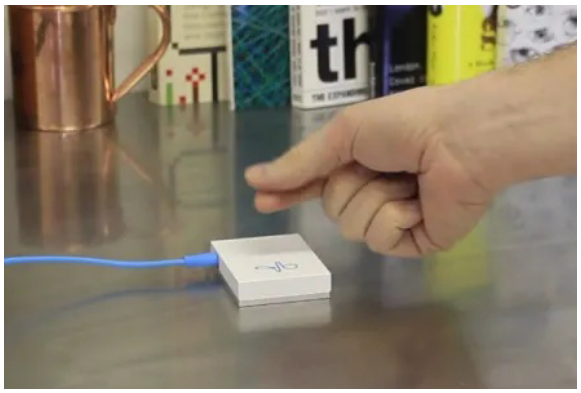
Link riferimento

https://doi.org/10.1145/3636534.3649376

Caso di studio / 24

Google Soli





Anno

2015

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

7

Tag

Sensor / Gesture Interface / Hardware

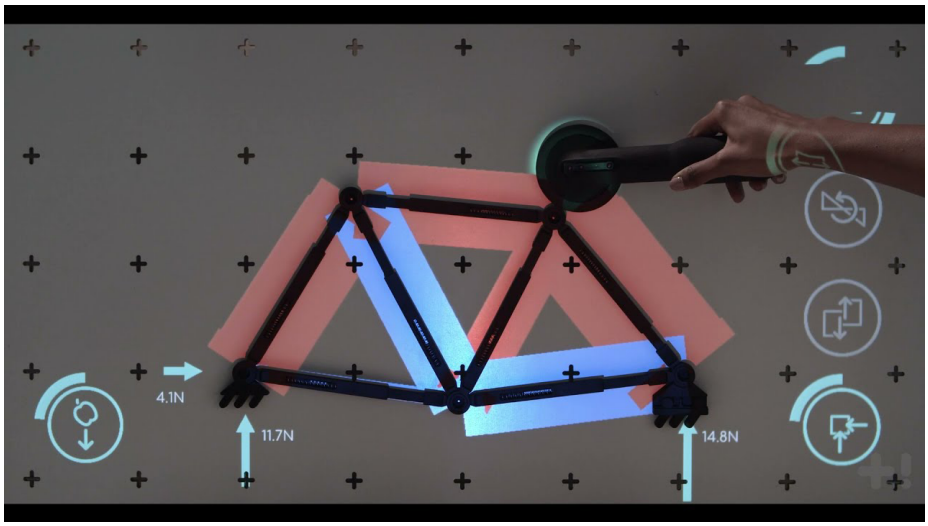
Descrizione

Project Soli è un sensore radar in miniatura capace di rilevare gesti senza contatto con precisione sub?millimetrica. Basato su chip?scale radar a 60 GHz, permette l'interpretazione di movimenti delle dita e della mano anche in condizioni di scarsa illuminazione. La tecnologia è stata implementata in prodotti come Google Pixel 4 (Motion Sense) e Nest Hub. Soli apre a interazioni naturali, touchless e sempre attive, con applicazioni in dispositivi mobili, IoT e XR.

Link riferimento

https://research.google/blog/soli-radar-based-perception-and-interaction-in-pixel-4/

Grasp IT



Stato del progetto

Software di ricerca

TRL

6

Anno

2021

Nazionalità

Regno Unito

Categoria

Applicativo

Tag

AR / Data Visualization / Education

Descrizione

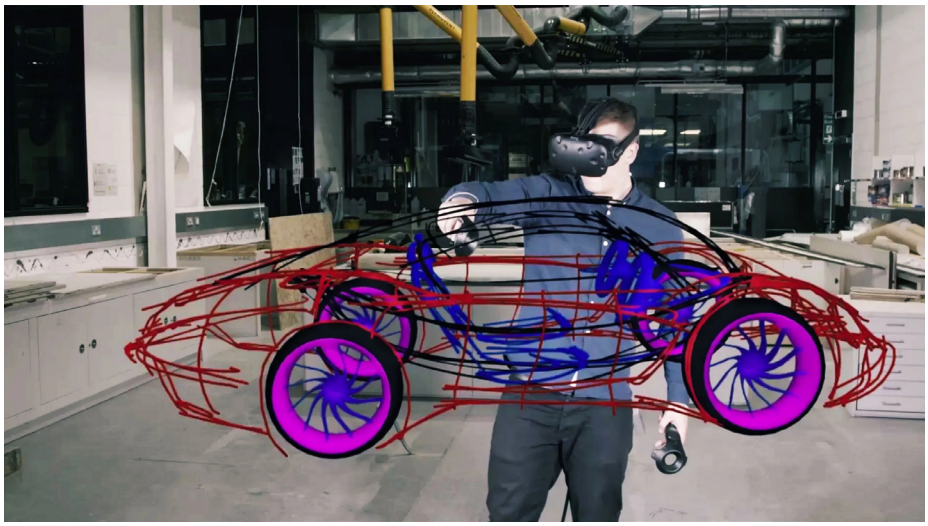
GraspIt! è un simulatore avanzato per la ricerca sulla manipolazione robotica. Permette di testare mani robotiche, modelli cinematici e strategie di presa in ambienti virtuali grazie a un motore dedicato alla rilevazione delle collisioni e alla valutazione della qualità delle prese tramite metriche specifiche. Supporta diverse librerie di mani robotiche, modelli personalizzati e dinamiche complesse. È utilizzato in robotica, HRI e prototipazione di sistemi di presa per testare configurazioni prima della produzione.

Link riferimento

https://www.grasp.it/#1

Caso di studio / 26

Gravity sketch



Anno

2017

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

3D modeling / 3D Rendering / VR

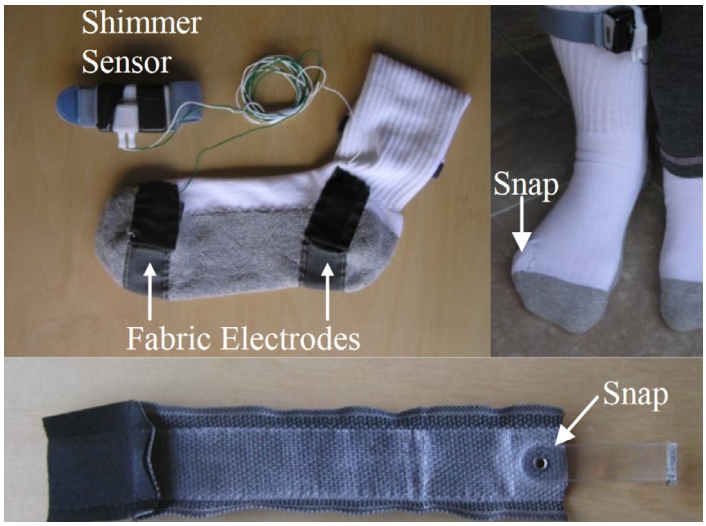
Descrizione

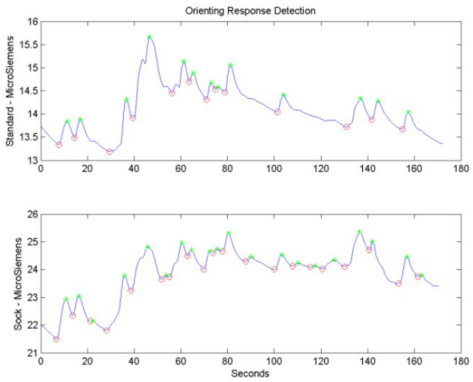
Gravity Sketch è un ambiente immersivo per la progettazione 3D che consente a designer e team di creare, modellare e collaborare direttamente nello spazio virtuale. Supporta VR, desktop e tablet, facilitando la visualizzazione a scala 1:1, la rapida generazione di concept e il confronto immediato con vincoli ingegneristici. Offre strumenti per sketch volumetrici, modellazione SubD, NURBS e mesh. Ampiamente adottato nel product design, automotive e footwear per velocizzare iterazioni e validazioni.

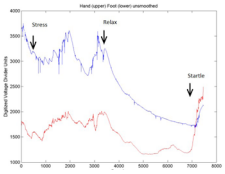
Link riferimento

https://gravitysketch.com/

GSR Sock







Anno

2022

Nazionalità

Italia

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

4

Tag

e-Textile Sensor / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

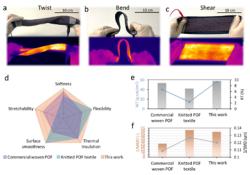
GSR Sock è un prototipo di e?textile dedicato alla misurazione della risposta galvanica cutanea attraverso il piede. Integra elettrodi in tessuto conduttivo cuciti all'interno di una calza standard, offrendo una soluzione non invasiva per monitoraggio continuo dello stress fisiologico. Studi sperimentali mostrano che la misura è comparabile ai sensori tradizionali, rendendola adatta a ricerche sul benessere, wearable unobtrusive e monitoraggio emotivo durante attività quotidiane.

Link riferimento

https://doi.org/10.1109/ISWC.2011.36

Caso di studio / 28

Thermochromic Heating e-Textile



Anno

2021

Nazionalità

Cina

Stato del progetto

Prototipo avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

Smart Textile / Healthcare / Hardware

Descrizione

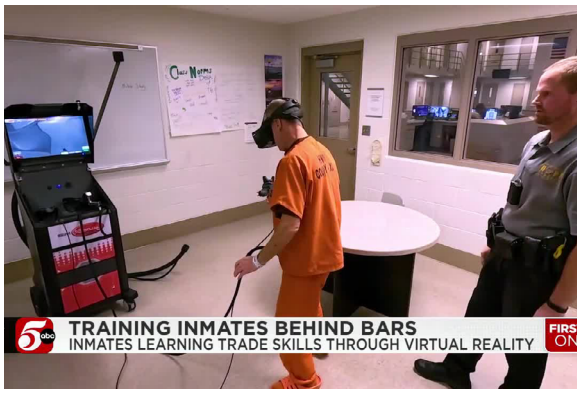
L'e?textile integra filati conduttivi, termocromici e fibre ottiche con un sistema AI che regola automaticamente il calore per garantire comfort e sicurezza. Il tessuto cambia colore in base alla temperatura, fornendo un feedback immediato e visibile. L'AI è addestrata su dati fisiologici reali per adattare la temperatura ideale tra 40–50 °C e prevenire surriscaldamenti, particolarmente utile in contesti sanitari e per persone sensibili alle variazioni termiche.

Link riferimento

https://doi.org/10.1021/acsami.4c19174

Caso di studio / 29

JYACAP



Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione istituzionale

Categoria

Simulativo

TRL

9

Tag

Educational / Knowledge / VR

Descrizione

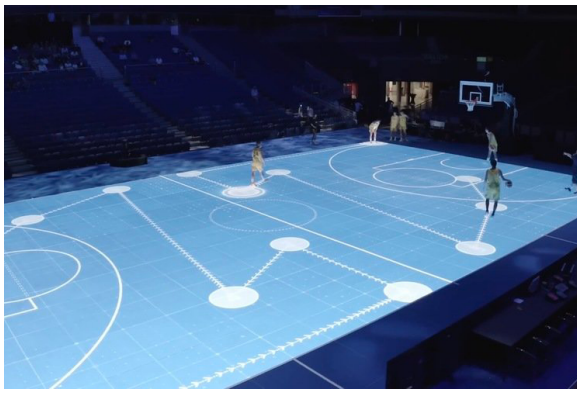
JYACAP è un programma triennale dedicato a persone incarcerate per reati commessi da giovani, con l'obiettivo di favorire il reinserimento attraverso formazione, sviluppo di competenze quotidiane e simulazioni assistite (incluso l'uso della VR). Fornisce un percorso strutturato composto da training comportamentale, educazione, abilità digitali e preparazione alla vita civile. Il programma può condurre a un'eventuale libertà anticipata previo giudizio del governatore.

Link riferimento

https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0141021

Caso di studio / 30

Sports Led Video Floor



Anno

2023

Nazionalità

Germania

Stato del progetto

Soluzione commerciale installata

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Interactive Sports Surface / Hardware / Dispositivo Indossabile

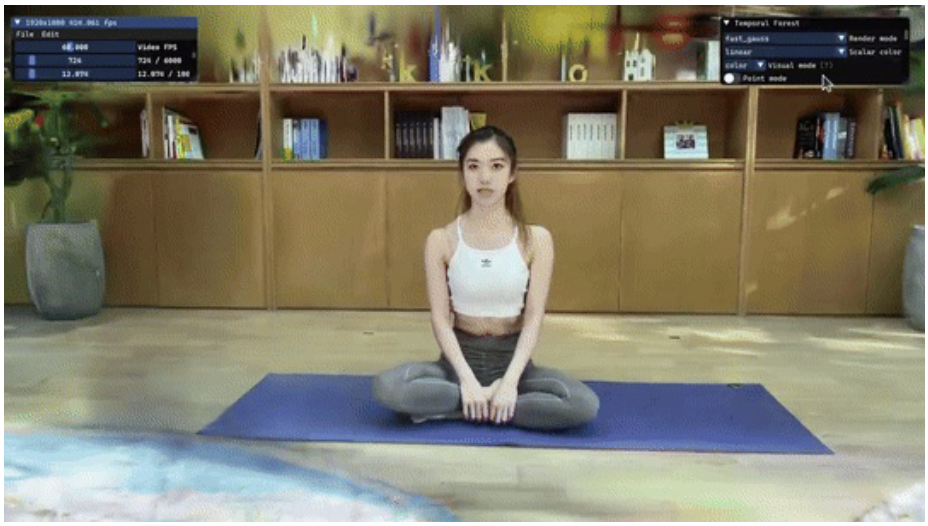
Descrizione

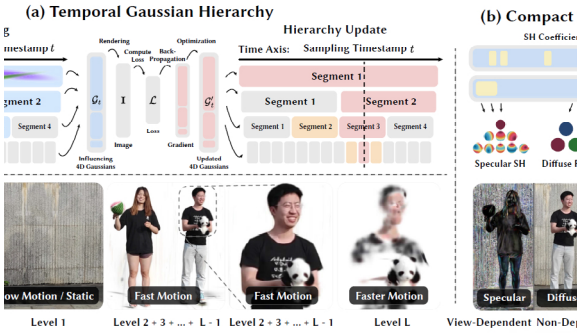
Il LED Video Sports Floor è un innovativo campo da gioco in vetro dotato di milioni di LED integrati che consentono animazioni, grafiche dinamiche, dati di gioco in tempo reale e visualizzazioni AI?driven direttamente sulla superficie. Installato stabilmente al BMW Park di Monaco, è il primo campo al mondo ad offrire un pavimento video full?LED permanente. La superficie elastica garantisce sicurezza e grip, supportando basket, volley ed eventi multimodali.

Link riferimento

https://asbglassfloor.com/official-partner-of-fc-bayern-basketball-full-led-video-sports-floor-for-the-german-champion/

Long Volumetric Video with Temporal Gaussian Hierarchy





Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca avanzata

Categoria

Tecnologico

TRL

4–5

Tag

AI / 3D Video Compression / Hardware

Descrizione

Temporal Gaussian Hierarchy è una metodologia innovativa per rappresentare video volumetrici lunghi con un modello 4D compatto, superando i limiti delle tecniche precedenti che gestivano solo clip di pochi secondi. La tecnica costruisce una gerarchia di primitive gaussiane che descrivono segmenti temporali con diversi livelli di variazione, riducendo drasticamente il numero di elementi da memorizzare e mantenendo il consumo di memoria quasi costante. Il risultato è una ricostruzione volumetrica stabile, scalabile a minuti di video, con rendering in tempo reale e qualità dello stato dell'arte.

Link riferimento

https://doi.org/10.1145/3687919

Caso di studio / 32

Magic Leap

Anno

2010

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale + prototipi avanzati

Categoria

Applicativo

TRL

8–9

Tag

MR / Hardware / Virtual Assistant

Descrizione

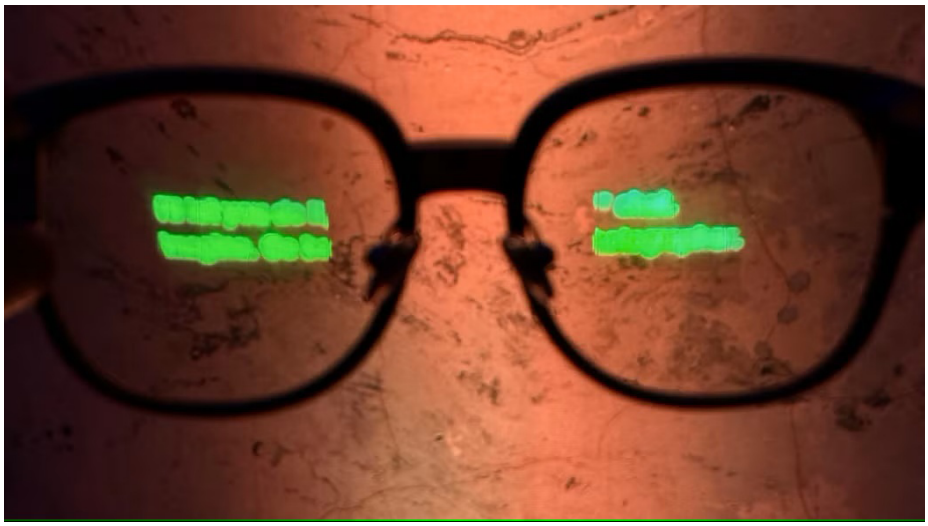
Magic Leap sta consolidando il proprio ruolo nel panorama della realtà aumentata con Magic Leap 2 e con nuovi prototipi XR annunciati nel 2025 insieme a Google, che puntano a un ecosistema hardware-software unificato. La piattaforma offre ottiche a guida d'onda, mappatura spaziale avanzata, localizzazione ambientale e un SDK maturo orientato ad applicazioni enterprise. I nuovi prototipi mostrati nel 2025 segnano un'accelerazione verso occhiali AR più compatti, con allineamento di Android XR e pipeline ottimizzate per uso professionale.

Link riferimento

https://www.magicleap.com/

Caso di studio / 33

MYVU AR



Stato del progetto

Prodotto commerciale

TRL

9

Anno

2024

Nazionalità

Cina

Categoria

Applicativo

Tag

Smart Glasses / AI / Software

Descrizione

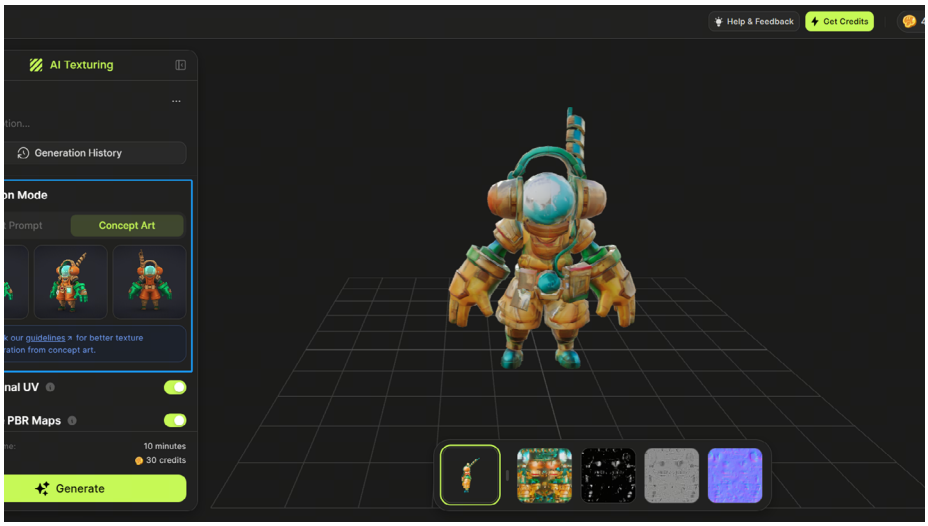
MYVU è la linea di occhiali AR ultraleggeri di Meizu, pensata per uso quotidiano. Con un peso di soli 43 g, integra un micro?proiettore MicroLED ad alta luminosità (circa 1100 nits), audio spaziale, navigazione in tempo reale, traduzione multilingua, teleprompter e controlli vocali. Il design ergonomico e la compatibilità con smartphone Android e iOS permettono funzioni avanzate come messaggistica, mappe, musica e overlay informativi. MYVU si distingue per portabilità, efficienza energetica e interazioni multimodali tramite touch, voce e smartring.

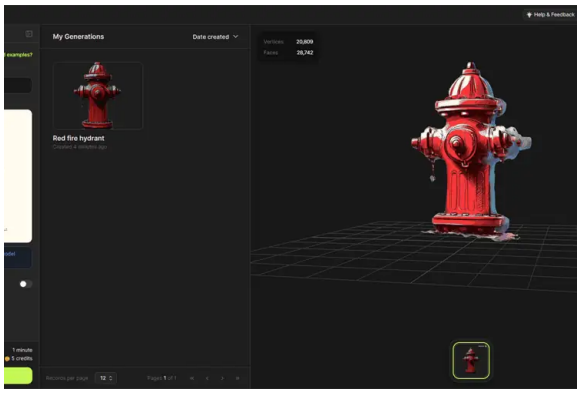
Link riferimento

https://www.meizuworld.com/meizu-myvu-ar-smart-glasses.html

Caso di studio / 34

Meshy





Meshy
REVIEW

Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Servizio commerciale (platform SaaS)

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

3D Content Generation / AI / Software

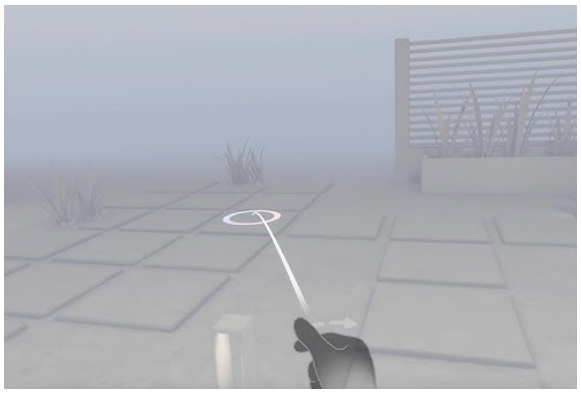
Descrizione

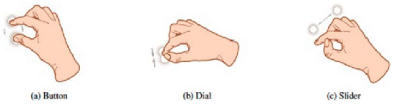
Meshy è una piattaforma AI per la generazione rapida di modelli 3D, capace di convertire testo, immagini o mesh esistenti in asset tridimensionali ottimizzati. L'obiettivo è accelerare concept design, produzione di asset per videogiochi, VFX, XR e stampa 3D riducendo tempi e costi. Offre strumenti per text-to-3D, image-to-3D e AI texturing con esportazione in formati standard. Meshy è oggi uno dei sistemi più diffusi con milioni di modelli generati e una crescente adozione industriale nei flussi creativi.

Link riferimento

https://www.meshy.ai/

Meta Microgestures





Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Feature software avanzata (SDK)

Categoria

Tecnologico

TRL

8

Tag

Interaction System / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

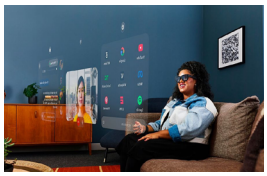
Microgestures è una tecnologia di hand?tracking di nuova generazione di Meta, integrata nell'Interaction SDK. Consente il riconoscimento di movimenti minimi del pollice lungo il fianco dell'indice, interpretati come comandi direzionali stile D-Pad. Progettata per un'interazione a basso sforzo e ad alta precisione, amplia le possibilità della manipolazione senza controller nei visori Quest 2, Pro e 3. Le demo includono navigazione UI, locomotion e interazione con elementi 3D, aprendo a interfacce hands?free più fluide ed ergonomiche.

Link riferimento

https://doi.org/10.1109/FG.2018.00127

Caso di studio / 36

Meta Orion



Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prodotto commerciale

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

AR Visualization / Space Tech / Hardware

Descrizione

Orion è il più avanzato prototipo di occhiali AR sviluppato da Meta, presentato pubblicamente nel 2024. Combina l'aspetto di semplici occhiali con un sistema ottico olografico ad alta luminosità e un ampio campo visivo (~70°). Include tracciamento oculare completo, sensori ambientali, handtracking avanzato e un innovativo bracciale neurale per input a bassa latenza. Il compute puck esterno gestisce l'elaborazione, mantenendo il dispositivo leggero e indossabile. Orion anticipa la futura linea di occhiali AR consumer di Meta.

Link riferimento

https://about.fb.com/news/2024/09/introducing-orion-our-first-true-augmented-reality-glasses/

NBA Tabletop

Stato del progetto

Feature commerciale in rollout

TRL

8–9

Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Applicativo

Tag

AR Sports Experience / Software / Applicazione

Descrizione

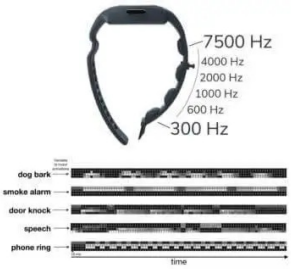
NBA Tabletop introduce una visualizzazione 3D in scala “diorama” delle partite NBA in tempo reale tramite Apple Vision Pro. La funzione affianca allo streaming 2D una ricostruzione 3D generata da motion capture di campo, con avatar dei giocatori che riproducono azioni, schemi e traiettorie con circa mezzo secondo di latenza. Disponibile per alcune partite al giorno e destinata ad ampliarsi a tutto il League Pass, offre un nuovo modo immersivo di seguire tattiche e dinamiche di gioco.

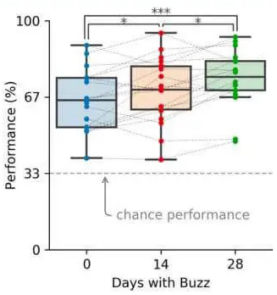
Link riferimento

https://www.uploadvr.com/nba-apple-vision-pro-app-tabletop-view/

Caso di studio / 38

Neosensory





neosensory

Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Neural Wearable / Sensory Substitution / Hardware

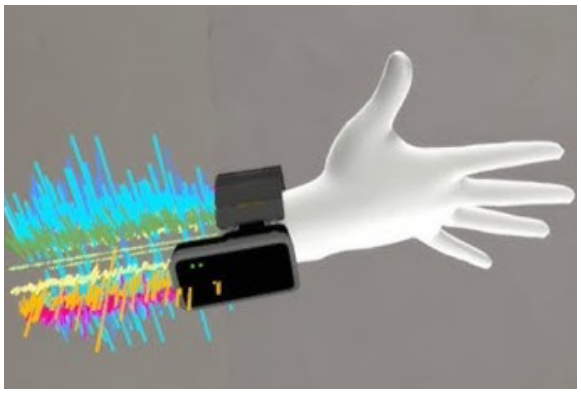
Descrizione

Neosensory sviluppa dispositivi aptici indossabili che sfruttano la pelle come canale informativo alternativo. I braccialetti dell'azienda traducono input complessi, come suoni o segnali ambientali, in pattern vibratori che il cervello può apprendere e interpretare. Impiegati per accessibilità, apprendimento, riabilitazione e nuove forme di percezione sensoriale, i dispositivi sono basati su anni di ricerca neuroscientifica sulla plasticità cerebrale e la sostituzione sensoriale.

Link riferimento

https://neosensory.com/

Neural finger tracking



Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

6

Tag

Hardware / Neural Interface / MR

Descrizione

CTRL?Labs ha sviluppato algoritmi per determinare i movimenti e le forze della mano e per il controllo in tempo reale a partire da segnali neuromuscolari. Questa tecnologia permette agli utenti di creare i propri schemi di controllo durante l'esecuzione, mappando dinamicamente l'attività neuromuscolare su segnali di input per macchine sia continui (a valore reale) sia discreti (categorici o a valori interi).

Link riferimento

https://doi.org/10.1101/2024.02.23.581779

Caso di studio / 40

Nvidia Neural

Stato del progetto

Prototipo avanzato + toolkit industriale

TRL

6–8

Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Tecnologico

Tag

AI Rendering / Simulation / Hardware

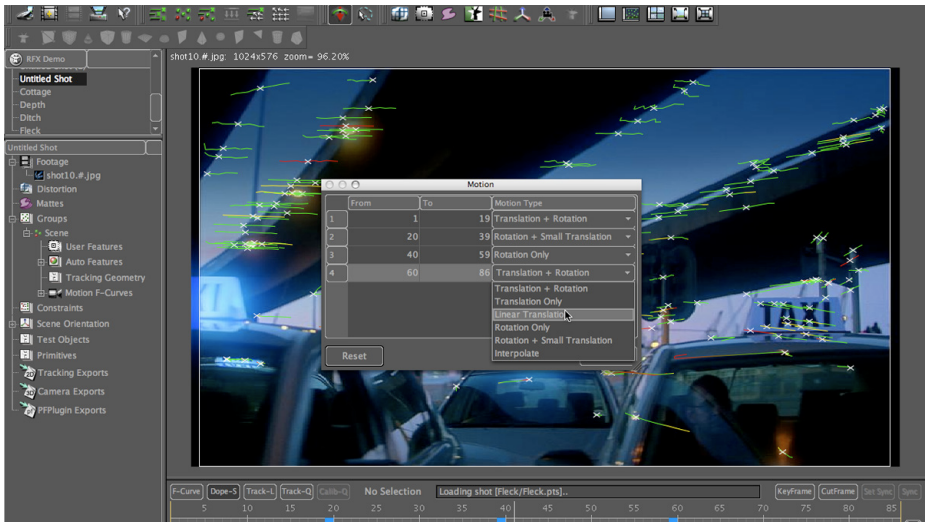
Descrizione

DiffusionRenderer è una tecnologia NVIDIA per il neural rendering che unifica de?lighting e relighting in un unico motore neurale capace di stimare geometrie, materiali e normali da semplici video 2D. Permette di modificare illuminazione, inserire oggetti, generare riflessioni realistiche e creare dataset sintetici per robotica e autonomous driving. Si integra nel più ampio ecosistema RTX Neural Rendering, che usa reti neurali nei shader per materiali, volumi e compressione texture.

Link riferimento

https://doi.org/10.1101/2024.02.23.581779

PFTrack



PFTrack

Anno

2003

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

VFX / Camera Tracking Software / Software

Descrizione

PFTrack è uno dei software leader per match?moving, camera solving e ricostruzione 3D utilizzato in VFX, film, TV e VR. Consente tracciamento accurato della camera, object tracking, planar tracking, rotoscoping 3D, photogrammetry e integrazione con pipeline Unreal/Unity. Offre strumenti avanzati per analisi delle lenti, nodi procedurali, esportazione multi?formato e supporto professionale. È adottato globalmente nell'industria cinematografica per compositing e integrazione CG realistica.

Link riferimento

https://www.pftrack.com

Caso di studio / 42

RayBan Meta

Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

Smart Glasses / Software / Applicazione

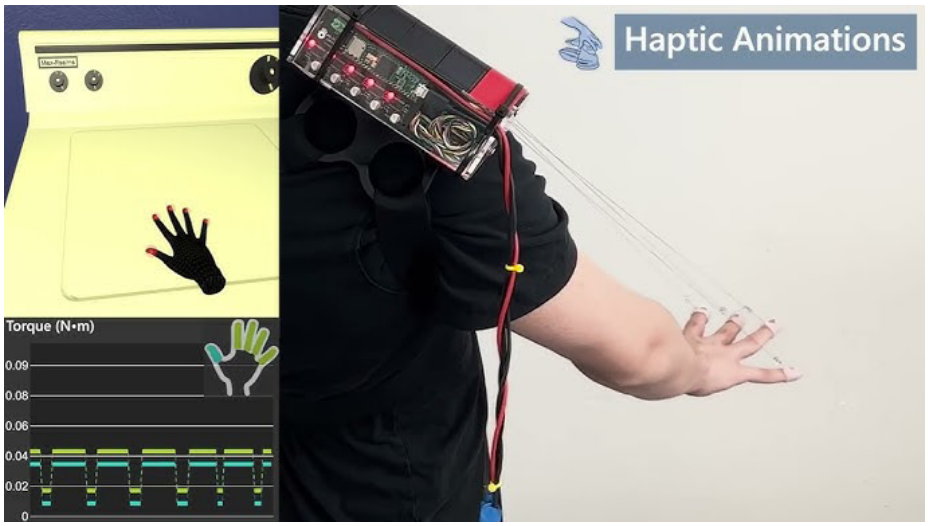
Descrizione

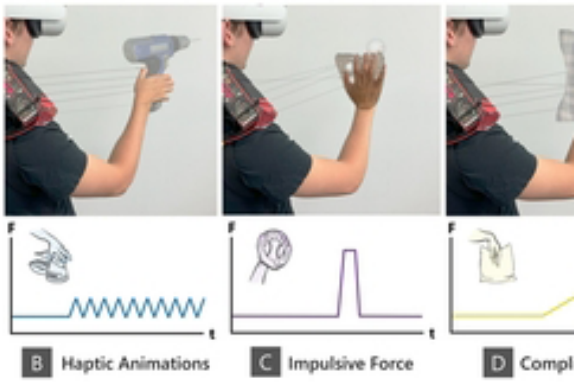
La famiglia RayBan Meta 2025 comprende due prodotti: RayBan Meta Gen 2, smart glasses con camera 3K, audio open?ear migliorato, microfoni beamforming e integrazione profonda di Meta AI, e RayBan Meta Display, prima versione con display integrato nell'occhiale. Quest'ultima introduce un micro?schermo 600×600px nel lato destro della lente per mostrare notifiche, preview camera, direzioni AR, traduzioni live e altri contenuti rapidi. Entrambi i modelli supportano il Neural Band EMG che riconosce gesti minimi della mano come input.

Link riferimento

https://www.meta.com/it/ai-glasses/ray-ban-meta/?srsltid=AfmBOooEpWdGlhn_MhP-1las9iYBFnwEhQ5KLmN4jlcW21dSL

Reel Feel





Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

Haptic Device / Hardware / Dispositivo Indossabile

Descrizione

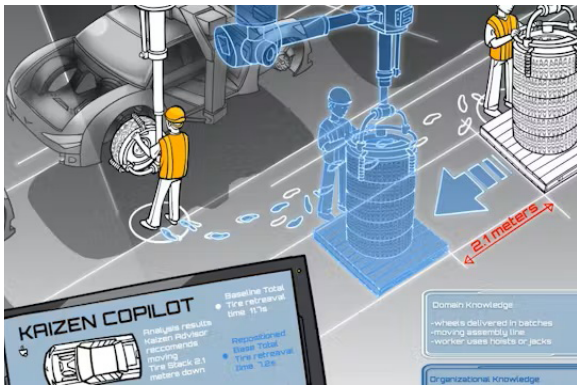
Reel Feel è un sistema aptico indossabile che utilizza un modulo da spalla e cinque fili collegati alle dita per riprodurre molteplici sensazioni: rigidità, animazioni tattili, forze impulsive, texture e compliance. I motori BLDC controllano la trazione dei fili creando feedback ricco e realistico con meno di 10g di peso sulla mano. Rispetto a guanti ed esoscheletri, riduce ingombro e fatica, mantenendo mobilità naturale. Gli studi CHI 2025 mostrano miglioramenti in immersione, realismo e discriminazione degli stimoli.

Link riferimento

https://www.futureinterfaces.com/research/2025/reel-feel

Caso di studio / 44

Retrocausal



Anno

2023

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale B2B

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

AI Assistant / AR / Software

Descrizione

Assembly Copilot è una piattaforma di assistenza intelligente per il lavoro manuale di assemblaggio. Combina computer vision, machine learning e digital work instructions per guidare in tempo reale gli operatori, evidenziare errori, prevenire difetti e tracciare ogni step produttivo. Include analisi dei cicli, poka-yoke, line balancing automatico e video traceability che permette agli ingegneri di rivedere ogni fase del processo. Ampiamente adottato in ambito automotive, migliora qualità, efficienza e riduce scarti.

Link riferimento

https://retrocausal.ai/assembly-copilot

Rock Train VR HUB

Anno

2022

Nazionalità

Italia

Stato del progetto

Infrastruttura operativa

Categoria

Simulativo

TRL

9

Tag

Industrial VR Training / Training / Simulazione

Descrizione

L'hub di via del Lazzaretto (Bologna) è il primo centro per la manutenzione ciclica dei treni Rock. L'impianto, rinnovato con nuove tecnologie e processi digitali, integra simulazioni e formazione basata su realtà virtuale per la revisione dei sottosistemi (carrelli, porte, impianti idraulici/elettrici). Le operazioni includono check avanzati ogni 1,2 milioni di km. La struttura rappresenta un modello nazionale per efficienza, sostenibilità e digitalizzazione della manutenzione ferroviaria.

Link riferimento

https://corrieredibologna.corriere.it/notizie/cronaca/23_ottobre_20/a-bologna-il-primo-hub-per-la-manutenzione-ciclica-dei-nuovi-treni-rock-3f6e8851-b58e-4bbb-8741-aa8a39270xlk.shtml

Caso di studio / 46

Sardegna Playground

Anno

2023

Nazionalità

Italia

Stato del progetto

Mostra/Installazione

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

VR / Educational / Knowledge

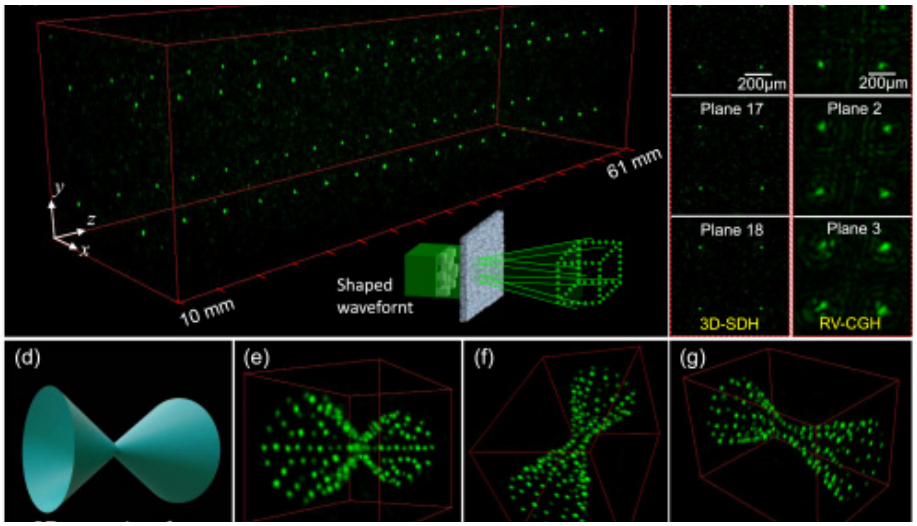
Descrizione

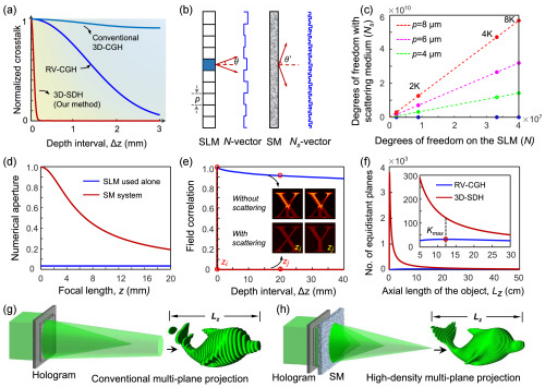
Sardegna Playground è una mostra immersiva dedicata a tecnologie interattive, VR/AR e gamification, ospitata nella ex Manifattura Tabacchi di Cagliari. Propone simulazioni, installazioni XR, superfici interattive, stanze immersive e percorsi educativi con visori Oculus. L'obiettivo è avvicinare studenti e adulti alla creatività digitale, al problem-solving e alla comprensione di concetti astratti tramite attività esperienziali. Il format è utilizzato anche come piattaforma per laboratori scolastici.

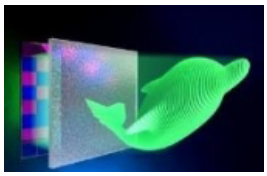
Link riferimento

https://sardegnaplayground.opificioinnova.it/

Scattering







Stato del progetto

Ricerca accademica

TRL

5

Anno

2023

Nazionalità

Cina

Categoria

Tecnologico

Tag

AR / 3D Holographics / Computer Vision

Descrizione

La 3D?SDH è una tecnica olografica che combina SLM e mezzi diffusivi per creare proiezioni 3D dinamiche ad altissima densità. Grazie allo scattering controllato del campo ottico, aumenta la risoluzione in profondità di oltre tre ordini di grandezza rispetto all'olografia tradizionale e riduce l'interplane crosstalk. Questo permette ologrammi molto più realistici, ideali per VR, display 3D e ottica crittografica. La tecnologia rappresenta un passo verso olografia immersiva senza headset.

Link riferimento

https://doi.org/10.1364/OPTICA.483057

Caso di studio / 48

SenseGlove Nova G2

Anno

2023

Nazionalità

Paesi Bassi

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Haptic Glove / Hardware / Dispositivo Indossabile

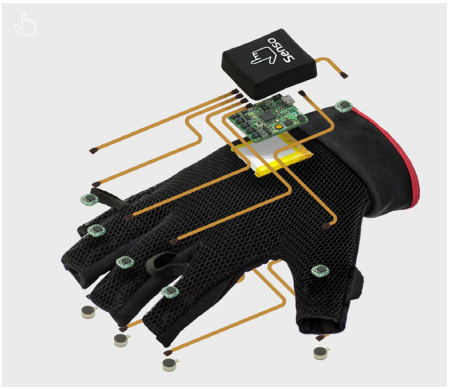
Descrizione

SenseGlove Nova 2 è un guanto aptico professionale per VR training, telerobotica e simulazioni avanzate. Offre tre forme di feedback: force feedback fino a 20N per dito, active-contact feedback tramite cinghia palmare che riproduce pressioni e contatti, e vibrotattili LRA su pollice, indice e palmo. Il tracking delle dita combina sensori meccanici e hand?tracking computer vision. Totalmente wireless, garantisce circa 3 ore di autonomia e compatibilità con Meta Quest e HTC via controller mount.

Link riferimento

https://www.senseglove.com/product/nova-2/

Senso Haptic



Anno

2018

Nazionalità

Russia

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

VR / Haptic Interface / Hardware

Descrizione

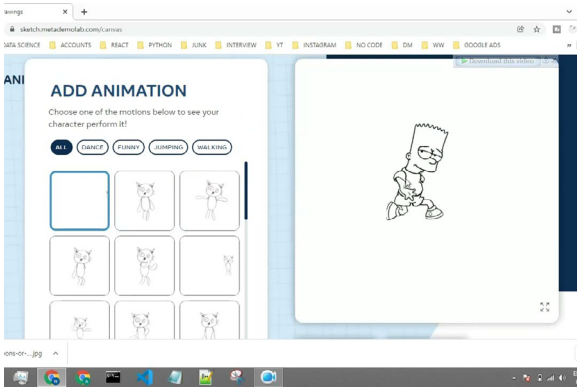
Senso Glove è un controller aptico indossabile per VR e AR con tracking completo della mano tramite 8 IMU e latenza di 15ms. Integra 6 motori vibrotattili (uno per dito) con oltre 100 effetti configurabili, comunicazione wireless e batteria fino a 4 ore. Compatibile con SteamVR, può essere abbinato a sistemi di tracking esterni (Vive/Tundra). Pensato per gaming, training, simulazioni, ricerca neuroscientifica e formazione tecnica, offre hand?tracking naturale senza controller tradizionali.

Link riferimento

https://senso.me/

Caso di studio / 50

Sketch Meta



Stato del progetto

Soluzione software

TRL

9

Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Applicativo

Tag

Creative AI / XR / Software

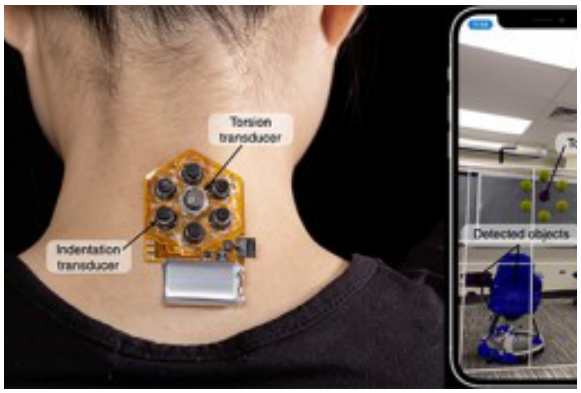
Descrizione

Sketch Meta Demo Lab permette di animare schizzi statici tramite AI. L'utente carica un disegno, il sistema rileva lo scheletro del personaggio, consente micro regolazioni dei giunti e applica animazioni preset (camminare, saltare, danzare). Pensato per bambini, educatori, illustratori e prototipazione rapida, riduce le barriere all'animazione digitale e non richiede software dedicato. Le immagini vengono elaborate in sessione, nel rispetto della privacy.

Link riferimento

https://sketch.metademolab.com/

Skin Haptic Patch



Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca avanzato

Categoria

Tecnologico

TRL

5

Tag

Hardware / Haptic pressure / Haptic Vibration

Descrizione

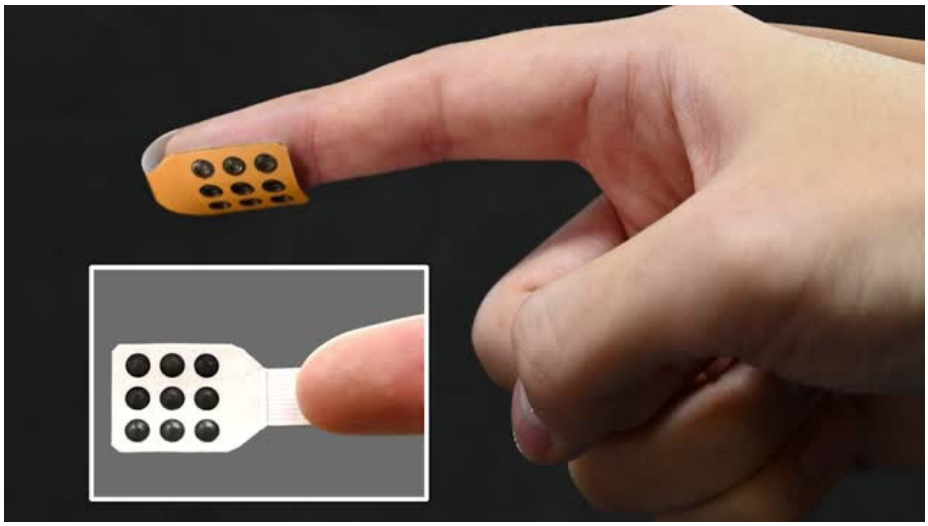
Dispositivo aptico sottile e flessibile che aderisce alla pelle e riproduce sensazioni complesse (pressione, vibrazione, torsione) grazie a una matrice esagonale di 19 micro attuatori magnetici incapsulati in un reticolo di silicone. Rispetto ai "buzzer" del 2019, i nuovi attuatori forniscono forze controllate su ampie bande di frequenza, mantenendo la posizione senza consumo energetico continuo (design bistabile) e consentendo feedback persistenti con minima potenza. Le applicazioni vanno da VR/telepresenza a accessibilità (orientamento per ipovedenti, feedback per protesi).

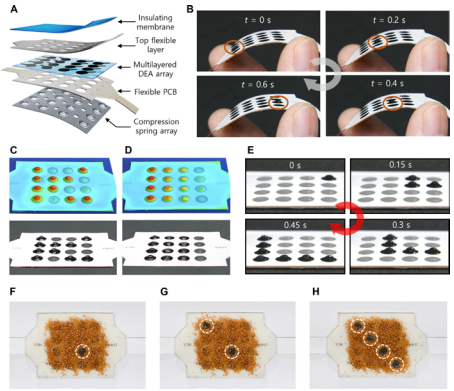
Link riferimento

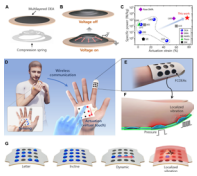
https://news.northwestern.edu/stories/2024/11/new-haptic-patch-transmits-complexity-of-touch-to-the-skin

Caso di studio / 52

Skin-Attached Haptic Patch







Anno

2023

Nazionalità

Corea del Sud

Stato del progetto

Ricerca accademica

Categoria

Tecnologico

TRL

4

Tag

Wearable / Haptic Patch / Hardware

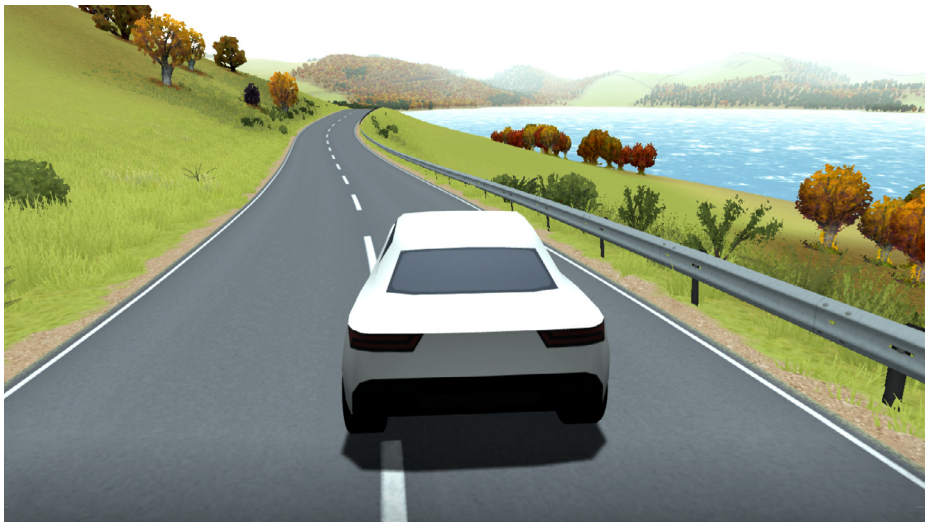
Descrizione

Questo patch aptico aderente integra un array di Flat Cone Dielectric Elastomer Actuators (FCDEA): è sottile, soffice, conformabile e capace di erogare forze statiche e dinamiche su ampie aree cutanee. Insieme a un array di fotomicrosensori e a un modulo di comunicazione, abilita interazione tattile bidirezionale (invio/ricezione) e rendering di topologie 3D o texture di oggetti virtuali tramite vibrazioni localizzate. Mostra potenziale per comunicazione tattile in tempo reale e XR immersiva con dispositivi leggeri e a basso profilo.

Link riferimento

https://doi.org/10.1126/sciadv.adt4839

SlowRoads.io



Stato del progetto

Soluzione software pubblica

TRL

9

Anno

2023

Nazionalità

Regno Unito

Categoria

Simulativo

Tag

Procedural Simulation / Web Game / Training

Descrizione

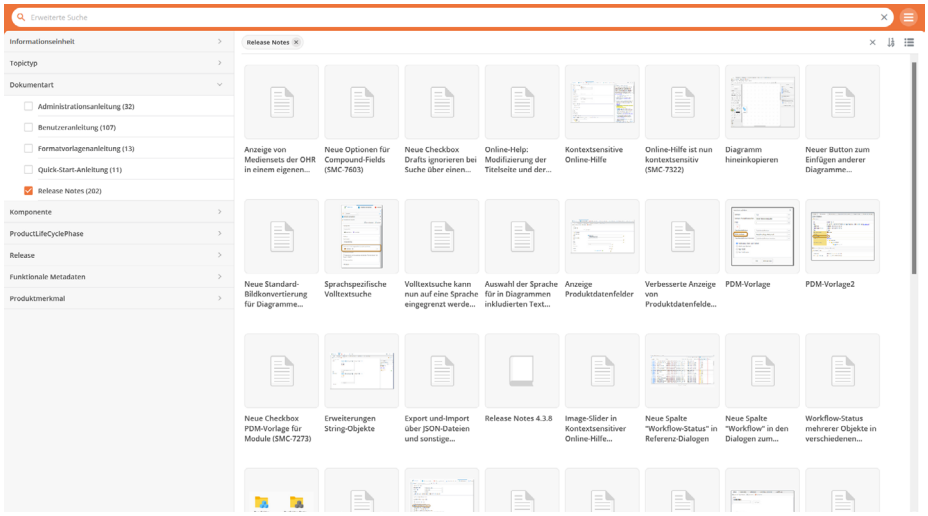
Slow Roads è un driving game procedurale "zen" in browser: paesaggi infiniti generati al volo, guida rilassata senza obiettivi, autodrive/autosterzo, meteorologia e stagioni, supporto a pad e miglioramenti fisici continui. Il changelog documenta gli aggiornamenti fino alla v2.2.0 (7 feb 2026) con rifiniture a fisica, shader, smoothing stradale e fix multipli; la v2.1.x (nov 2025) introduce revisione fisica completa, modalità autospeed e camera avanzata. È una vetrina tecnica di grafica 3D in JavaScript e generazione del terreno.

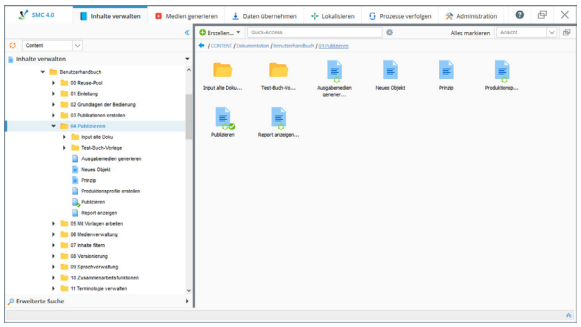
Link riferimento

https://slowroads.io/

Caso di studio / 54

Smart Media Creator





Anno

2018

Nazionalità

Germania

Stato del progetto

Soluzione commerciale

Categoria

Organizzativo

TRL

9

Tag

Descrizione

Smart Media Creator (SMC) è un Component Content Management System (CCMS) sviluppato da EC System, progettato per la creazione, la gestione e la pubblicazione multicanale e multilingua della documentazione tecnica.

Link riferimento

Sony Spatial Headset

Anno

2024

Nazionalità

Giappone

Stato del progetto

Soluzione enterprise per creator

Categoria

Tecnologico

TRL

8

Tag

AR / MR Headset / Hardware

Descrizione

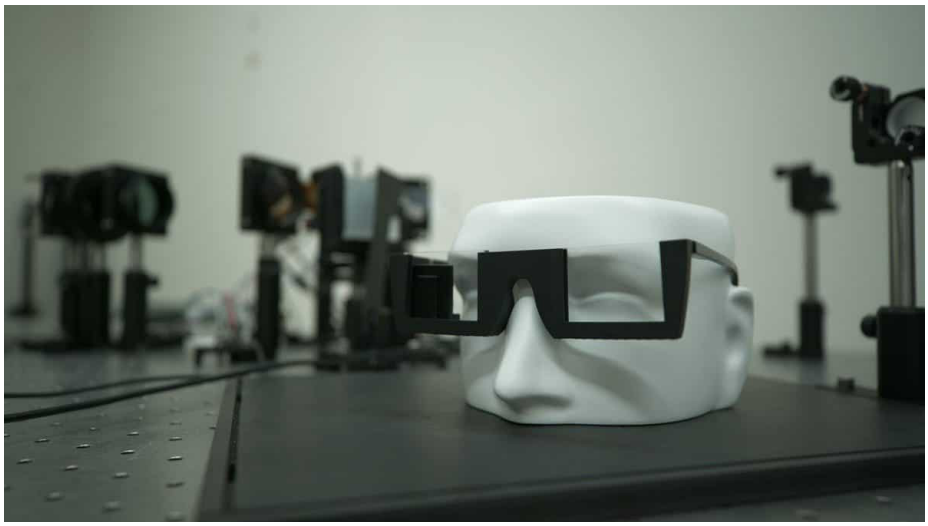
Sony ha presentato a CES 2025 la linea XYN per spatial content creation: headset con micro OLED 4K per occhio, video see-through a colori, tracking di precisione e controller dedicato; prima versione enterprise per Siemens (SRHS1, $4.750) e piano di rilascio più ampio sotto il brand XYN. Architettura su Qualcomm XR2+ Gen 2, focus su CAD/ingegneria, motion capture (XYN Motion Studio + sensori mocopi). Posizionamento: creatori e industria, distinto dal consumer PSVR.

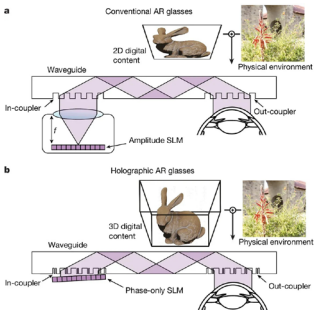
Link riferimento

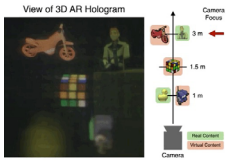
https://www.sony.net/corporate/information/news/202401/24-001E/

Caso di studio / 56

AI holography AR glasses







Anno

2024

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Applicativo

TRL

4

Tag

Hardware / AR / AI

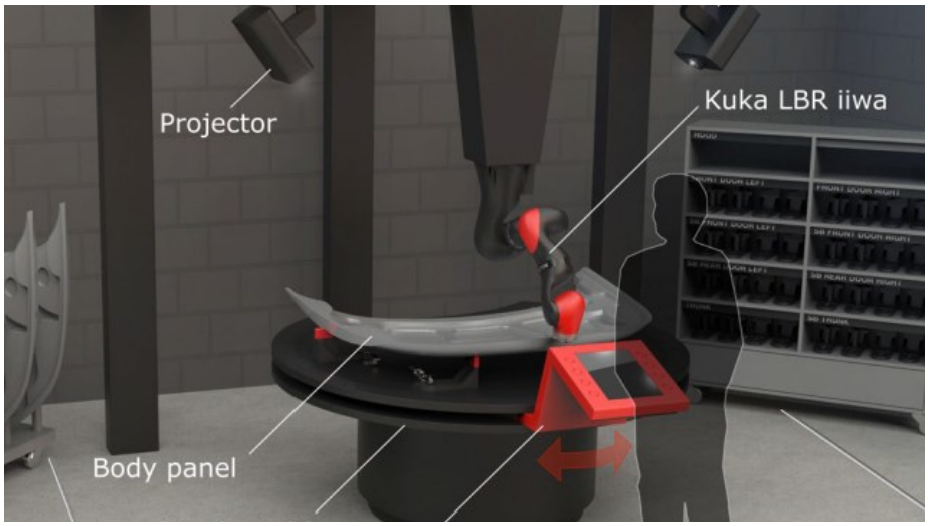
Descrizione

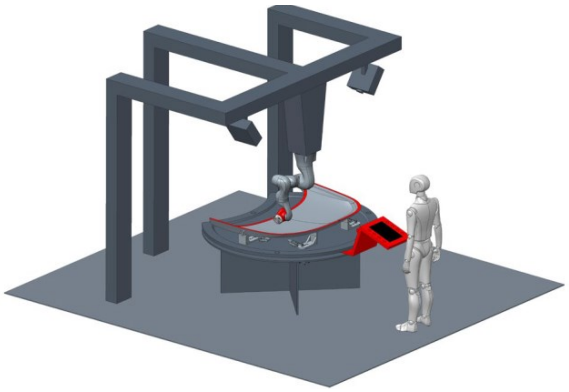
I ricercatori della Stanford University hanno sviluppato un prototipo di visore per realtà aumentata (AR) che integra immagini olografiche e intelligenza artificiale per sovrapporre immagini mobili 3D a colori sulle lenti di quelli che sembrano normali occhiali da vista. Questa innovazione offre un'esperienza visiva 3D soddisfacente in un formato compatto e confortevole, adatto per essere indossato tutto il giorno. Il sistema utilizza tecnologie di olografia potenziate dall'intelligenza artificiale e di visualizzazione con guida d'onda nanofotonica per proiettare ologrammi calcolati direttamente sulle lenti senza ricorrere a ingombranti ottiche aggiuntive.

Link riferimento

https://doi.org/10.1038/s41586-024-07386-0

Tangible VR





Anno

2020

Nazionalità

Belgio

Stato del progetto

Dimostratore di ricerca

Categoria

Simulativo

TRL

5

Tag

Tangible VR, Physical proxies / Training / Simulazione

Descrizione

"Tangible VR" integra prototipazione fisica e VR per il workplace design: il modello CAD genera doppio gemello (fisico e virtuale) co-registrato, così che in VR si percepisca l'ambiente digitale ma si tocchino vincoli/oggetti reali. Nel caso studio (cellula HRI con Audi/KUKA), l'approccio aumenta realismo ergonomico e riduce il gap tra mockup e simulazione, mantenendo la ricchezza tattile del fisico e la flessibilità del virtuale.

Link riferimento

https://doi.org/10.1145/3380867.3426202

Caso di studio / 58

TG0

TG0

Anno

2016

Nazionalità

Regno Unito

Stato del progetto

Soluzione commerciale B2B

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Wearable / Tangible Interface / Hardware

Descrizione

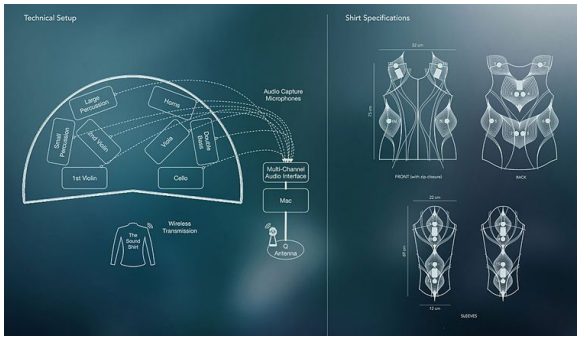
TG0 fornisce superfici touch+pressure capacitive su forme 3D (polimeri conduttivi) con mappe di forza, gesture XY+Z, shear force e deformation sensing per HMI in automotive, med-tech, consumer e robotica. La piattaforma riduce componenti rigidi, semplifica l'assemblaggio e abilita controlli seamless (IP elevata). Il 2024–26 vede funding e partnership (es. Anthrotek: pelle sintetica + sensori per training medicale).

Link riferimento

https://www.tg0.co.uk/technology/tactile-sensing

Caso di studio / 59

The Sound Shirt



Anno

2016

Nazionalità

Germania

Stato del progetto

Soluzione commerciale / opera interattiva

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Wearable / Haptic Garment / Hardware

Descrizione

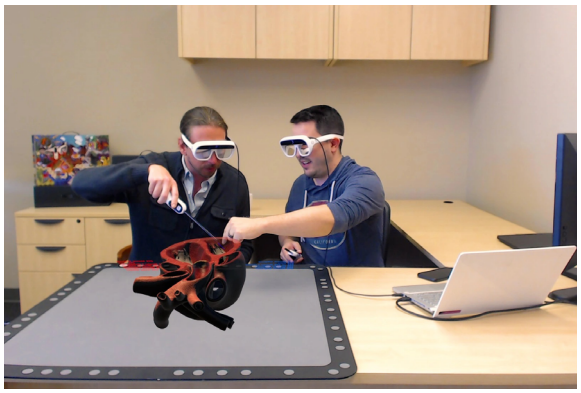
SoundShirt è una maglia aptica tessile con ~30 micro attuatori che mappano musica, voce e suoni sul corpo in tempo reale (wireless), permettendo a pubblici sordi e udenti di "sentire" concerti, spettacoli e sport tramite pattern distribuiti su torace/braccia. Completamente morbida (smart textiles senza fili rigidi), è stata premiata e adottata in teatri e venue. Disponibili versioni consumer/professionali, con app e kit integrati per orchestrazioni live.

Link riferimento

https://cutecircuit.com/soundshirt/

Caso di studio / 60

TiltFive



Stato del progetto

Soluzione commerciale

TRL

9

Anno

2021

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Applicativo

Tag

Tabletop AR, Retroreflective / Software / Applicazione

Descrizione

Tilt Five è un sistema AR da tavolo: occhiali leggeri con pico proiettori duali che riflettono su una board retroriflettente, mostrando mondi olografici condivisi con wand 6DoF per l'input. Funziona con PC/Android e privilegia gioco sociale locale/online (accordi con editori di board game e VTT). L'ottica a retroriflessione offre ampio FOV e immagini brillanti a basso costo rispetto ai visori MR completi, mantenendo la convivialità del tavolo.

Link riferimento

https://www.tiltfive.com/play/the-system

Tommi

TOMMI
a game to feel better

Anno

2016

Nazionalità

Italia

Stato del progetto

Soluzione commerciale sanitaria (VR)

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

VR / Health Application / Software

Descrizione

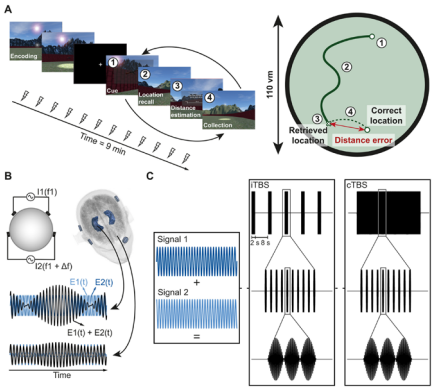
TOMMI è un'esperienza VR sviluppata con medici e psicologi per ridurre ansia e dolore nei pazienti pediatrici durante procedure ospedaliere. Propone un ambiente fantasy con quattro attività, una delle quali coinvolge anche i genitori tramite app mobile. Utilizzato in oltre dieci ospedali in Italia e negli USA, il sistema applica un protocollo clinico basato su distrazione immersiva, miglioramento della collaborazione con il personale medico e riduzione della sedazione farmacologica.

Link riferimento

https://www.tommigame.com/tommi/

Caso di studio / 62

tTIS



Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Ricerca scientifica

Categoria

Tecnologico

TRL

4

Tag

Neuroscience / Brain Stimulation / Hardware

Descrizione

Lo studio utilizza tTIS (transcranial Temporal Interference Stimulation) per modulare selettivamente il complesso ippocampo entorinale in profondità, durante un compito di navigazione spaziale in VR sincronizzato con fMRI. La stimolazione intermittent theta burst (iTBS) migliora le performance di navigazione e riduce l'attività "grid-cell-like" nell'EC, dimostrando per la prima volta la capacità di modulare in modo non invasivo strutture profonde correlate alla memoria spaziale. Risultati promettenti per futuri trattamenti in TBI e demenze.

Link riferimento

https://doi.org/10.1126/sciadv.ado4103

Varjo Aeromedical Training

Anno

2022

Nazionalità

Finlandia

Stato del progetto

Soluzione enterprise (MR training)

Categoria

Simulativo

TRL

9

Tag

VR Training / Simulation / Training

Descrizione

Real Response utilizza i visori Varjo XR4/XR3 combinati con la piattaforma BlueRoom, creando simulazioni miste di alta fedeltà per addestrare team aeromedici e militari. La soluzione replica cabine aero medicali, procedure di trauma avanzate e scenari difficili da accedere nella realtà (airframe reali, condizioni di volo, costi e autorizzazioni). Le simulazioni permettono l'uso di manichini reali e strumenti fisici con overlay MR ad alta precisione, migliorando la formazione e riducendo costi logistici.

Link riferimento

https://varjo.com/case-studies/reimagining-aeromedical-training-how-real-response-is-transforming-the-way-we-learn-with-mixed-reality

Caso di studio / 64

Varjo XR3

Anno

2020

Nazionalità

Finlandia

Stato del progetto

Soluzione commerciale professionale

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

MR headset, Video see?through / Hardware / Dispositivo Indossabile

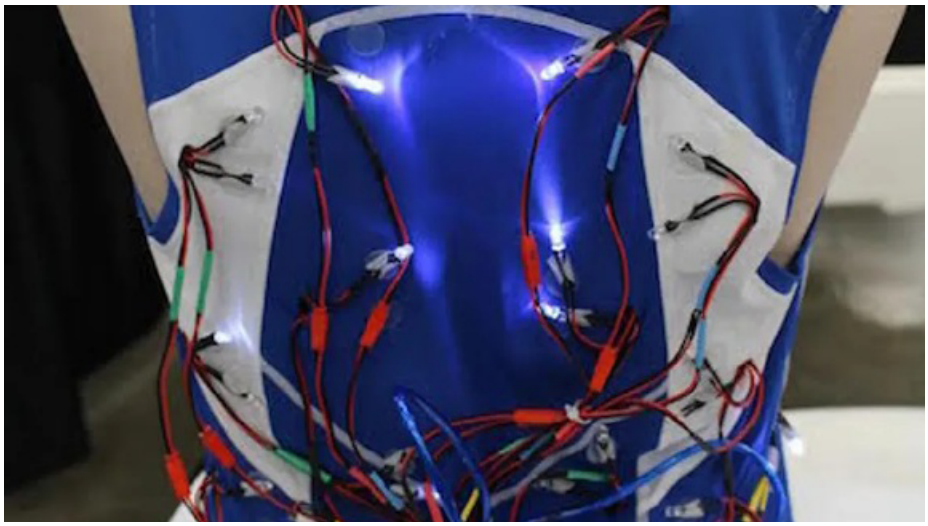
Descrizione

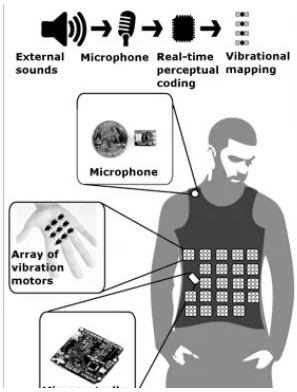
Varjo XR3 è un visore mixed reality fotorealistico con risoluzione umana (70+ PPD), FOV di 115°, doppia camera 12 MP per passthrough, LiDAR per ricostruzione 3D in tempo reale, eye tracking a 200 Hz, hand tracking Ultraleap, e latenza inferiore a 20 ms. Utilizzato in aviazione, automotive e simulazione industriale, consente fusioni precise tra reale e virtuale superando i limiti degli optical see-through.

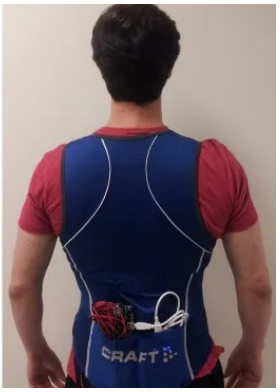
Link riferimento

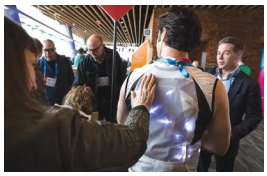
https://varjo.com/products/varjo-xr-3

Haptics vest / Speech by Feel









Anno

2018

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Prototipo di ricerca

Categoria

Applicativo

TRL

5

Tag

Wearable / Neuro-Haptics / Software

Descrizione

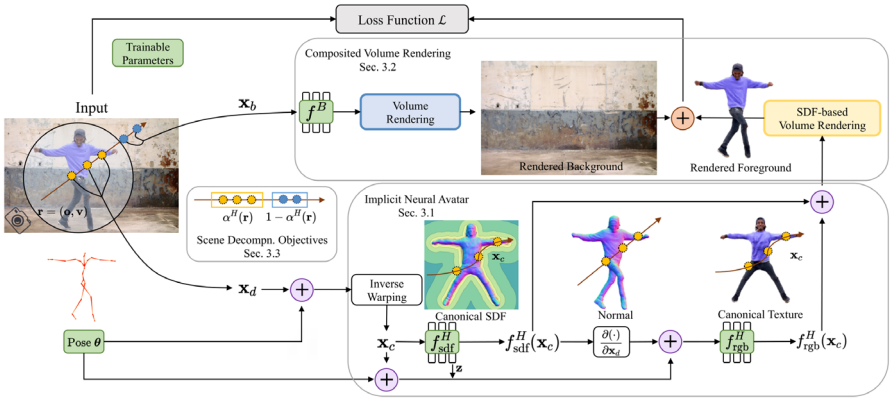
Il VEST (Versatile Extra Sensory Transducer) è un indossabile tattile con 40 attuatori vibranti che convertono la voce in pattern vibrotattili sul torso, permettendo a persone sorde di "sentire" il linguaggio tramite il tatto. L'audio viene scomposto in bande e trasmesso tramite Bluetooth, creando sequenze complesse che il cervello impara a interpretare tramite sostituzione sensoriale.

Link riferimento

https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.unibo.it/document/6775558?arnumber=6775558

Caso di studio / 66

Vid2avatar



Anno

2023

Nazionalità

Switzerland / Germany

Stato del progetto

Ricerca avanzata (CVPR 2023/2025)

Categoria

Applicativo

TRL

4

Tag

3D avatar, Self?supervised / Software / Applicazione

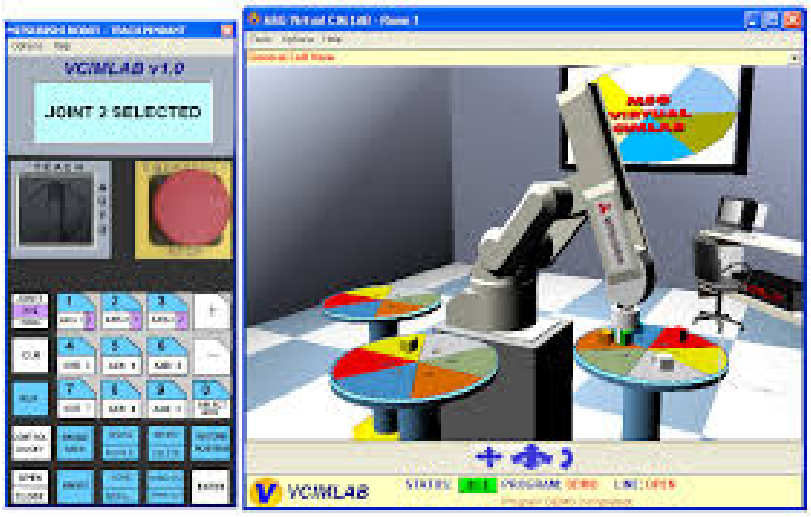
Descrizione

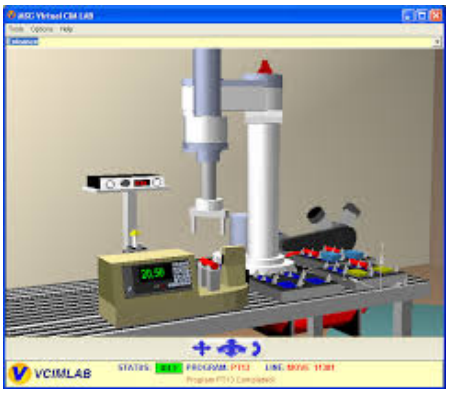
Vid2Avatar e la versione avanzata Vid2Avatar Pro ricostruiscono avatar 3D fotorealistici e animabili da un singolo video monoculare in-the-wild. Integrano decomposizione della scena auto supervisionata, campionamento volumetrico, campi neurali per corpo e background e, nella versione Pro, un Universal Prior Model basato su un vasto corpus multi-view. Consentono ricostruzioni di alta qualità senza rigging o scansioni dedicate.

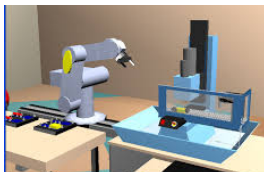
Link riferimento

https://moygcc.github.io/vid2avatar/

Virtual







Stato del progetto

Implementazioni XR industriali

TRL

8

Anno

2020

Nazionalità

Stati Uniti

Categoria

Simulativo

Tag

VR / Remote Learning / Training

Descrizione

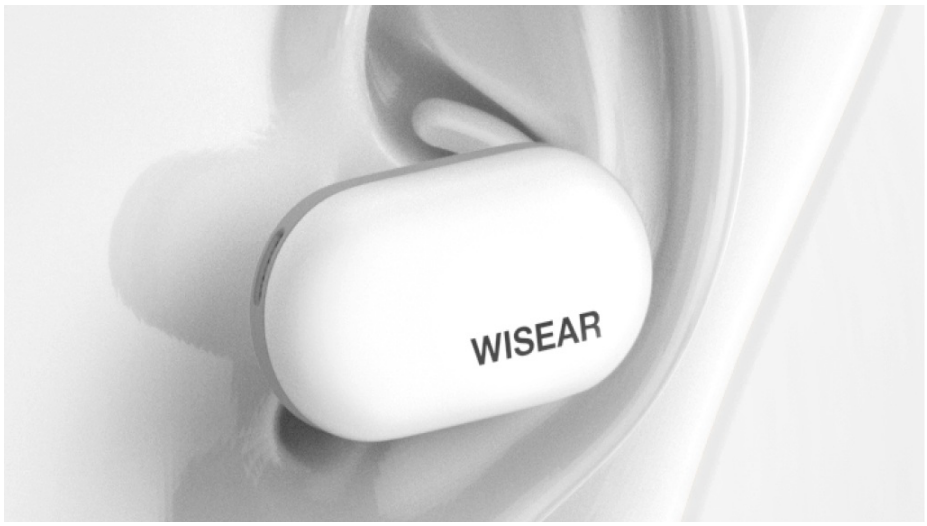
Le iniziative di Virtual Manufacturing Lab utilizzano VR/MR per ottimizzare cicli produttivi, rilevare errori in fasi precoci (virtual build), migliorare ergonomia e sicurezza, accelerare addestramento e ridurre costi di rilavorazione. Lam Research ad esempio implementa XR per anticipare problemi in geometrie d'assemblaggio, effettuare redesign virtuali e migliorare KPI del 20%.

Link riferimento

https://newsroom.lamresearch.com/How-Were-Making-Our-Manufacturing-Floor-Virtually-Perfect

Caso di studio / 68

Wisear



WISEAR

Anno

2023

Nazionalità

Francia

Stato del progetto

Startup acquisita (piattaforma neurale)

Categoria

Tecnologico

TRL

7

Tag

Neural Interface / Earbuds / Hardware

Descrizione

Wisear sviluppa un'interfaccia neurale non invasiva basata su earbuds capaci di rilevare segnali bioelettrici (muscoli facciali, micro gesture, potenziali neurali) e convertirli in comandi digitali tramite AI. Consente controlli touchless/ voiceless per dispositivi AR/VR, audio, gaming e applicazioni professionali. Nel 2026 è stata acquisita da Naqi Logix, integrandosi in un'unica piattaforma neurale.

Link riferimento

https://www.wisear.io/

XReal One

Anno

2023

Nazionalità

Cina

Stato del progetto

Soluzione commerciale consumer

Categoria

Applicativo

TRL

9

Tag

AR Glasses / Software / Applicazione

Descrizione

La serie XREAL One (2025) introduce AR glasses con chip X1 per elaborazione 3DoF on?board, display micro OLED FHD 120 Hz, FOV di 50° (One) e 57° (One Pro), peso 84–87 g, design tipo sunglasses, modalità spatial?screen fino a 310 pollici e compatibilità con smartphone/console/PC. La variante Pro introduce lenti a prisma piatte e maggiore luminosità.

Link riferimento

https://us.shop.xreal.com/products/xreal-one

Caso di studio / 70

zSpace

zSpace

Anno

2015

Nazionalità

Stati Uniti

Stato del progetto

Soluzione commerciale educativa

Categoria

Tecnologico

TRL

9

Tag

Headset?free / AR / Haptic stylus

Descrizione

zSpace propone un sistema AR/VR senza headset, basato su laptop stereoscopici con eye tracking e stilo 3D. La piattaforma Imagine (2025) introduce un'unità dedicata alla scuola primaria con applicazioni didattiche STEM/language/CTE, attività interattive, e strumenti per educatori.
Usata in oltre 2.500 istituzioni educative, consente laboratori virtuali in sicurezza, prototipazione e simulazioni immersive.

Link riferimento

https://zspace.com/

Riconoscimenti

Tanti grazie

Il lavoro progettuale dei designer non è mai uno sforzo individuale, tantomeno il lavoro di ricerca che essi compiono. Per questo motivo ti ritrovi in questa pagina a leggere quanto sia grato alle tante figure che mi hanno accompagnato durante gli ultimi anni in questa folle avventura.

Innanzitutto, a Michele e Roberto per la possibilità offerta, per la protezione, per avermi mostrato le vie, anche quelle alternative, per la fiducia. (Ovviamente per le loro massime).

Alla grande pazienza dei professori Dall'Osso e Scarcelli per aver accettato di revisionare questo contributo, per avermi restituito indicazioni e suggerimenti preziosi, per il garbo.

Non posso non menzionare la Professoressa Xiao per avermi accolto nel suo gruppo di lavoro dandomi la possibilità di vedere le cose da un altro punto di vista, per la comprensione.
Grazie a Tim, Yang, Li, Yao e Sara, per il supporto, per l'ospitalità.
Grazie ad Ali per i "Buongiorno! Come va?", per la condivisione.

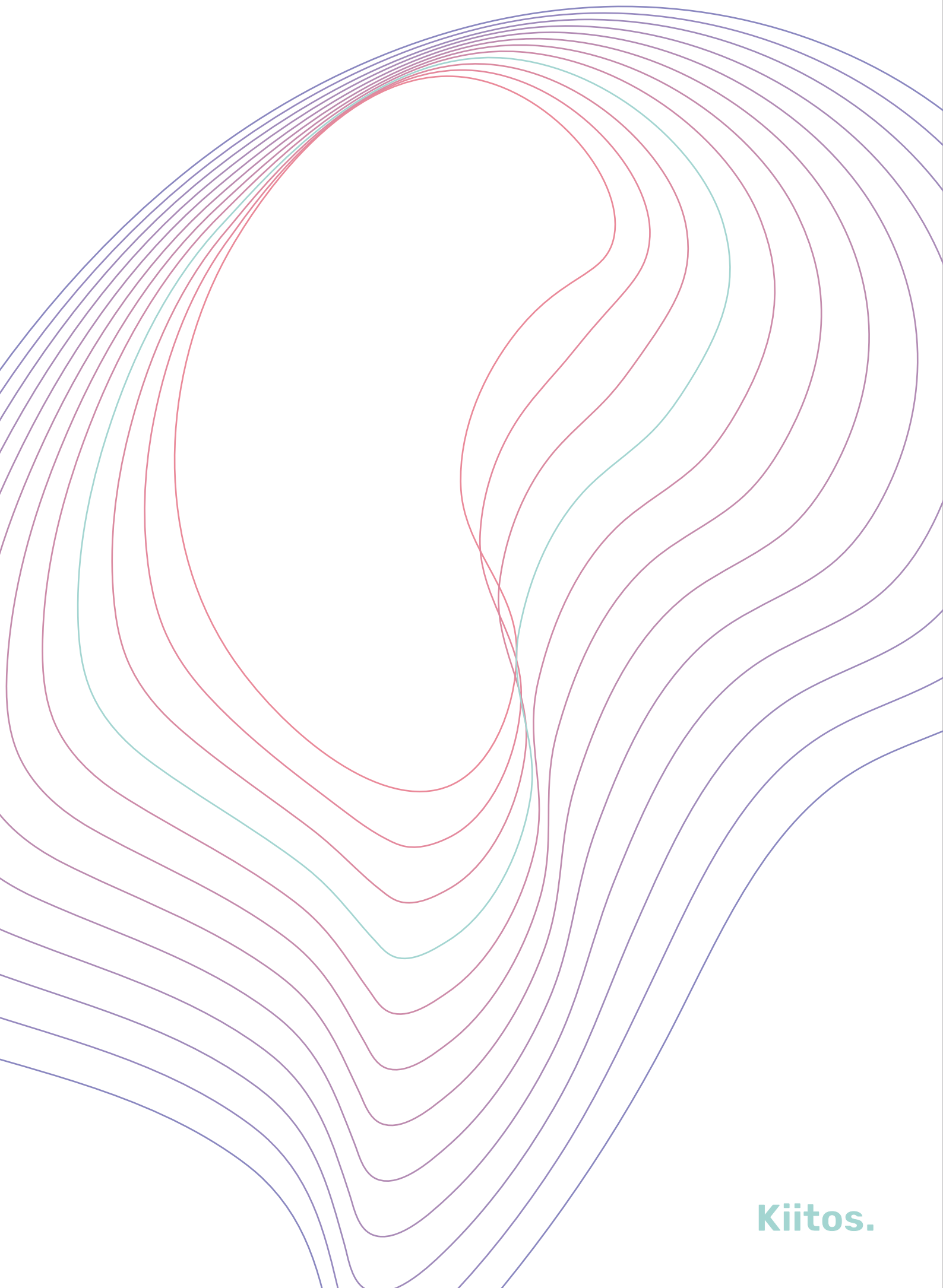
Un grande grazie ad ADU, per gli spunti, per l'incoraggiamento, per la caoticità che mi ha spinto ad estendere quelli che pensavo fossero i miei limiti. (Anche per i caffè e le perle auliche).

Un sentito grazie all'ufficio D4P per il supporto tecnico, per l'interesse, per l'energia.

Grazie a Simo per aver sdrammatizzato, per la vicinanza.
Grazie a Virgi per l'alleggerimento della scrittura, per il confronto. (Pure per i pasticcini).
Grazie a Veri per tendermi sempre la mano in caso di aiuto, per l'ascolto.

Grazie alla mia famiglia, per il sostegno e l'appoggio incondizionato, per l'affetto.

Grazie agli amici di una vita, per esserci sempre, per la filosofia.



Kiitos.