

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

DISEGNO E METODI DELL'INGEGNERIA INDUSTRIALE

Ciclo XX

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza: ING-IND/15

TITOLO TESI

**SIMULATORE DI INTERFACCIA
UOMO-MACCHINA PER IL CONTROLLO DI UAV**

Presentata da: Giovanni Miranda

Coordinatore Dottorato

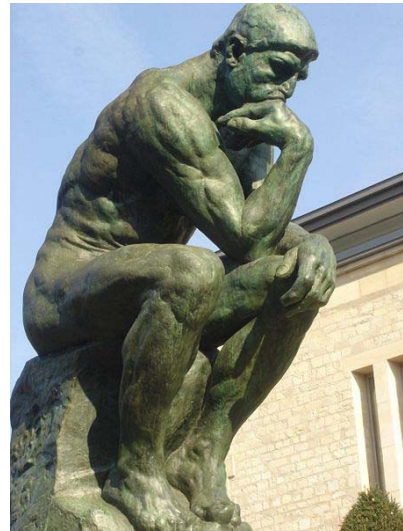
Relatore

Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani

Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani

Esame finale anno 2008

Ai miei genitori:



*A zia Anna,
bella come il sole,
bella come sempre*

*“Tutti desiderano possedere la conoscenza,
ma relativamente pochi sono disposti
a pagarne il prezzo”*

Giovenale

Indice

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle	5
Acronimi e Abbreviazioni.....	7
Introduzione.....	9
Capitolo I - Il sistema UAV	15
I.1 Definizioni	15
I.2 Cenni storici.....	15
I.3 Il sistema UAV	17
I.4 Applicazioni e vantaggi degli UAV.....	19
I.5 Classificazione degli UAV	20
I.5.1 Gli UAV Endurance	21
I.5.2 Gli UAV Tattici.....	23
I.6 Attività di ricerca e sviluppi futuri.....	24
I.6.1 L’inserimento degli UAV nel traffico civile	25
Capitolo II - L’interfaccia uomo-macchina per il controllo remoto nel sistema UAV	27
II.1 Introduzione.....	27
II.2 Gli Human Factors negli UAVs	29
II.2.1 Situation Awareness	30
II.2.2 Mental Workload.....	31
II.3 L’ interfaccia uomo-macchina.....	33
II.3.1 Aspetti negativi delle interfacce uomo-macchine degli odierni UAV ...	34
II.4 L’automazione	38
II.4.1 I problemi legati al livello di automazione.....	42
II.4.2 Il pilota esterno	44
II.4.3 Il trasferimento del controllo del velivolo	45
Capitolo III - Il sistema di simulazione	47
III.1 Introduzione.....	47
III.2 Il simulatore di interfaccia uomo-macchina	49
III.3 Il livello di automazione	52
III.3.1 Il Supervisory Control	54
III.3.2 Le Macroistruzioni operative: i comandi di alto livello	57
III.3.3 Il planning algorithm	59
III.3.4 Modalità di interazione uomo-velivolo	61
III.4 Interfaccia uomo-macchina per il controllo del velivolo.....	64
III.4.1 Il 3D virtual display	66
III.4.2 Il pannello di Comando	69

III.5	Il modello velivolo.....	76
Capitolo IV -	L'algoritmo per il calcolo delle rotte.....	79
IV.1	Introduzione.....	79
IV.2	Il principio di funzionamento del <i>Planning Algorithm</i>	79
IV.2.1	La modellazione dell'ambiente	82
IV.2.2	Il Mission Planning Algorithm.....	83
IV.2.3	Il path planning algorithm	88
Capitolo V -	Test del simulatore e risultati	111
V.1	Introduzione.....	111
V.2	Validazione dell'algoritmo	111
V.2.1	Affidabilità dell'algoritmo.....	112
V.2.2	Carico computazionale	113
V.3	I test dell'interfaccia	115
V.3.1	Preparazione del test di interfaccia.....	115
V.3.2	Scelta del campione e conduzioni esperimenti.....	120
V.3.3	Analisi e <i>reporting</i> dei risultati.....	120
Conclusioni.....	125
Bibliografia.....	129
Ringraziamenti	133

Indice delle figure

Figura I.1. Il Ryan Model 147 “Lightning Bug”	16
Figura I.2. Il Predator: l’aeromobile e l’interfaccia della stazione di controllo	18
Figura I.3. Il Global Hawk	22
Figura I.4. L’Hunter :l’aeromobile e l’interfaccia della stazione di controllo	22
Figura I.5. Il Pioneer: l’aeromobile e l’interfaccia della stazione di controllo.....	23
Figura I.6. I micro UAV	24
Figura I.7. L’aeromobile del Falco e dello Sky-X.....	25
Figura II.1. Summary accident percentages across aircraft system.....	28
Figura II.2. La Situation Awareness.....	30
Figura II.3. La comunicazione tra l’operatore e il velivolo.....	34
Figura II.4. Il layout delle interfacce del Predator, del Hunter e del Pioneer.....	35
Figura II.5. L’interfaccia del Predator	37
Figura II.6. Il Fire Scout.....	38
Figura II.7. I livelli di automazione.....	42
Figura II.8. Il radio-control box.....	44
Figura II.9. La fase di atterraggio del Pioneer.....	44
Figura III.1. Il sistema UAV e l’uomo	47
Figura III.2. Il sistema UAV comprensivo dell’uomo	48
Figura III.3. Struttura modulare del simulatore di interfaccia uomo-macchina.....	49
Figura III.4. Simulatore di Interfaccia Uomo-Macchina.....	52
Figura III.5. Architettura del sistema UAV.....	55
Figura III.6. Il Supervisory Control.....	56
Figura III.7. I livelli di automazione nel sistema UAV.....	57
Figura III.8. L’area da Sorvegliare	59
Figura III.9. Il Planning Algorithm	60
Figura III.10. LOA manuale.....	62
Figura III.11. LOA semi-automatico.....	63
Figura III.12. LOA automatico.....	63
Figura III.13. Layout dell’interfaccia uomo-macchina	65
Figura III.14. Il loop di comunicazione tra l’operatore ed il velivolo.....	66
Figura III.15. Il 3D Virtual Display	67
Figura III.16. Il Pannello di Comando	69
Figura III.17. Feedback sul comando inviato.....	72
Figura III.18. Feedback sul comando inviato.....	72
Figura III.19. Visualizzazione del volo	73
Figura III.20. Monitoraggio della missione.....	74
Figura III.21. Variazione dell’inclinazione del touchscreen (rifai foto)	74
Figura III.22. L’invio del comando	75
Figura III.23. Dal monitoraggio all’invio del comando	76
Figura III.24. Architettura del sistema UAV.....	76
Figura III.25. Il modello velivolo	77
Figura IV.1. Il Planning Algorithm	81
Figura IV.2. Il mondo digitale.....	83
Figura IV.3. Survey di un set di obiettivi	84
Figura IV.4. SpotSurvey di un Target	85
Figura IV.5. StripSurvey di un Target.....	86

Figura IV.6. Monitor di un'Area rettangolare	88
Figura IV.7. Il Safe Algorithm	90
Figura IV.8. Il safe algorithm: calcolo dei percorsi sicuri con $\alpha=0^\circ$	91
Figura IV.9. La generica safe path	91
Figura IV.10. Salita iniziale	93
Figura IV.11. Una Safe Path nel piano orizzontale	93
Figura IV.12. Diagramma di manovra	94
Figura IV.13. Calcolo fattore di carico per velocità inferiori a V_{rm}	95
Figura IV.14. Diagramma di manovra: fattore di carico di virata	96
Figura IV.15. Generazione delle fly path	97
Figura IV.16. Una safe-path nel piano inclinato	98
Figura IV.17. L'angolo geometrico di salita	98
Figura IV.18. Fly Path: Priorità = Distanza	100
Figura IV.19. Quota massima della safe path	101
Figura IV.20. Il piano orizzontale alla quota massima	101
Figura IV.21. Le proiezioni dei punti della safe path	101
Figura IV.22. Piani verticali	102
Figura IV.23. L'angolo di salita geometrico	102
Figura IV.24. L'angolo di salita rapida maggiore dell'angolo geometrico	103
Figura IV.25. L'angolo di salita rapida minore dell'angolo geometrico	103
Figura IV.26. L'angolo di discesa geometrico	105
Figura IV.27. Proiezione del target sul piano orizzontale	105
Figura IV.28. L'angolo di discesa	106
Figura IV.29. Il waypoint aggiuntivo per la discesa	107
Figura IV.30. Il piano di crociera e gli spazi interdetti al volo	107
Figura IV.31. Fly Path: Priorità = Tempo	109
Figura V.1. Validazione algoritmo: l'affidabilità	113
Figura V.2. Tempi di calcolo al variare del numero di ostacoli	114
Figura V.3. Tempi di calcolo al variare della posizione	114
Figura V.4. Il livello di automazione semi-automatico: il velivolo segue la rotta(A); compare un nuovo ostacolo (B); il velivolo si accorge del nuovo ostacolo e calcola una nuova rotta che propone all'operatore (C); il velivolo assume la rotta calcolata come rotta di riferimento, se l'operatore non agisce (D).	117
Figura V.6. Risultati dei test: Modalità di interazione con lo scenario	121
Figura V.7. Risultati dei test: l' audio-feedback	122

Indice delle tabelle

Tabella I.1. Le applicazioni degli UAV	19
Tabella I.2. La classificazione degli UAV	21
Tabella II.1. I livelli di Automazione	41
Tabella III.1. Il Comando di Alto Livello	58
Tabella V.1. Ordine di sperimentazione dei LOA.....	118

Acronimi e Abbreviazioni

HCA	Human Centered Automation
LOA	Livello di Automazione (Level of Automation)
SA	Situation Awareness
UAV	Uninhabited Aerial Vehicle
MWL	Mental Workload
PWL	Physical Workload
PMW	Primary Mission Waypoint

Introduzione

Volare è sempre stata una delle massime aspirazioni dell'uomo. Le antiche cronache riferiscono dei molti tentativi falliti da parte di autentici temerari. Alcuni episodi sono leggendari, come quello di Dedalo e del figlio Icaro e delle sue ali sciolte al sole, altri sono più attendibili, come quello di Giovanni Battista Danti, che provò a volare nel 1498 lanciandosi una prima volta dalla sommità di Isola Maggiore (zona verso la punta del mulino a vento "per prendere il vento che spirava a tramontana") ed una seconda volta a Perugia quando cadde su di un tetto facendosi anche male ad una gamba. Matematico e architetto militare, il Danti, detto Dedalo, non solo teorizzò per primo che il volo senza motore doveva avvenire ad ali ferme (come sui deltaplani o sugli alianti) o per favore di vento o per corrente ascensionale, ma sempre per primo le mise in pratica. Ma le idee del Danti erano all'opposto di quelle del più famoso (allora e ben più ora) coetaneo Leonardo da Vinci che teorizzava macchine che "battevano le ali" come gli uccelli. Leonardo dedicò molto tempo allo studio del volo degli uccelli elaborando una vera e propria teoria del volo, dalla quale sviluppò i progetti delle sue macchine. Dopo Leonardo non sono riportati altri studi riguardo al volo umano degni di nota fino alla fine del diciannovesimo secolo, quando i fratelli Joseph- Michel e Jacques-Etienne Montgolfier costruirono il primo aerostato ad aria calda, altrimenti detto mongolfiera, in onore ai due fratelli. Questo vide il suo inaugurale volo pubblico ad Annonay (Francia) il 4 giugno 1783, senza il trasporto di passeggeri, seguito da un volo con passeggeri il 21 novembre dello stesso anno. L' invenzione dei fratelli Montgolfier fu il primo aeromobile¹ a permettere ad una persona "di volare". Dal volo "ad aria calda" si arriva nel 17 dicembre 1903 al primo volo con un velivolo a motore costruito dai fratelli Wright [1],[2]. Questo evento segna per sempre la storia dell'aeronautica e rappresenta l'inizio di una crescita esponenziale dell'aviazione con la realizzazione di velivoli capaci di soddisfare le più disparate esigenze sia in ambito militare sia in ambito civile: velivoli da combattimento, velivoli da ricognizione, velivoli per il trasporto passeggeri, velivoli per il trasporto merci, etc.

¹ Viene definito *aeromobile* ogni macchina costruita dall'uomo che si sostiene e si può spostare nell'aria consentendo il trasporto di persone o cose all'interno dell'atmosfera terrestre.

Durante la prima guerra mondiale si iniziò a pensare che il mezzo aereo sarebbe potuto essere pilotato da terra e avrebbe potuto volare senza equipaggio a bordo. Gli Stati Uniti iniziarono così a sperimentare i primi velivoli senza pilota a bordo. Tali velivoli sono spesso denominati UAV (Uninhabited Aerial Vehicle) e sono stati inclusi nel *Jane's All the World's Aircraft* già nel 1920 [3],[4]. Da allora si costruì una notevole quantità di UAV sperimentali, aventi diverse caratteristiche e possibilità di impiego, soprattutto a partire dagli anni '90, grazie allo sviluppo di micro- e nano-tecnologie nel campo della sensoristica e delle comunicazioni. In generale, gli UAV sono velivoli che possono essere pilotati a distanza da uno o più operatori da una stazione di controllo e trasportare fotocamere, sensori, attrezzature per le comunicazioni o altri carichi utili per effettuare missioni di sorveglianza e di ricognizione territoriale. L'assenza dell'equipaggio a bordo permette di utilizzare tali velivoli in quelle missioni definite, in gergo anglosassone, missioni-3D [5],[6]: missioni definite *dull*, cioè missioni di sorveglianza e ricognizione monotone e di lunga durata, missioni definite *dirty*, cioè missioni rischiose per la vita dei piloti, missioni definite *dangerous*, cioè missioni pericolose per l'incolumità dei piloti.

I successi registrati grazie all'utilizzo degli UAV in missioni militari, per le quali essi sono stati primariamente concepiti, in Kosovo (1999), Afghanistan (2001), and Iraq (2003) hanno aperto la strada verso il loro utilizzo anche in missioni civili normalmente riservate ai velivoli pilotati oppure addirittura non eseguibili per la loro pericolosità e impraticabilità come per esempio monitoraggio di confini estesi, ricerche scientifiche e ambientali, monitoraggio di vulcani, controllo del traffico stradale e autostradale[7].

Nonostante lo sviluppo di sistemi sempre più moderni è ancora alto il numero di incidenti² in cui gli UAV sono coinvolti. Molti report che riguardano la loro affidabilità hanno rivelato che tale numero è, in generale, diverse volte più alto di quello dei velivoli pilotati. Una tra le cause o concause principali di tali incidenti è da individuarsi nella poca attenzione posta nei confronti degli *Human Factors*³ nella progettazione degli UAV, cioè nei confronti delle componenti psico-fisiche dell'operatore che influenzano il funzionamento di tutto il sistema [7],[11]. Attualmente gli UAV sono

² Per incidente si intende un evento caratterizzato dalla perdita o dal danneggiamento del velivolo e/o da danni alle persone, coinvolte o non coinvolte nelle missioni.

³ Gli Human Factors comprendono l'applicazione delle scienze comportamentali e biologiche degli esseri umani alla progettazione di sistemi, inteso nel senso più generale possibile, che ne sfruttino le capacità e ne compensino le limitazioni[14].

progettati in modo da rendere difficili e talvolta stressanti le condizioni in cui agisce l'operatore. Le interfacce che deve utilizzare per comunicare con il velivolo, dall'interno della stazione di controllo, risultano essere spesso inefficienti, inefficaci ed inadeguate per permettergli di mantenere elevati livelli di Situation Awareness e per poter agire in maniera proattiva durante tutta la missione, perché progettate senza cercare di compensare le limitazioni derivanti dall' "isolamento sensoriale" in cui si trova l'operatore, data la separazione fisica con il velivolo. Il livello di automazione implementato, che determina le funzioni operative tra l'operatore ed il velivolo, richiede all'operatore carichi di lavoro troppo alti, quando prevede il controllo manuale del velivolo (in questo caso si parla di basso livello di automazione), oppure carichi di lavoro troppo bassi, quando prevede che il velivolo sia in grado di eseguire missioni autonomamente (in questo caso si parla di alto livello di automazione). A parte gli effetti che esso ha sulle prestazioni dell'operatore, il livello di automazione implementato, qualunque esso sia, è da tale da non permettere al velivolo di modificare autonomamente la missione. Questo, unitamente ai problemi delle interfacce, porta ad avere missioni poco flessibili, il che rappresenta un problema se si pensa che gli scenari operativi in cui i velivoli volano sono altamente complessi e dinamici ed è alta la probabilità che si verifichino eventi non previsti che potrebbero richiedere una veloce ripianificazione della missione [7]- [13].

Dall'analisi dei fattori umani coinvolti nell'utilizzo degli UAV è emerso che, se si vuole ridurre la negativa influenza che essi possono avere sul successo delle missioni e realizzare sistemi sempre più affidabili in grado di affrontare tutte le situazioni che si possono verificare durante una missione, bisogna implementare nuovi livelli di automazione e progettare interfacce uomo-macchina, o meglio uomo-velivolo, innovative. Un nuovo livello di automazione dovrà essere tale da suddividere i task operativi tra il velivolo e l'operatore in modo che a quest'ultimo vengano richiesti adeguati livelli di carico di lavoro per comandare il velivolo ed il velivolo diventi capace di modificare la missione qualora si verifichino eventi non previsti in fase di pianificazione. Le interfacce dovranno essere progettate in modo da essere usabili e supportare il livello di automazione. In questo modo si potrebbero sfruttare le caratteristiche dell'operatore di flessibilità, creatività, improvvisazione, e di *problem*

*solving*⁴, lo si inserirebbe correttamente nel processo decisionale, che si sviluppa in fase di pianificazione e di ripianificazione della missione [6] [7], garantendo così il corretto funzionamento del sistema anche in condizioni di emergenza o comunque anomale.

L'attività di ricerca presentata in questa tesi riguarda proprio il problema della sperimentazione del livello di automazione da implementare nel sistema e la progettazione di un'interfaccia uomo-macchina che possano garantire un aumento delle capacità del velivolo e prestazioni ottimali dell'operatore. Con lo scopo di sperimentare diverse modalità di interazione uomo-velivolo e studiare le prestazioni dell'operatore durante una generica missione, è stato sviluppato un simulatore prototipale di interfaccia uomo-macchina per il controllo dei velivoli senza pilota a bordo con il quale diverse tipologie di missioni possono essere simulate. Le componenti principali di tale simulatore sono un'interfaccia uomo-macchina e un blocco definito *Automazione*, comprendente un algoritmo che implementa il livello di automazione del sistema.

Il sistema di simulazione è stato realizzato seguendo un *approccio User-Centered*. Si è cercato, cioè, di realizzare un sistema in grado di compensare le limitazioni associate agli Human Factors, come lo sforzo fisico e mentale, l'attenzione, percezione e cognizione nella gestione della missione, allocazione delle funzioni tra velivolo ed operatore in modo da supportare quest'ultimo nella interazione con il velivolo e permettergli di operare con adeguati livelli di carico di lavoro ed elevati livelli di Situation Awareness.

Il livello di automazione che si è scelto di implementare nel sistema è quello concepito dalla teoria del *Supervisory Control*[14],[15],[16]. Tale teoria prevede che l'operatore invii al velivolo i comandi di alto livello, o macroistruzioni, quali missioni, obiettivi da monitorare, regole if-then, e il velivolo li comprenda e traduca in comandi di più basso livello come rotte da seguire e azioni sul sistema di controllo. Il *planning algorithm* sviluppato, l'algoritmo all'interno della componente *Automazione*, permette al velivolo di calcolare, seguendo un approccio euristico, rotte di volo 3D sicure, efficienti e compatibili con le prestazioni del velivolo. Inoltre, simulando la capacità del velivolo di "sentire" modifiche dello scenario, è stata fornita al velivolo la capacità di ripianificare la missione come conseguenza di un cambiamento dello scenario. Per

⁴ Con *Problem Solving* si intende la capacità di eseguire un'azione come soluzione ad un problema.

comprendere fin dove spingere il grado di autonomia del velivolo sono state ipotizzate tre diverse modalità di interazione operatore-velivolo, corrispondenti a diversi livelli di automazione tra quelli definiti da Sheridan [14],[17]: un basso livello (livello 1) che prevede che il velivolo informi l'operatore del cambiamento dello scenario lasciando a lui il compito di inviare il comando per la ripianificazione, un livello intermedio (livello 6) che prevede che il velivolo ripianifichi la missione e lasci all'operatore un tempo limitato per vietare la nuova rotta, un più alto livello (livello 7) che prevede che il velivolo ripianifichi la missione e assuma la nuova rotta come rotta di riferimento, senza aspettare nessuna autorizzazione dall'operazione.

L'interfaccia uomo-macchina comprende due componenti: un pannello di comando ed uno schermo "virtuale". Il pannello di comando, rappresentato da un touchscreen poggiato su un supporto di cui si può variare l'inclinazione, è il principale strumento utilizzato dall'operatore per inviare i comandi di alto livello al velivolo. Lo schermo "virtuale", definito 3D Virtual Display, fornisce all'operatore una visualizzazione stereoscopica e comprensiva di tutto lo scenario: da tale display l'operatore può avere accesso diretto, perché direttamente visibili sullo schermo, o indiretto, perché rischiamabili attraverso finestre secondarie, a tutte le informazioni necessarie durante tutta l'esecuzione della missione. Importanti caratteristiche dell'interfaccia sono comunicazioni audio che notificano all'operatore modifiche dello scenario e audio-feedback riguardanti il comando inviato e la sua esecuzione.

Infine per valutare la rispondenza del *planning algorithm* ai requisiti fissati, per valutare l'efficienza e l'efficacia dell'interfaccia nella gestione della missione e per studiare le prestazioni dell'operatore relativamente alle diverse modalità di interazione con il velivolo, tutto il simulatore è stato testato da sei allievi piloti. Il test è consistito nella supervisione della missione di un velivolo in uno scenario dinamico, modificato durante una missione dalla comparsa *random* di nuovi ostacoli. Come variabile sperimentale è stato scelto il livello di automazione in modo da valutare come esso influisca sulle prestazioni dell'operatore e, quindi, di tutto il sistema. I risultati dei test, rappresentati da dati ricavati attraverso diverse modalità di acquisizione (osservazioni, questionari, debriefing), sono stati incoraggianti. Essi hanno rivelato che il *planning algorithm* calcola rotte di volo sicure e compatibili con le prestazioni del velivolo ed è in grado di ricalcolarle nel caso di modifica dello scenario in tempi sufficientemente

brevi. L'interfaccia uomo-macchina si è dimostrata essere usabile ed un utile strumento di supporto all'operatore perchè gli permette di costruire e mantenere elevati livelli di Situation Awareness e di operare con livelli di Workload non eccessivi: cosa questa che aumenta le prestazioni di tutto il sistema UAV e quindi la probabilità che una missione abbia successo.

Nel primo capitolo verranno definiti gli UAV, se ne farà una classificazione e si evidenzieranno i vantaggi che essi hanno sia sui velivoli convenzionali (i velivoli pilotati o *manned*) sia sui satelliti.

Nel secondo capitolo si descriveranno i problemi che caratterizzano gli UAV legati agli HumanFactors: dalle interfacce uomo-macchina *mal-progettate* fino a livelli di automazione inadeguati alla complessità degli scenari operativi.

Nel terzo capitolo verrà descritto il simulatore di interfaccia uomo-macchina sviluppato durante il corso di dottorato e nel quarto capitolo verrà descritto nel dettaglio il funzionamento del *planning algorithm*.

Infine, nel quinto capitolo verranno descritti i test del simulatore e verranno presentati i risultati.

Capitolo I - Il sistema UAV

I.1 Definizioni

Gli UAV (Uninhabited Aerial Vehicle), velivoli senza equipaggio a bordo, sono definiti dal Dipartimento Americano della Difesa⁵ come velivoli aerei motorizzati che non portano un pilota umano, che usano forze aerodinamiche per creare portanza, possono volare autonomamente oppure essere pilotati in remoto, possono o meno tornare alla base di partenza, e portare carico letale (armi) o non letale (sensori, telecamere). Gli UAV non vanno confusi con i missili con sistema di guida, in quanto i primi hanno come caratteristiche fondamentali la capacità di mantenere il volo livellato per lunghi periodi di tempo rispetto ad un missile e di essere propulsi da motori a getto o a pistoni. Nemmeno i missili a lunga gittata possono essere classificati come UAV in quanto, come gli altri missili dotati di sistema di guida, la loro stessa struttura è un'arma che non può essere riutilizzata una volta lanciata. Questa specificazione che può sembrare banale, in realtà non lo è se pensiamo che i moderni UAV per applicazioni militari sono sistemi d'arma avanzati con notevoli capacità di difesa, attacco aria-aria ed attacco al suolo.

I.2 Cenni storici

Gli UAV sono stati utilizzati con compiti di *intelligence* e di ricognizione già negli anni '50. Successivamente, negli ultimi anni '60 gli Stati Uniti hanno sperimentato ed impiegato numerosi sistemi UAV con vari gradi di successo. Il primo programma significativo dell'aeronautica degli USA è stato il Ryan Model 147 "Lightning Bug",

⁵La definizione in inglese di UAV è : *the UAVS are powered, aerial vehicles that do not carry a human operator, use aerodynamic force to provide vehicle lift, can fly autonomously or by piloted remotely, can be expendable or recoverable, and carry a lethal or nonlethal payload. Ballistic or semiballistic vehicles, cruise missiles, and artillery projectiles are not considered unmanned aerial vehicles[5].*

usato in missioni di ricognizione, con circa 3.500 missioni all'attivo nella sola guerra del Vietnam.

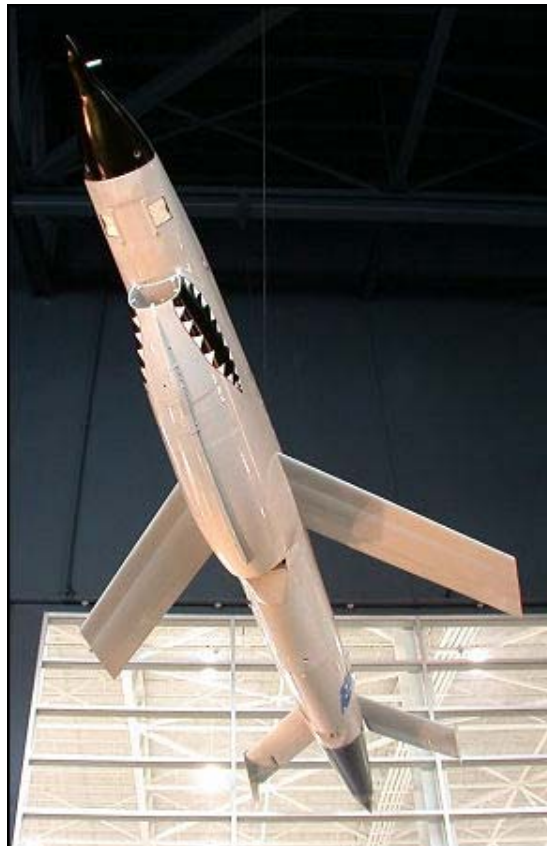


Figura I.1. Il Ryan Model 147 "Lightning Bug"

Negli anni '60 e '70 sono stati diversi gli studi per indenticare le possibili applicazioni dei sistemi UAV, ma l'alto costo di sviluppo e l'imaturità tecnologica ne hanno precluso lo sviluppo e l'operatività. Inoltre, lo sviluppo di satelliti di sorveglianza con capacità di immagini ad alta risoluzione ed invio delle stesse in tempo reale ha oscurato le piattaforme aeree (sia *manned* sia *unmanned*) per la ricognizione territoriale. Questo portò gli Stati Uniti, dopo la guerra del Vietnam, a ridurre la spesa nei progetti UAV con il risultato che, verso la fine degli anni '70 e fino all'inizio degli anni '80, non c'erano praticamente programmi attivi sugli UAV. La svolta si ebbe quando lo stato di Israele schierò con successo nel 1982 un certo numero di nuovi sistemi *unmanned* nella valle di Bekaa nel Libano: i sistemi *unmanned* vennero utilizzati per fornire informazioni per *l'intelligence*, per la sorveglianza e la ricognizione, nonchè per attivare i sistemi di difesa aerea siriani dell'aria, permettendo ai velivoli *manned* ed ai velivoli terra-terra di distruggere la difesa aerea ostile.

Dopo questo evento gli Stati Uniti iniziarono ad acquistare i sistemi *unmanned* israeliani, primo fra tutti il Pioneer, e a sviluppare nuovi sistemi, come per esempio il

“Predator RQ-1”. Tale sistema dal 1996 è sotto il controllo dell’USAF (United State Air Force) che lo ha utilizzato nei Balcani come piattaforma ISR(*Intelligence, Surveillance e Reconnaissance*)[18]. Tra il 1996 ed il 2004, il Predator RQ-1 si è poi evoluto in un UAV multimissione munito di missili aria-terra diventando un formidabile strumento di supporto al combattimento utilizzato in tutte le recenti principali operazioni militari (Kosovo, Afghanistan, Iraq). Tale versione, definita Predator MQ-1, è attualmente uno dei sistemi militari più richiesti, soprattutto nell’ambito dell’attuale guerra globale al terrorismo[6].

Parallelamente allo sviluppo del Predator sono state sviluppate ed utilizzate diverse altre piattaforme di varie dimensioni e con diversi raggi di azioni e possibili impieghi. Per esempio, il Northrop-Grumman Global Hawk RQ-4 ha volato più di 7000 ore in missioni di ricognizione dal primo volo del 1988, di cui più della metà sono state registrate durante le operazioni operative di combattimento in Afghanistan ed Iraq. In questi scenari sono stati utilizzati anche gli UAV di ridotte dimensioni, definiti mini-UAV e micro-UAV. Essi, trasportati direttamente dai soldati sul campo, sono stati impiegati in voli a bassa quota e corto raggio, risultando di grande aiuto nella ricognizione a protezione di convogli e della base, ed in missioni di *targeting* di obiettivi.

I.3 Il sistema UAV

Anche se il termine UAV significa “velivolo senza pilota a bordo” non bisogna pensare che un UAV sia solamente un velivolo, ma piuttosto sistema che non solo comprende il velivolo ma anche altre componenti non meno importanti. Le componenti principali di un UAV sono:

- L’aeromobile: è il velivolo vero e proprio inclusi i sistemi per la navigazione ed il controllo ed il payload, sensori, telecamere, sistemi per l’atterraggio. Le modalità con cui l’aeromobile può decollare o atterrare sono diverse: vi sono velivoli che sono controllati direttamente da un pilota esterno alla stazione di controllo (di cui si parlerà nel punto successivo) che comanda manualmente il velivolo in fase di decollo e atterraggio analogamente a quanto fatto dagli aeromodellisti, vi sono velivoli che per il decollo vengono lanciati da una catapulta e che atterrano autonomamente, infine vi sono velivoli che decollano e atterrano automaticamente.

Il Sistema di Terra GSS (Ground Support System): è costituito da una parte fissa UAV CC (*UAV Control Center*) e da una parte mobile MGS (*Mobile Ground Segment*) a sua volta composta da due sottosistemi: il sistema di controllo terrestre MGCS (*Mobile Ground Control Station*) ed un veicolo che trasporta tutta l'attrezzatura GV (*Ground Vehicle*). Il componente che riveste maggiore importanza è sicuramente la GCS (*Ground Control Station*): l'interfaccia all'interno di esso è la parte che mette in diretto contatto l'operatore con l'aeromobile. Essa comprende tutti gli strumenti necessari per comandare il velivolo, a seconda del livello di automazione implementato, e i display attraverso i quali gli operatori (il *vehicle operator*, che ha il comando del velivolo, ed il *payload operator*, che gestisce il payload) ricevono tutte le informazioni provenienti dai sensori e dalle telecamere di bordo riguardo lo stato del sistema (velivolo, sistemi di comunicazione) e dello scenario nel quale il velivolo vola. In Figura I.2 sono riportati l'aeromobile e l'interfaccia della stazione di controllo del UAV Predator.



Figura I.2. Il Predator: l'aeromobile e l'interfaccia della stazione di controllo

- Il data link: è il supporto per tutte le comunicazioni tra l'aeromobile ed il sistema di terra. La comunicazione può essere, a seconda della distanza tra quest'ultimo e il velivolo di due tipi: "In Line of Sight" (in linea di vista) quando il velivolo si trova ad una distanza massima di 50 km e può essere raggiunto direttamente dai segnali inviati dalla stazione di controllo, oppure "Out of Line of Sight" (fuori dalla linea di vista), per distanze maggiori, quando la stazione di controllo ed il velivolo interagiscono tramite comunicazioni satellitari.
- Il sistema di distribuzione dati: è il sistema che si occupa di distribuire le informazioni raccolte dai vari sensori di bordo del velivolo ai diversi utenti all'interno dei diversi centri di controllo.

I.4 Applicazioni e vantaggi degli UAV

Il più grande vantaggio degli UAV rispetto ai velivoli pilotati nonché la loro grande peculiarità è l'assenza del pilota a bordo del velivolo. Questa permette di utilizzarli in missioni pericolose e rischiose per l'incolumità e la vita dei piloti. Tali missioni vengono tradizionalmente definite missioni 3D: *dull, dangerous e dirty*, ovvero [6].

- *Dull*: missioni di sorveglianza e ricognizione monotone e di lunga durata, in cui l'uomo può distrarsi e lasciarsi sfuggire dettagli importanti, mentre sensori e processori, opportunamente programmati, riescono a cogliere solo i particolari di potenziale interesse.
- *Dangerous*: missioni rischiose per la vita dei piloti che richiedono ai velivoli di penetrare in area ostile.
- *Dirty*: missioni pericolose per l'incolumità dei piloti che richiedono, per esempio, ai velivoli di spingersi su aree contaminate (inquinamento nucleare, chimico, etc).

I successi militari registrati in Kosovo nel 1999, in Afghanistan nel 2001 ed in Iraq nel 2003 stanno aprendo la strada verso il loro utilizzo anche in missioni civili normalmente riservate ai velivoli pilotati oppure da essi non eseguibili per la loro pericolosità e impraticabilità [7]. In Tabella I.1 sono riportate solo alcune delle applicazioni degli UAV sia in campo militare che in campo civile [16].

Tabella I.1. Le applicazioni degli UAV

<i>Applicazioni Civili</i>	<i>Applicazioni Militari</i>
Remote Sensing	Intelligence
<ul style="list-style-type: none"> • Meteorologia • Ricerche Scientifiche • Fotografie Aeree/ Mapping • Agricoltura 	<ul style="list-style-type: none"> • Ricognizione • Ricerca e Soccorso • <i>Battle Damage Assessment (ADA)</i>
Sorveglianza	Operazioni Offensive
<ul style="list-style-type: none"> • Monitoraggio Confini Territoriali • Monitoraggio del traffico • Ricerca e Soccorso 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Suppression of Enemy Air Defenses (SEAD)</i> • <i>Close Air Support</i> • <i>Deep Strike</i>

Inoltre l'assenza del pilota a bordo ha delle conseguenze anche sulla progettazione dei velivoli. È, infatti, possibile progettare velivoli senza avere particolare riguardo nei confronti delle limitazioni fisiche tipicamente umane e di dimensioni ridotte a parità di capacità operative. È possibile progettare velivoli in cui si può imbarcare maggiore carico utile e maggiori quantità di combustibile sfruttando lo spazio ed il peso normalmente assegnato all'equipaggio a bordo di un aereo ed ai sistemi di sopravvivenza.

A parte i vantaggi sui velivoli manned, gli UAV, come piattaforme da ricognizione e sorveglianza, hanno anche dei vantaggi rispetto ai satelliti. Questi ultimi, a differenza degli UAV, hanno un elevato costo di lancio ed un elevato costo associato al riposizionamento in orbita e, in molti casi, i loro payload non possono essere cambiati durante il loro ciclo di vita. Gli UAV, invece, hanno la capacità di essere riprogrammati velocemente e di cambiare il payload in base alla missione da eseguire. Inoltre, essi possono operare più vicini alla terra rispetto a quanto fanno i satelliti e quindi possono prelevare immagini più precise a parità di sensore utilizzato. Un vantaggio significativo è la loro capacità di volare sopra una particolare zona, coprendo ed esaminando una specifica posizione per un lunghi periodi di tempo.

I.5 Classificazione degli UAV

Verso la fine degli anni '90 il Dipartimento della Difesa Americano ha catalogato gli UAV in base alle esigenze di sorveglianza e ricognizione e in base al raggio di azione. In particolare, vi è la categoria degli UAV tattici, a breve raggio (50 chilometri di azione) e a corto raggio (200 chilometri di azione), e quella degli UAV *Endurance* con un raggio di azione maggiore dei 200 chilometri. Inoltre, vi è un'ulteriore categoria, ancora in fase di sviluppo, costituita dagli UAV da combattimento (combat UAV oUCAV).

Sinteticamente la classificazione può essere stabilita in base ad una serie di parametri primari (dimensioni, quota operativa, autonomia e range della missione) come in Tabella I.2 [6].

Tabella I.2. La classificazione degli UAV

	Tipologia di UAV	Quota Operativa	Autonomia/range
endurance	HALE	> 45000 ft	> 24 hrs / >200 km
	MALE	> 15000 ft e < 45000 ft	> 24 hrs / >200 km
tattici	TUAV	<15000 ft	>5-10 hrs / > 50km e < 200 km
	Mini UAV	< 1500 ft	1-5 hrs / 10 km
	Micro UAV	<500 ft	1-2 hrs / 5-10 km

I.5.1 Gli UAV Endurance

La categoria Endurance è suddivisa in sistemi a lungo raggio ed alta quota (HALE, High Altitude Long Endurance) ed in sistemi a lungo raggio e quota intermedia (MALE, Medium Altitude Long Endurance).

I.5.1.1 Gli UAV “Hale”

Gli UAV Hale sono, tra gli UAV, quelli più grandi. Essi vengono usati in missioni di sorveglianza e di ricognizione, hanno raggi di azione fino a 3000 miglia, un'autonomia superiore anche a 24 ore ed una quota che può arrivare a 65000 piedi. Tale quota permette al velivolo di volare al di sopra di qualsiasi condizione atmosferica e, usando sensori multispettrali, quali EO, IR e SAR, di penetrare le nubi, la polvere o l'oscurità notturna. Essi vengono utilizzati in missioni di sorveglianza e ricognizione, effettuando missioni simili ai satelliti a bassa orbita (Low Earth Orbit). Tra i velivoli HALE vi è il già citato Northrop-Grumman Global Hawk (Figura I.3), che può portare sensori elettro-ottici o infrarossi e radar ad apertura sintetica (SAR) e viene utilizzato per missioni di sorveglianza e di ricognizione di aree molto grandi (anche 40000 nm² in un giorno).



Figura I.3. Il Global Hawk

1.5.1.2 Gli UAV “Male”

Gli UAV Male operano a quote attorno ai 15-25000 piedi, in missioni a lunga durata, oltre le 24 ore, ed utilizzano sensori multipli per una singola missione. Poiché operano a quota più basse rispetto a quelle a cui volano i velivoli Hale e sono impiegati in una specifica regione, che può essere il teatro di operazioni militari, tali velivoli trasmettono, in tempo reale, immagini degli obiettivi più dettagliate e devono essere più reattivi e pronti ad un rapido retasking(riplanificazione), cambiando traiettorie e piani di volo in base alle necessità. Alcuni tra i velivoli Male sono il Predator e l’Hunter. Il Predator viene utilizzato per missioni di sorveglianza e di ricognizione e, recentemente, anche in missioni militari offensive. L’Hunter viene utilizzato in missione di ricognizione e sorveglianza aerea, in missioni di acquisizione di target e di osservazione del campo di battaglia.

In Figura I.4 sono riportati l’aeromobile e l’interfaccia della stazione di controllo del sistema Hunter.



Figura I.4. L’Hunter :l’aeromobile e l’interfaccia della stazione di controllo

I.5.2 Gli UAV Tattici

Gli UAV tattici comprendono i velivoli a breve raggio, cui si affiancano UAV di piccole dimensioni (o mini-UAV e micro-UAV, MAV), che vengono direttamente impiegati dagli operatori sul campo delle operazioni.

I velivoli tattici sono velivoli concepiti per operare a stretto contatto con le truppe terrestri nello scenario operativo, volano a bassa quota fino ad un massimo di 15000 piedi e nel range di 75-100 NM. La durata della singola missione è relativamente breve, intorno alle 7-20 ore. Essi possono imbarcare sia sensori a basso costo soltanto diurni o notturni, ma anche sensori elettro/ottici ed infrarossi (EO/IR) che gli conferiscono maggiore flessibilità.

Uno dei problemi maggiori degli UAV tattici ed a breve raggio sono le condizioni meteorologiche: essi hanno bisogno di condizioni relativamente calme per il lancio/decollo o l'atterraggio/ recupero, essendo molto sensibili alla turbolenza. Un ulteriore problema risiede nel limitato campo di visibilità tipico del carico utili EO/IR: gli operatori, per mantenere alta la consapevolezza della situazione attorno al velivolo, devono ingrandire e restringere le immagini fra campi di visibilità stretti e larghi, rischiando di perdere dettagli importanti o perdere la tracciabilità di obiettivi in movimento.

Un velivolo tattico molto conosciuto è il Pioneer: in Figura I.5 sono riportati l'aeromobile e l'interfaccia della stazione di controllo.

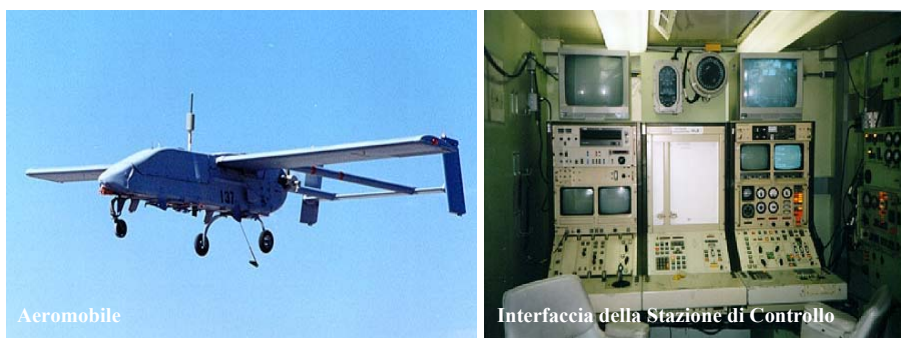


Figura I.5. Il Pioneer: l'aeromobile e l'interfaccia della stazione di controllo

I.5.2.1 I mini/micro UAV (MAV)

I mini-UAV sono stati sviluppati per eseguire missioni di ricognizione a cortissimo raggio definite “*over the hill (oltre la collina)*” e “*around the corner (dietro l'angolo)*”, al fine di fornire informazioni utili riguardo postazioni nemiche e proteggere così le truppe sul campo. Essi possono variare da sistemi *backpackable* (ovvero trasportabili in appositi zaini) a micro-UAV dalle dimensioni di insetti, e a seconda

delle dimensioni e della tipologia, possono essere lanciati a mano, essere sganciati da UAV più grandi (Hale o Male UAV) o addirittura essere espulsi da proiettili di mortaio o d'artiglieria, come sensori consumabili. Alcuni modelli di MAV oggi impiegati sono il "Bird-Eye 500" della IAI, lo "ScanEagle" della Boeing, lo "Skylark" della Elbit Systems, oppure il "Dragon Eyes" della Aero Vironment (Figura I.6).



Figura I.6. I micro UAV

I.6 Attività di ricerca e sviluppi futuri

L'interesse nei confronti degli UAV è enormemente cresciuto negli ultimi venti anni ed un enorme impulso è stato dato dalle modifiche necessarie alle strategie di combattimento richieste dalla nuova guerra al terrorismo. Le potenzialità dei sistemi UAV ed i progressi fatti nel campo delle micro e nano-tecnologie hanno spinto e stanno spingendo sia le industrie sia le università a sviluppare numerosi sistemi UAV, spesso richiesti dai governi di diversi paesi per poterli utilizzare sia come strumento bellico sia come velivoli civili. Sono molti i paesi, europei (Francia, Germania, Gran Bretagna, Israele) e non (Stati Uniti, India, Cina) che stanno portando avanti progetti per la realizzazione di piattaforme UAV sempre più moderne, affidabili e in grado di essere utilizzate in un ampio spettro di missioni [19].

L'Italia è in prima linea nella ricerca, nello sviluppo e nell'utilizzo di nuove piattaforme UAV. In ambito militare l'Italia è uno dei pochi paesi ad avere utilizzato piattaforme UAV in azioni belliche. Nel 2002, infatti, ha avviato un programma per l'acquisizione di cinque Predator utilizzati, alla fine del 2004, con soddisfacenti riscontri operativi nel teatro iracheno nell'ambito dell'Operazione OIF (Operation Iraqi

Freedom). In ambito industriale esempi di piattaforme UAV sviluppate sono il Falco della Galileo Avionica e lo Sky-X di Alenia Aeronautica (Figura I.7). L'industria italiana, oltre che avere dei progetti propri, è inserita anche in progetti europei come il progetto europeo nEUROn⁶ che ha come obiettivo di costruire e portare sul campo unUCAV stealth entro il 2012.



Figura I.7. L'aeromobile del Falco e dello Sky-X

In ambito accademico l'ultimo convegno dell' AIDAA (Associazione Italiana di Aeronautica ed Astronautica) tenutosi a Forlì nel settembre del 2007 ha dimostrato come ormai in tutte le facoltà di Ingegneria Aerospaziale siano attivi gruppi di ricerca che affrontano le problematiche più disparate nel campo degli UAV: meccanica del volo, la stabilità del velivolo e la sua capacità di reagire a cambiamenti improvvisi dello scenario operativo, strutture, comunicazioni tra il velivolo e la stazione di controllo, motori, interfaccia uomo-macchina, riconoscimento target, analisi delle informazioni provenienti dai sensori di bordo.

I.6.1 L'inserimento degli UAV nel traffico civile

Attualmente una delle grandi difficoltà per l'utilizzo degli UAV è loro incapacità di riconoscere lo scenario in cui stanno volando ed eventualmente apportare modifiche alla missione come reazione a qualcosa di non previsto, cosa che ne preclude l'inserimento nel traffico aereo sia militare che civile. Molti studi sono indirizzati all'introduzione dei sistemi UAV all'interno dello spazio aereo, si sta studiando cioè la possibilità di fornire gli UAV di capacità "sense and avoid (SAA)". Con la definizione "Sense and Avoid" si identificano una serie di strumenti tecnologici concepiti per gli UAV, per consentire a questi di evitare ("Avoid") in modo autonomo possibili collisioni con altri velivoli, per mezzo di opportuni sensori ("Sense") ed impianti di bordo. Essi

⁶ Il programma nEUROn partito nel 2006, è un programma europeo tra Italia (con Alenia Aeronautica), Svezia, Spagna, Grecia, Svizzera e Francia, per lo sviluppo comune di un dimostratore stealthUCAV. Tra gli obiettivi del programma c'è anche quello di sviluppare e rinforzare la capacità delle industrie partecipanti nel campo dei velivoli da combattimento con capacità stealth sia manned, sia unmanned. Il programma ha una durata prevista di 6 anni, ovvero fino al 2012, e consta di 4 fasi (fattibilità, definizione, sviluppo e test), alla fine dei quali il dimostratore effettuerà dei test in Francia (Istres), Svezia (Vidsel) e Italia (Sardegna) [6].

corrispondono alle tecnologie “See and Avoid” utilizzate sugli aeromobili manned, dove il pilota, parte integrante ed essenziale del sistema, può vedere gli altri velivoli in modo diretto o indiretto tramite opportuni strumenti (“See”) ed evitarne l’impatto (“Avoid”).

Recentemente, varie organizzazioni, tra cui l’Agenzia Europea della Difesa (EDA), hanno promosso o sono state coinvolte nella definizione dei requisiti delle tecnologie “Sense and Avoid” e degli standard per i sistemi unmanned per operare in spazi aerei civili e limitati. Questi requisiti e standard, una volta stabiliti, permetteranno agli operatori e gestori degli UAV di sviluppare sistemi SAA, non solo per evitare collisioni, ma per consentire un agevole controllo del traffico aereo, sia in volo, sia a terra [6].

Capitolo II - L'interfaccia uomo-macchina per il controllo remoto nel sistema UAV

II.1 Introduzione

Il successo di una missione eseguita da un velivolo senza pilota a bordo può essere misurato utilizzando due parametri: (1) completamento della missione: tutti gli obiettivi della missione (esempio: navigazione, raggiungimento di un punto, riconoscimento di un target, monitoraggio di una vasta area) sono soddisfatti; e (2) *safety*: non si verifica nessun danno né al velivolo né agli essere umani, implicati o meno nella missione. Un fattore determinante per il successo di una missione è l'automazione implementata nel sistema ed il suo grado di affidabilità, cioè la sua capacità di “funzionare” come progettata. In generale per automazione si intende l'esecuzione da parte di una macchina di una funzione che era stata precedentemente svolta dall'uomo. Per i velivoli senza pilota a bordo, proprio per la loro natura, le funzioni che vengono automatizzate sono quelle relative al controllo diretto del velivolo e all'esecuzione di particolari operazioni come il riconoscimento di target [7].

Oltre che l'automazione, determinante per il successo della missione deve essere considerato anche il ruolo dell'operatore umano, che si trova all'interno della stazione di controllo. L'operatore, anche se separato fisicamente dal velivolo, ha un importante ruolo sia nella pianificazione della missione sia durante la sua esecuzione, perché deve comandare e controllare il velivolo, analizzare le informazioni provenienti dai sensori di bordo, accettarsi che l'automazione implementata “funzioni” e, nel caso essa non funzioni, intervenire. Purtroppo, però, nella progettazione degli UAV gli sforzi maggiori sono stati concentrati sulla tecnologia da sviluppare, interessandosi solo marginalmente alla presenza dell'uomo e, quindi, alle sue componenti psico-fisiche che ne determinano il *modus operandi* e che influenzano il funzionamento di tutto il sistema. Questo ha portato, come diverse ricerche hanno rivelato, ad un elevato numero di incidenti aventi come causa primaria o secondaria (quando l'operatore non riesce a

“riparare” a fallimenti dell’automazione) l’errore umano: a seconda dei diversi UAV, la percentuale di incidenti, tra quelli analizzati, dovuti agli *Human Factors* va dal 21% al 68%[7],[8]. In Figura II.1. si riportano i risultati di tali ricerche. Come si vede dalla figura, altre cause di incidenti sono: 1) errori degli addetti alla manutenzione, nella categoria definita *Maintenance*, 2) il malfunzionamento del velivolo, nella categoria *Aircraft*, 3) altre cause non ben identificate, nella categoria *Other*. La categoria *Maintenance* è stata separata da quella degli *Human Factors* sia per l’importanza della manutenzione stessa sia perché questa non coinvolge membri dell’equipaggio.

È chiaro che i confini tra una categoria di incidente ed un’altra sono molto sottili. Di solito la causa di un incidente o di una situazione di rischio non è unica, ma è il concatenarsi di una serie di fattori, che isolatamente non avrebbero prodotto l’incidente, a determinare l’evento. Uno stesso incidente può infatti appartenere alla categoria *Aircraft* e *Human Factors*: un guasto meccanico del velivolo appartiene prima di tutto alla categoria *Aircraft*, ma se viene seguito da un’inappropriata o inadeguata indicazione sul display, non permettendo così all’operatore di comprendere lo stato alterato del velivolo e quindi di reagire, rientra anche nella categoria *Human Factors*.

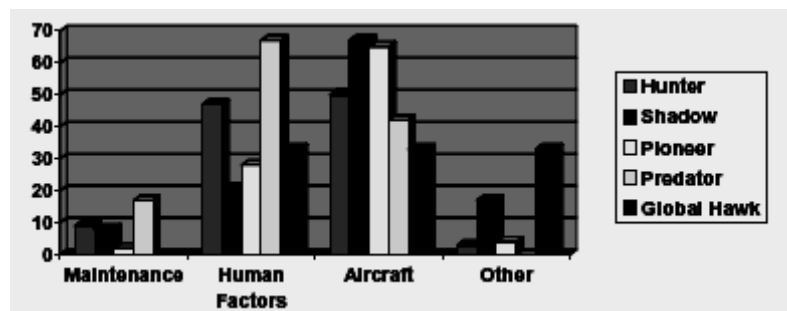


Figura II.1. Summary accident percentages across aircraft system

Il presente capitolo riguarda i problemi che affliggono gli UAV. Dopo un elenco degli *Human Factors* negli UAV e la descrizione di cosa sono la *Situation Awareness* (SA) e il *Mental Workload* (MWL), i cui valori possono o meno determinare l’errore umano, vengono illustrati i problemi derivanti dalle interfacce e dal livello di automazione implementati negli UAV attualmente in uso e come questi influiscono sui livelli di SA e di WL.

II.2 Gli Human Factors negli UAVs

Gli *Human Factors* coinvolti nell'utilizzo degli UAV sono differenti e, spesso, anche più *challenging*⁹ rispetto a quelli coinvolti nell'utilizzo dei velivoli pilotati a causa della separazione fisica tra il velivolo ed il pilota. Diversi fattori umani sono stati identificati come fattori rilevanti nelle operazioni degli UAV [16].

- *Livello di automazione/allocazione delle funzioni*: relativo alle funzioni operative che vengono assegnate al velivolo e all'operatore.
- *Isolamento sensoriale*: relativo alla conoscenza, da parte dell'operatore, dello stato del velivolo e dello scenario in cui esso vola solo attraverso i sensori di bordo del velivolo.
- *Larghezza di Banda/Latenza*: relativa al ritardo nella comunicazione tra operatore e velivolo che può variare in ogni condizione di tempo e in ogni tipo di missione (*in line of sight* o *out line of sight*).
- *Saturazione di informazione/noia*: relativa alla quantità di informazioni che riceve l'operatore; poche informazioni possono sfociare nella "noia" dell'operatore, troppe informazioni possono portare alla sua "saturazione", rendendolo incapace di trovare le informazioni di cui ha bisogno.
- *Malattia da simulazione*: relativo ai problemi di nausea che può avere l'operatore quando c'è un conflitto tra il moto percepito dalla vista e quello percepito da altri sensi, come quello propriocettivo.
- *Disorientamento spaziale*: relativo ad incomprensioni, da parte dell'operatore, dell'assetto, del moto e della posizione del velivolo rispetto al terreno.

Dall'elenco precedente deriva che l'influenza che gli Human Factors hanno sulle prestazioni dell'operatore e, quindi, su tutto il sistema dipende essenzialmente dall'interfaccia uomo-macchina, che l'operatore utilizza per comunicare con il velivolo, e dal livello di automazione implementato nel sistema, che determina i compiti dell'operatore e del velivolo sia in fase di pianificazione che di esecuzione della missione. È da questi due importanti elementi chiave che dipendono i valori di due importanti costrutti, quali la Situazione di Consapevolezza o *Situation Awareness* (SA),

⁹ Termine inglese non facilmente traducibile in italiano. Nel caso specifico viene usato come aggettivo relativo agli Human Factors coinvolti nell'utilizzo degli UAV per indicare che questi richiedono molti sforzi per essere studiati, ma proprio per questo risultano essere stimolanti.

e il carico di lavoro mentale, o *Mental Workload* (MWL). Tali costrutti sono importanti non solo nel campo degli UAV ma più in generale quando vi è interazione tra un uomo ed un sistema automatizzato perché spesso da essi dipende l'errore umano. Dall'analisi degli incidenti degli UAV risulta che tale errore è dovuto a bassi livelli di SA oppure ad alti o bassi livelli di WL [7]-[14].

II.2.1 Situation Awareness

Il concetto di Situation Awareness (SA), originariamente utilizzato in campo aeronautico, attualmente viene utilizzato in tutti quei campi in cui gli individui operano in sistemi complessi e dinamici, come sistemi nucleari, il controllo del traffico aereo, automobili, sistemi controllati a distanza. Quando gli individui operano in tali sistemi la SA è indispensabile per rilevare i cambiamenti del sistema e reagire prontamente ad essi.

La definizione più diffusa di SA viene data da Endsley [21], che la definisce come:

1. la percezione di elementi presenti nell'ambiente in una determinata misura di spazio e di tempo,
2. la comprensione del loro significato,
3. la proiezione del loro stato nel breve futuro.

Dunque la SA coinvolge la percezione di fattori critici nell'ambiente (1° livello), la comprensione di che cosa questi fattori significano, particolarmente quando sono integrati insieme in relazione agli obiettivi degli individui (2° livello), e, a più alti livelli, la previsione di cosa potrebbe succedere al sistema nell'immediato (livello 3).



Figura II.2. La Situation Awareness

Per esempio, in un ambiente in cui vola un velivolo, il pilota, per avere un buon livello 1° di SA, deve essere in grado di riconoscere il valore dei parametri di volo critici, dello stato dei sistemi di bordo, della posizione del velivolo rispetto all'ambiente circostante e rispetto ad eventuali altri aerei. Per avere un buon livello 2°, dovrà interpretare le informazioni che gli arrivano e comprendere le relazioni che tra esse

intercorrono: per esempio, il pilota deve comprendere se i dati indicano che il velivolo è vicino al punto di stallo, oppure se l'altitudine rappresentata è sotto quella che ha assegnato al velivolo. A più alti livelli, al livello 3, la comprensione dello stato del sistema e della sua dinamica può permettere al pilota di essere capace di predire lo stato del velivolo negli istanti successivi. In questo modo, in uno scenario bellico, un pilota potrà capire come attaccherà un gruppo di aerei nemici che volano in una particolare formazione e, quindi, eseguire l'azione conforme con l'obiettivo di non farsi abbattere [21].

L'importanza della SA non risiede tanto nel fatto che può essere utile per comprendere e descrivere la qualità delle prestazioni di routine di un individuo, ma piuttosto, dal momento che da essa dipende il processo di *decision making*¹⁰, per comprendere la reazione appropriata e tempestiva ad eventi improvvisi [20]: in base alla conoscenza e comprensione di cosa sta accadendo, l'individuo decide, in un intervallo di tempo più o meno breve, quale azione, tra diverse alternative, eseguire per rispondere efficacemente all'evento. Questo è particolarmente importante nel campo degli UAV. Data la separazione fisica tra l'operatore ed il velivolo, diventa indispensabile fornire all'operatore gli strumenti necessari che lo aiutino nella percezione e comprensione di cosa sta succedendo in aria (livello 1 e livello 2) e nella proiezione futura dello stato del sistema e dell'ambiente (livello 3) in modo da facilitare il processo di *decision making* e da permettergli di prendere la decisione più appropriata alla particolare situazione.

II.2.2 Mental Workload

Il carico di lavoro mentale o *mental workload* è tra i più importanti fattori che contribuiscono a determinare la prestazione di un individuo nell'interazione con un sistema (inteso nel senso più generale possibile). Esso rappresenta un costrutto che viene invocato per spiegare quando e perché, nonostante le abilità mostrate dall'individuo, a volte la sua prestazione è scadente. Questo può avvenire per esempio quando gli si richiede di effettuare lo stesso compito in un lungo intervallo di tempo oppure in condizioni di stress (esempio: rumore nell'ambiente di lavoro). La spiegazione che viene data di questo fenomeno è che gli esseri umani, intesi come insieme di corpo e mente, possiedono risorse limitate per l'esecuzione di un compito e

¹⁰ Il processo di *decision making* riguarda la scelta, in un determinato intervallo, di un'azione tra diverse alternative possibili in base alle informazioni disponibili.

che diversi compiti richiedono differenti quantità e differenti tipi di risorse [17],[20],[22].

Intuitivamente si potrebbe dire che un elevato MWL si ha quando, nell'esecuzione di un compito, un individuo sente di trovarsi in uno stato di “sforzo cognitivo¹¹”, che tipicamente genera una vera e propria “fatica mentale”: l'individuo avverte quindi di essere sottoposto ad un carico eccessivo, rispetto alle proprie risorse, dal compito che sta eseguendo. Al di là della definizione intuitiva di MWL, che tenta di spiegare il fenomeno invocandone solo l'effetto, cioè la riduzione della capacità di continuare ad esercitare un controllo sull'esecuzione di un compito, e non fornisce informazioni utili per misurarlo e, quindi, quantificarlo, in letteratura si trovano almeno quattro modi per intenderlo. Il MWL può essere definito in funzione di uno dei seguenti fattori, a seconda del fenomeno che si sta considerando[17]:

- *richieste imposte dal compito*: se la difficoltà, il numero, la frequenza, o la complessità delle richieste aumentano, si assume un aumento del carico di lavoro;
- *livello di prestazione che l'operatore riesce a raggiungere*: se gli errori aumentano, oppure diminuisce la precisione del controllo esercitato, si assume un aumento del carico di lavoro;
- *sforzo esercitato dall'operatore per eseguire il compito*: il carico di lavoro rifletterebbe, in questo caso, la risposta dell'operatore al compito, piuttosto che le richieste imposte;
- *percezioni dell'operatore*: se un operatore si sente sotto sforzo e sovraccaricato, il carico di lavoro può aumentare anche se le richieste non sono cambiate.

La complessità del costrutto non permette di privilegiare un fattore a scapito di un altro, ma piuttosto porta ad assegnare al MWL una natura multidimensionale, ben rappresentata da tutti i fattori sopra elencati.

Proprio per la natura complessa del MWL e gli effetti che esso ha sulle prestazioni di un individuo, nella progettazione di un sistema automatizzato, quale è l'UAV, bisogna stabilire che livello di MWL allocare all'uomo e, quindi, decidere fin dove spingere l'automazione del sistema. Dalle definizioni sopra elencate sembrerebbe che l'obiettivo debba essere quello di avere bassi livelli di MWL, in modo da non affaticare

¹¹ Il termine cognitivo si riferisce alla capacità dell'essere umano di percepire, comprendere, riconoscere e ricordare informazioni.

eccessivamente l'uomo, ma in realtà il carico di lavoro rappresenta un problema non solo quando è troppo elevato, ma anche quando è troppo basso. Decrementi delle prestazioni di un individuo possono registrarsi in entrambi i casi. Quando il MWL è elevato si parla d' *intensità eccessiva* del carico che, in presenza di pressione temporale e/o complessità (*sovraccarico*), genera fatica mentale con effetti negativi sulle prestazioni di un individuo che diventa incapace di far fronte alle richieste del sistema. Quando il MWL è basso si parla di *sottocarico*, legato a compiti banali e/o ripetitivi che portano sia ad un livello ancora maggiore di fatica mentale, dovuta alla carenza di stimoli, sia a stati assimilabili alla fatica come monotonia, ridotta vigilanza (molto rischiosa nei compiti di controllo) e saturazione mentale che portano inevitabilmente ad un abbassamento del livello di SA [14], [17], [20],[21], [23].

Molte ricerche concordano che il livello "ottimo" di workload deve trovarsi tra i questi due estremi. Ottimizzare l'allocatione del carico di lavoro mentale può ridurre l'errore umano e aumentare la sicurezza, la produttività e la soddisfazione di un individuo che utilizza un sistema per il raggiungimento di un obiettivo[12],[14],[15],[16],[17],[21].

II.3 L' interfaccia uomo-macchina

L'interfaccia uomo-macchina, o meglio nel nostro caso l'interfaccia uomo-velivolo, rappresenta il portale tra l'uomo e il velivolo: è lo strumento attraverso il quale l'operatore umano e il velivolo comunicano, scambiandosi informazioni, durante tutto l'arco della missione (Figura II.3). Lo scambio di informazioni tra l'operatore e il velivolo può avvenire con diverse modalità, determinate principalmente da due fattori:

- i canali sensoriali per mezzo dei quali l'operatore può ricevere informazioni e produrre azioni;
- i dispositivi fisici di ingresso ("*input device*"), utilizzati dall'operatore per inviare i comandi per il raggiungimento di determinati obiettivi (esempio: raggiungimento di un punto) e di uscita ("*output device*"), utilizzati dall'operatore per comprendere l'esito dei comandi inviati ed avere informazioni riguardanti lo stato del velivolo e dello scenario.

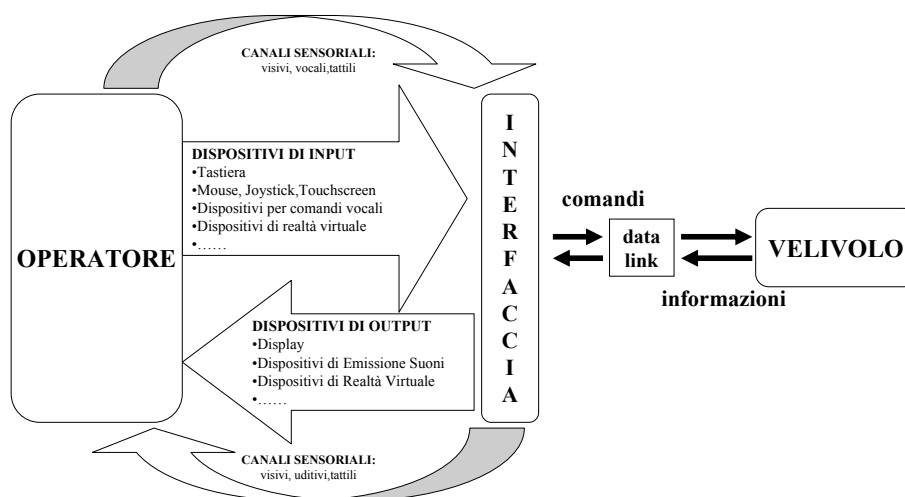


Figura II.3. La comunicazione tra l'operatore e il velivolo

Il ruolo che l'interfaccia svolge all'interno del sistema UAV è fondamentale per il successo di una missione. Dalla sua architettura hardware/software, e quindi dal tipo, posizione e dimensione degli *input device* (tastiere, mouse, joystick, etc) e degli *output device* (display, segnali acustici, etc.) e dalla qualità, dalla quantità e dalle modalità con cui presenta le informazioni, dipendono le prestazioni dell'operatore e la comunicazione tra quest'ultimo ed il velivolo. Tale ruolo diventa ancora più critico se si pensa che l'interfaccia è l'unico punto di "contatto" tra l'operatore umano ed il velivolo. Per questo motivo essa dovrebbe annullare o per lo meno compensare le limitazioni derivanti dalla loro separazione fisica. Tali limitazioni vanno dalla perdita di canali sensoriali, che ha come naturale conseguenza la difficoltà di avere una visione completa dell'ambiente circostante il velivolo, al ritardo della comunicazione e del controllo del velivolo, che inevitabilmente influiscono negativamente sul funzionamento corretto di tutto il sistema.

II.3.1 Aspetti negativi delle interfacce uomo-macchine degli odierni UAV

Nonostante l'importanza dell'interfaccia nei sistemi UAV, è stato dimostrato che essa è il loro "punto debole" [7]: i numerosi errori compiuti dagli operatori, con conseguenze più o meno gravi, sono dovuti proprio all'interfaccia. In Figura II.4 si riportano le interfacce di tre degli UAV più utilizzati: il Predator, l'Hunter ed il Pioneer.



Figura II.4. Il layout delle interfacce del Predator, del Hunter e del Pioneer

Le interfacce degli UAV, primi fra tutti il Predator, sono caratterizzate da quello che può essere definito *User-Oriented Gap*. Esse risultano essere *mal-progettate*, cioè progettate senza tener conto dell'operatore, delle sue peculiarità fisiche e cognitive e delle sue esigenze [7]. Tali esigenze vanno dalla necessità di ricevere tutte le informazioni provenienti dal velivolo, in maniera chiara ed immediata, cioè senza ritardi, per comprendere lo stato del velivolo e quello dello scenario in cui esso vola, alla necessità di avere strumenti che gli permettano di inviare i comandi in breve tempo e senza elevati sforzi fisici e cognitivi.

Sono molte le situazioni in cui l'operatore, dal momento che usa interfacce che non tengono conto del suo isolamento sensoriale, cioè della perdita di tutti quei canali sensoriali (visivo, uditivo, cinestetico/vestibolare), di cui è invece provvisto il pilota dei velivoli convenzionali, non ha a disposizione o ha difficile accesso a tutte le informazioni necessarie per avere elevati livelli di *situation awareness*. In alcuni casi viene presentata una grande quantità di informazioni tra le quali è difficile selezionare quelle di cui si ha bisogno (si parla, in questo caso, di "saturazione cognitiva" dell'operatore). In altri casi informazioni "riguardanti uno stesso problema" sono rappresentate su diversi display, costringendo l'operatore ad "integrarle" mentalmente e a muovere molto spesso la testa con un conseguente elevato sforzo cognitivo e fisico. In altri casi ancora, la diffusa mancanza di feedback non permette all'operatore di comprendere se il comando è stato ricevuto dal velivolo, se l'azione da questo intrapresa è corretta o se si stanno verificando dei problemi, come malfunzionamenti, allontanamento dalla rotta, cambiamenti dello scenario [7], [8], [9], [10], [11]. Per esempio, un pilota di un velivolo convenzionale si accorge facilmente, grazie al fatto di essere sul velivolo, se vi sono problemi ad un motore e può reagire immediatamente, mentre l'operatore di un Predator può rendersi conto del malfunzionamento solo accedendo a specifici menu dell'interfaccia, non avendo segnali visivi e sonori che richiamino la sua attenzione.

Un ulteriore problema che affligge le interfacce è legato al disorientamento spaziale. Poiché il sistema visivo è il principale responsabile dell'orientamento di un individuo e poiché spesso le interfacce non forniscono un'accurata rappresentazione dello stato del velivolo, l'operatore è incapace di percepirne in modo corretto l'assetto e la posizione rispetto all'ambiente. Questo è risultato, in alcune missioni, in comandi inappropriati al particolare momento che hanno portato ad incidenti [7].

I problemi sopra elencati vengono poi aggravati dalla qualità delle informazioni, che viene compromessa dalla degradazione del data link, dalla larghezza di banda e dalle condizioni atmosferiche, e dal ristretto campo di vista coperto dalle informazioni provenienti dal velivolo, che consistono essenzialmente in immagini visive. Come riconosciuto dal primo pilota di Predator, il ristretto campo di vista che l'operatore ha dell'ambiente intorno al velivolo (30 gradi nella direzione di avanzamento del velivolo), porta, per esempio, a problemi nella fase di atterraggio: non avendo la visuale periferica intorno al velivolo, che invece hanno i piloti, l'operatore di UAV lo controlla affidandosi solo a ciò che vede dalla telecamera di bordo e, quindi, "spera per il meglio" fino a quando il velivolo non tocca il terreno. Questo ha contribuito ad aumentare il numero di incidenti del Predator dovuti all'errore umano [7].

Gli aspetti negativi delle interfacce non sono legati solo alla loro componente software ma anche alla loro componente hardware. Le analisi dimostrano come esse siano state talvolta progettate senza tener conto delle limitazioni antropometriche dell'operatore. Un esempio di interfaccia uomo-macchina che presenta problemi ergonomici¹² è quella del Predator, riportata in Figura II.5. Come si può vedere l'operatore tiene i joysticks, progettati per essere tenuti con tutta la mano, solo con il pollice e l'indice. Questo perché tenerli con tutta la mano, data la loro posizione rispetto alla mano stessa, richiederebbe un elevato sforzo fisico. Un'ulteriore problema di un'interfaccia di questo tipo è la vicinanza sulla tastiera dei pulsanti di attivazione di comandi diversi. Per esempio, nel caso del Predator, i pulsanti che accendono o spengono le luci sono adiacenti a quelli che spengono il motore. Questo, se l'operatore

¹² Ergonomico deriva dal termine "ergonomia". In maniera del tutto generale possiamo definire l'ergonomia (dal greco *ergo*, "lavoro", e *nomos*, "regola") come un sinonimo di Human Factors. Volendo restringere la definizione ad un campo più specifico si potrebbe dire che l'ergonomia è associata a quegli aspetti degli Human Factors che riguardano l'antropometria, biomeccanica, la cinematica del corpo applicati al progetto di artefatti o workspace [14].

non presta la dovuta attenzione nel premere i pulsanti opportuni, potrebbe anche portare ad errori e quindi ad incidenti [7],[8].



Figura II.5. L'interfaccia del Predator

Dalla descrizione delle caratteristiche delle interfacce si può facilmente comprendere come l'operatore operi talvolta in condizioni di stress ed in condizioni di elevati workload. Per l'operatore risulta difficile percepire tutte le informazioni provenienti dai sensori di bordo del velivolo, comprendere, in base ad esse, quale sia lo stato del velivolo e quello dell'ambiente, prevedere rispettivamente eventuali malfunzionamenti o cambiamenti, confrontare gli effetti di una sua azione piuttosto che di un'altra, ed infine eseguire l'azione più adeguata alla particolare situazione.

Un esempio di come l'errore umano, dovuto all'interfaccia, possa essere la concausa di un incidente è fornito da quanto successo il 4 novembre 2000 ad un velivolo VTUAV (Vertical Take-off Unmanned Aerial Vehicle) chiamato Fire Scout (Figura II.6). A causa del danneggiamento delle antenne venne emesso un segnale incorretto che portò il radar-altimetro a indicare un'altezza di 2 piedi del velivolo, quando invece questo si trovava in hovering¹³ ad una quota di 500 piedi. L'operatore, non avendo altro modo di conoscere lo stato del velivolo che dai sensori di bordo, credendo che la quota segnalata fosse quella reale, inviò al velivolo il comando di atterrare. A questo punto il velivolo scese di 2 piedi arrivando ad una quota di 498 piedi e il sistema di guida e controllo, interpretando l'abbassamento di quota come indicazione dell'atterraggio, spense i motori,

¹³ L'hovering, manovra caratteristica dei velivoli ad ala rotante, consiste nel "volo" del velivolo sempre nello stesso punto: il movimento delle pale e la forza propulsiva sviluppano forze che permettono al velivolo di rimanere in volo in un punto fisso.

agendo così come “da programma”. Il velivolo, quindi, non avendo più forza propulsiva precipitò.



Figura II.6. Il Fire Scout

II.4 L'automazione

Il livello di automazione implementato nei sistemi UAV è un secondo elemento fondamentale da tener conto per ridurre gli effetti degli Human Factors sulle prestazioni di tutto il sistema. Esso determina l'allocazione delle funzioni tra l'operatore ed il velivolo e, quindi, stabilisce il grado di autonomia del velivolo ed il ruolo dell'operatore. Il livello di automazione determina quindi il corretto inserimento dell'operatore nel processo decisionale che si sviluppa in fase di pianificazione e ripianificazione della missione.

Prima di parlare dei diversi livelli di automazione attualmente implementati e dei loro effetti sulle prestazioni di tutto il sistema, viene spiegato cosa si intende per automazione e per livello di automazione.

L'automazione si riferisce all'esecuzione da parte di una macchina di una funzione che era stata precedentemente svolta da un essere umano. Essa non sostituisce l'uomo, piuttosto cambia la natura delle sue attività imponendo nuove forme di workload cognitivo e modificando le modalità con cui l'uomo agisce [14],[17]. Non bisogna, però, confondere automazione e tecnologia. Si parla di tecnologia e non di automazione quando una funzione precedentemente svolta da un essere umano viene assegnata permanentemente e completamente alla macchina¹⁴. Dal progresso della tecnologia dipende poi la possibilità di automatizzare o meno una determinata una funzione: perché questa possa essere automatizzata è innanzitutto necessario che la

¹⁴ Un esempio di tecnologia è l'accensione dell'auto: oggi basta girare la chiave del cruscotto per accenderla, mentre agli albori dell'industria automobilistica, le auto venivano avviate attraverso una manovella girata da un essere umano.

tecnologia adeguata sia disponibile. Ad oggi, proprio grazie ai progressi fatti dalla tecnologia, è possibile sostituire gran parte delle funzioni fisiche dell'uomo (es: lavabiancheria, lavastoviglie, frullatore, per fare esempi prossimi a tutti), funzioni cognitive, anche se limitatamente ad alcune applicazioni (es. dispositivi per immagazzinare informazioni), e funzioni percettive, che possono essere automatizzate implementando strategie per il riconoscimento di pattern (visivi, uditivi, etc) [17]. Esempi di automazione possono essere il bancomat o la sveglia: entrambi eseguono una funzione precedentemente svolta in maniera esclusiva dagli essere umani. In questi due casi ancora non si parla di tecnologia perché le funzioni automatizzate non sono ancora passate permanentemente alla macchina, in quanto è ancora possibile prelevare i soldi in banca oppure farsi svegliare da qualcuno. Un esempio di automazione di funzioni percettive e cognitive è il servizio telefonico per la ricerca di un abbonato oppure quello delle Ferrovie dello Stato per la ricerca di uno specifico treno. In entrambi i casi il sistema comprende i pattern linguistici ed elabora le risposte vocali dell'utente per cercare, in base alle informazioni fornite, le informazioni richieste dall'utente. Se l'utente fornisce tutte le informazioni richieste dal sistema, la voce sintetica darà l'informazione desiderata, altrimenti la telefonata verrà inoltrata all'operatore umano. Anche in questo caso non si parla di tecnologia perché se da un lato è stato possibile affidare alcune funzioni tipicamente umane alla macchina, come la comprensione e l'emissione di pattern linguistici e la ricerca di informazioni all'interno di un data base, dall'altro l'operatore viene chiamato in causa se alcune informazioni vengono a mancare: gli esseri umani non vengono quasi mai sostituiti del tutto dalla macchina, anche quando questo è tecnicamente possibile. Questo è quello che si chiama mantenere l'uomo *in-the-loop*, cioè non escluderlo dalle azioni del sistema ma considerarlo parte integrante di esso.

L'automazione, quindi, non è un fenomeno tutto-o-niente, in quanto una funzione può essere assegnata alla macchina solo in parte, oppure solo in certe circostanze.

Un modo per rappresentare cosa può fare l'automazione è di considerare lo stadio di processamento dell'informazione al quale la funzione da automatizzare fa riferimento e l'ammontare di carico di lavoro cognitivo e fisico che l'automazione sostituisce, rappresentato dal livello di automazione (LOA). Di seguito vengono riportati le quattro tipologie di automazione corrispondenti agli stadi di elaborazione dell'informazione.

-
1. *Acquisizione dell'informazione*: l'automazione sostituisce l'uomo nell'acquisizione, attraverso i sensi, dell'informazione. Un esempio si ha quando l'automazione richiama l'attenzione dell'operatore umano attraverso *warnings* e allarmi.
 2. *Analisi*: l'automazione sostituisce i processi cognitivi della percezione e della memoria a breve termine, in modo da permettere all'operatore di poter valutare la situazione corrente e poter fare previsioni per uno stato futuro.
 3. *Decisione*: l'automazione presenta all'operatore una serie di alternative tra cui questo può scegliere. Un esempio è rappresentato dal TCAS¹⁵ (*Traffic Collision Avoidance System*) che suggerisce al pilota un cambio di quota per evitare la collisione con un altro aereo.
 4. *Azione*: l'automazione potrebbe sostituire l'uomo nell'esecuzione dell'azione scelta nella fase precedente. Esempi sono rappresentati dall'autopilota negli aerei, dal controllo della velocità nelle automobili, dalla funzione di fascicolazione presente in molte fotocopiatrici.

Ognuna delle diverse tipologie di automazione ha, poi, al suo interno diversi LOA, compresi tra due estremi: il primo prevede il controllo totale da parte dell'individuo, definito *controllo manuale* perché l'operatore umano esegue il compito, esamina il processo e valuta il prodotto delle sue azioni, mentre il secondo prevede il controllo totale da parte della macchina, che è così *completamente autonoma*, perché controlla tutti gli aspetti di una funzione.

Sheridan [14], [17] definisce una scala di 10 livelli di automazione (Tabella II.1) in ognuno dei quali l'operatore e la macchina cedono o acquisiscono autonomia: il livello 1 corrisponde al controllo manuale, mentre il livello 10 corrisponde alla completa autonomia. A partire da tale livello si scende verso livelli che prevedono un sempre maggiore coinvolgimento dell'operatore. Ogni LOA definisce, quindi, la possibilità di decisione e d'azione sia dell'individuo sia della macchina.

¹⁵Il TCAS è un dispositivo con la funzione di avvertire i piloti circa la presenza di altri aeromobili equipaggiati con *transponder* operanti nelle vicinanze.

Tabella II.1. I livelli di Automazione

LOA 10	La macchina decide tutto e agisce autonomamente, ignorando l'essere umano.
LOA 9	La macchina informa l'essere umano solo se decide di farlo.
LOA 8	La macchina informa l'operatore solo se gli viene richiesto, oppure
LOA 7	esegue automaticamente un'azione e poi informa l'operatore e
LOA 6	permette all'operatore un tempo limitato per vietare l'esecuzione automatica, oppure
LOA 5	esegue il suggerimento se l'operatore approva, oppure
LOA 4	suggerisce un'alternativa.
LOA 3	La macchina restringe la selezione a pochi elementi, oppure
LOA 2	offre un insieme di alternative per la decisione e l'azione, oppure
LOA 1	non offre assistenza: l'operatore prende le decisioni ed esegue le azioni.

I diversi UAV, a seconda dello stadio di processamento delle informazioni, sono caratterizzati da diversi LOA. Si va da velivoli pilotati manualmente in remoto dall'operatore, caratterizzati da bassi LOA in tutti e quattro gli stadi, a velivoli in grado di seguire autonomamente missioni pianificate, caratterizzati quindi da elevati LOA nel quarto stadio.

In Figura II.7 è riportato uno schema relativo ai diversi livelli di automazione e al conseguente ruolo dell'operatore. In qualche caso il velivolo è guidato manualmente dall'uomo, che può essere visto ancora come pilota, dall'interno della stazione di controllo per mezzo di controlli come lo *stick*, il *rudder* e i pedali (livello 1 in Figura II.7). Questo è per esempio il caso del Predator. In altri casi il controllo è parzialmente automatizzato, nel senso che l'operatore setta i parametri desiderati, come altitudine, velocità, direzione usando un set di pomelli (livello 2 in Figura II.7). Questo è per esempio il caso del Hunter. A livelli più alti il controllo è completamente automatizzato nel senso che il velivolo esegue missioni pianificate sotto il controllo dei computer di bordo, che controllano il volo del velivolo da un punto ad un altro dello spazio

(waypoint¹⁶). In questo caso la missione è completamente pianificata prima del decollo del velivolo (livello 3 in Figura II.7). Tutte le fasi del volo, incluse l'atterraggio e il decollo, sono pianificate prima del volo e il compito primario dell'equipaggio durante la missione è quello di monitorare lo stato del velivolo e di controllare il *payload*. Questo è il caso del Global Hawk che risulta essere il velivolo più automatizzato di quelli attualmente in uso.

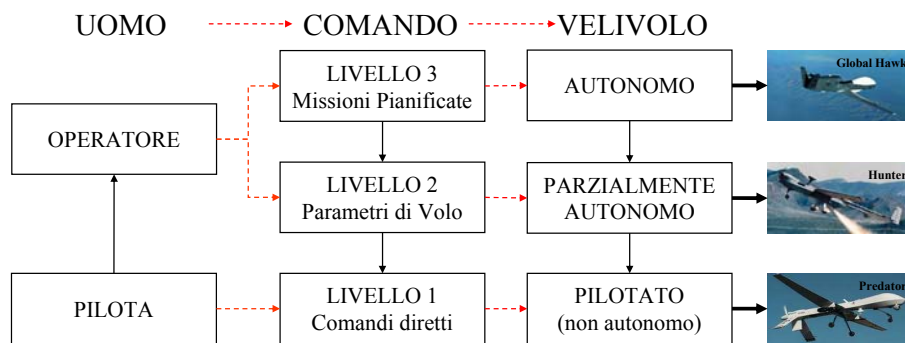


Figura II.7. I livelli di automazione

II.4.1 I problemi legati al livello di automazione

Gli effetti che l'interfaccia ha sulle prestazioni dell'operatore sono influenzati dal particolare livello di automazione implementato nel sistema UAV: diverse considerazioni possono essere fatte riguardo l'influenza che tali livelli di automazione hanno sulle prestazioni dell'operatore e del sistema.

I bassi livelli di automazione, rappresentati dall'invio di comandi diretti (rollio, virata, etc), oppure il settaggio dei parametri di volo (velocità, altitudine, direzione, etc), richiedono all'operatore di *splittare* continuamente le sue limitate risorse cognitive tra l'invio dei comandi al velivolo e l'analisi delle informazioni che da esso riceve. Il controllo manuale del velivolo viene spesso degradato dal ritardo della comunicazione tra il velivolo e l'operatore che causa un ritardo di esecuzione del comando da parte del velivolo. Situazione, questa, che può risultare fatale in particolari situazioni di emergenza. Inoltre, non sono pochi i casi in cui si verificano problemi legati al disorientamento spaziale: la percezione errata dell'assetto o del moto del velivolo può risultare in un comando diretto non appropriato. Bassi livelli di automazione quindi hanno come effetto elevati livelli del *workload* sia fisico che cognitivo dell'operatore, con il rischio che diventi talmente saturo o stressato mentalmente da compiere errori che

¹⁶ Waypoints sono un set di coordinate che, per la navigazione aerea, includono latitudine, longitudine, altitudine.

potrebbero avere come conseguenza il fallimento della missione e la perdita del velivolo [7],[14],[17],[20],[21],[22].

Gli elevati livelli di automazione hanno sia effetti positivi che negativi sulle prestazioni di tutto il sistema. Gli effetti positivi derivano dal fatto che si ha una diminuzione della probabilità che si verifichino incidenti associati al disorientamento spaziale, perché l'operatore non agisce direttamente sul velivolo. Inoltre, dal momento che il velivolo "sa quello che deve fare", la missione prosegue anche in caso di interruzione della comunicazione tra il velivolo stesso e la stazione di controllo. Gli aspetti negativi risiedono nel ruolo passivo a cui viene relegato l'operatore e alle difficoltà riscontrate di prendere il controllo del sistema quando qualcosa non funziona come previsto. Durante l'esecuzione autonoma della missione da parte del velivolo l'operatore ha un ruolo passivo perché responsabile solo del monitoraggio del sistema durante tutta la missione, il che porta ad abbassamento del livello di Situation Awareness e, quindi, ad un degradamento del livello di vigilanza, della sua abilità di riconoscere e reagire ai malfunzionamenti del sistema: ricerche hanno dimostrato che dopo 30 minuti di monitoraggio di un sistema, si abbassa il livello di allerta dell'operatore [7],[14],[17],[21],[22]. Una cosa da non sottovalutare è anche il fatto che i bassi livelli di workload richiesti fanno sentire l'operatore "dis-accoppiato" con il sistema non solo nell'agire ma anche nel sentirsi responsabile della missione, sapendo che è il sistema che esegue la missione. Questo porta l'operatore a sviluppare un eccesso di fiducia che dà origine ad un effetto collaterale definito *complacency*, cioè un autocompiacimento dell'operatore che si traduce nell'assunzione ingiustificata che lo stato del sistema sia soddisfacente: maggiore è la *complacency* minore è la probabilità che l'operatore rilevi un fallimento dell'automazione [17],[21].

Una caratteristica che accomuna i diversi livelli di automazione è che essi non forniscono al velivolo capacità decisionale. Esso è incapace di reagire autonomamente, decidendo di modificare o meno la missione, ad eventi non programmati quali un suo malfunzionamento oppure un cambiamento dello scenario operativo in cui sta volando. Diversi sono stati gli incidenti che hanno avuto come fattore scatenante proprio l'incapacità del velivolo di modificare la missione [7],[8],[9],[10],[11].

II.4.2 Il pilota esterno

Al livello di automazione del velivolo sono associati i problemi derivanti dalle diverse modalità con cui il velivolo decolla oppure atterra. Vi sono velivoli, come lo Shadow e il Global Hawk, in cui tali manovre sono automatizzate, mentre ci sono velivoli, come il Pioneer o l'Hunter, che hanno un pilota esterno responsabile per entrambe le manovre. Tale pilota si trova sulla pista di decollo (o atterraggio) e può guardare a vista il velivolo (si dice che il pilota è in line-of-sight (LOS) con il velivolo). Mantenendo il contatto visuale con il velivolo, lo può controllare usando un radio-control box (Figura II.8), simile a quelli usati dai piloti di aeromodelli.



Figura II.8. Il radio-control box

Statistiche hanno dimostrato che le manovre di atterraggio e di decollo risultano quelle in cui si verifica la maggior parte degli incidenti dovuti all'errore umano. Per esempio nel caso del velivolo Hunter il 47% degli incidenti analizzati si sono verificati durante la manovra di atterraggio e il 20% si sono verificati durante la manovra di decollo, mentre nel caso del velivolo Pioneer il numero di incidenti verificatesi in fase di atterraggio (Figura II.9) sale addirittura al 68% [7],[8].



Figura II.9. La fase di atterraggio del Pioneer

Probabilmente la principale ragione delle difficoltà incontrate dal pilota esterno, specialmente nella fase di atterraggio, è l' *inconsistent mapping*¹⁷ tra il movimento del joystick del box di controllo e la risposta del velivolo, soprattutto in fase di atterraggio. Si ha, cioè, una violazione del principio della compatibilità del moto, che prevede che ad particolare movimento dell'input di controllo corrisponda un analogo movimento dell' oggetto controllato: ad un movimento del joystick in avanti dovrebbe corrispondere un movimento del velivolo in avanti, cioè nella direzione di allontanamento del pilota, e ad un movimento verso destra dovrebbe corrispondere una virata a destra del velivolo. Nel caso specifico, in fase di atterraggio si ha, invece, la situazione in cui ad un movimento del joystick in avanti corrisponde un movimento del velivolo nella direzione di avvicinamento all'operatore. Quindi, affinché tale principio sia rispettato i controlli per controllare il velivolo in fase di atterraggio dovrebbero essere opposti a quelli per controllarlo in fase di decollo.

II.4.3 Il trasferimento del controllo del velivolo

Un problema associato alla presenza del pilota esterno è il trasferimento del controllo del velivolo, al termine della fase di decollo, all'operatore responsabile del controllo del velivolo all'interno della stazione di controllo. Oltre questo tipo di trasferimento, vi sono anche altri tipi di trasferimento del controllo come quello tra i membri di uno stesso equipaggio, oppure quello tra due diverse stazioni di controllo.

La difficoltà nel trasferire il controllo del velivolo tra due differenti operatori, all'interno della stessa stazione di controllo oppure in stazioni differenti, è dimostrata dal fatto che i problemi di trasferimento si verificano in quasi tutti i sistemi UAV e non sono pochi gli incidenti verificatisi nelle fasi di “passaggio di consegne” [7],[9].

¹⁷ Si parla di *consistent mapping* quando un individuo, attraverso la pratica, sviluppa una notevole abilità nell' eseguire un determinato compito grazie all'associazione coerente nel tempo tra una determinata risposta ed un determinato stimolo. Un esempio potrebbe essere il comportamento di individuo quando il semaforo è rosso. In questo caso è imperativo fermarsi: tra lo stimolo, “semaforo rosso”, e la risposta “frenante” si forma rapidamente un'associazione coerente nel tempo.

Capitolo III - Il simulatore di interfaccia uomo-macchina per il controllo degli UAV

III.1 Introduzione

Lo svolgimento di una missione in un ambiente dinamico e solo parzialmente noto a priori è un problema caratterizzato da un elevato livello di complessità e dalla necessità di poter rispondere in tempo reale agli eventi non pianificati. Spesso però la mancanza di autonomia decisionale del velivolo ed interfacce *non usabili* non sempre permettono di reagire in maniera opportuna a tali eventi, causando il fallimento della missione che consiste nel mancato raggiungimento degli obiettivi di missione oppure in danni o, addirittura, nella perdita del velivolo.

Come noto un incidente che interessi un sistema non viene causato da un singolo ed isolato evento, ma piuttosto da un insieme di eventi concatenati. Nel caso degli UAV, molti degli incidenti analizzati ha come causa scatenante un problema al velivolo, a cui esso stesso non sa reagire, ma la scarsa attenzione posta nei confronti degli *Human Factors*, viene ad essere la causa ultima di tali incidenti, in quanto non vengono forniti all'operatore gli strumenti opportuni per comprendere lo stato alterato del velivolo e prenderne il controllo diretto.

Fino ad ora la filosofia è stata quella di considerare l'uomo come non facente parte del sistema UAV: da una parte l'uomo, dall'altra parte l' UAV, comprensivo dell'interfaccia uomo-macchina, degli apparati di comunicazione e del velivolo. Si ha, quindi, una situazione come quella rappresentata in Figura III.1.

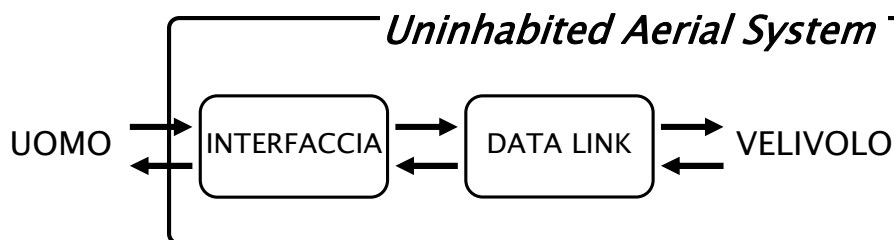


Figura III.1. Il sistema UAV e l'uomo

Dati i problemi che derivano da un tale approccio, il punto di partenza di molte ricerche che stanno tentando di contribuire allo sviluppo di UAV più affidabili, che possano essere paragonati, in quanto a sicurezza, almeno a quelli pilotati, è quello di considerare l'uomo come parte integrante del sistema UAV. L'UAV viene considerato come un sistema le cui componenti principali sono l'uomo ed il velivolo che interagiscono tra di loro attraverso l'interfaccia uomo-macchina e gli apparati di comunicazione. La Figura III.2. rappresenta questo nuovo concetto di UAV.

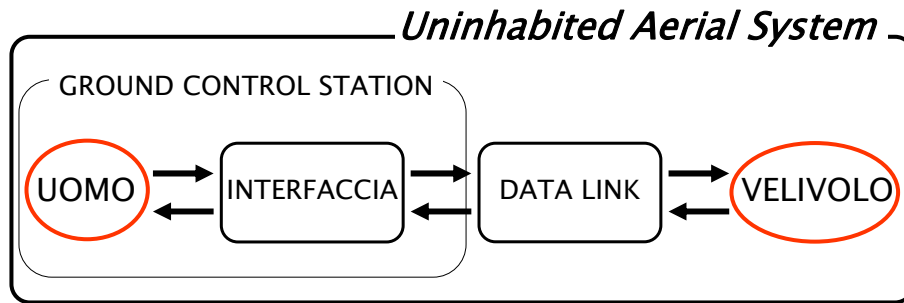


Figura III.2. Il sistema UAV comprensivo dell'uomo

La comprensione poi di un livello di automazione innovativo e la generazione di un'interfaccia in grado di supportare tale automazione è considerato il passo successivo per ridurre il numero e la gravità degli incidenti di tali sistemi e l'influenza che gli human factors hanno su di essi.

Il livello di automazione e l'interfaccia uomo-macchina non possono essere "disaccoppiati", cioè non si può pensare di considerare separatamente una classe di problemi derivanti dalle interfacce o da quelli derivanti dal livello di automazione e quindi proporre modifiche ad una delle due senza tener conto dell'altro. Decisioni riguardanti la progettazione dell'interfaccia dipendono strettamente dal grado di automazione implementato. Infatti, se da un lato, in base al livello di automazione bisogna decidere quali *input device* inserire, dall'altro, dalla qualità dei display e dei controlli forniti all'operatore dall'interfaccia dipende la natura dell'automazione richiesta per operazioni sicure.

Nel presente capitolo viene presentato un sistema prototipale di simulazione con il quale è possibile simulare diverse tipologie di missioni dei sistemi UAV, sperimentare diverse modalità di interazione uomo-velivolo e studiare gli effetti dell'interfaccia che supporta tali modalità sulle prestazioni dell'operatore.

III.2 Il simulatore di interfaccia uomo-macchina

Nel capitolo precedente è stato evidenziato che molti degli incidenti che hanno interessato i sistemi UAV sono dovuti al livello di automazione implementato e alle interfacce uomo-macchina, che da un lato non permettono al velivolo di agire autonomamente in base al proprio stato e alle condizioni dello scenario, dall'altro determinano bassi livelli di Situation Awareness, alti o bassi livelli di workload mentali e fatica dell'operatore, errori di comunicazione tra gli operatori all'interno della stazione di controllo e tra questi e il pilota esterno in fase di trasferimento del controllo del velivolo.

Allo scopo di sperimentare diverse soluzioni ai problemi appena esposti, sia dal lato automazione che da quello interfaccia, durante il corso di dottorato è stato sviluppato un simulatore di interfaccia uomo-macchina con il quale simulare diverse tipologie di missioni.

In base allo scopo prefissato e ai risultati derivanti da una ricerca bibliografica, relativa alla sperimentazione di sistemi di simulazione per lo studio di interfacce uomo-macchina per il controllo dei velivoli senza pilota a bordo [25],[26],[27],[28],[29],[30],[31], è stata definita una struttura modulare del simulatore, riportata in Figura III.3., costituita da componenti indipendenti e facilmente sostituibili. Una prima componente è definita *automazione*, perché essa comprende l'algoritmo che "traduce" l'automazione ipotizzata, cioè permette di implementare le strategie fissate di *planning* e *replanning*. Una seconda componente è l'interfaccia uomo-macchina che supporta l'automazione stabilita. Infine una terza componente è il modello del velivolo che esegue le missioni simulate.

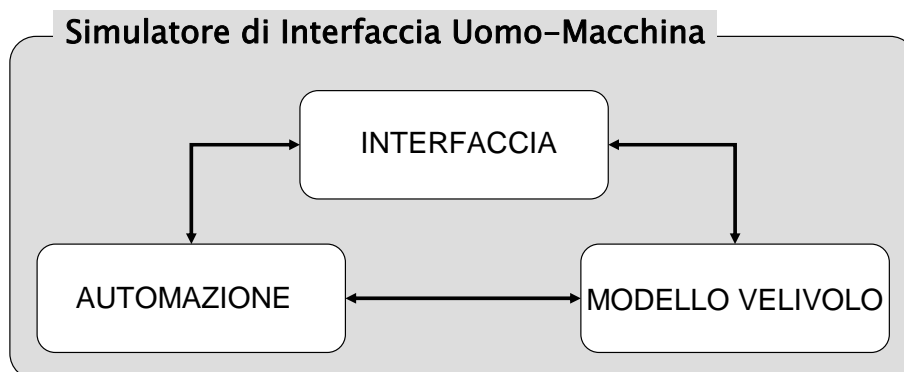


Figura III.3. Struttura modulare del simulatore di interfaccia uomo-macchina

Avere una struttura modulare permette, per esempio, sostituendo l'algoritmo all'interno del blocco automazione, di simulare diverse tipologie di missioni, eseguite

da uno stesso velivolo, caratterizzate da diversi LOA. Oppure, una volta definito il livello di automazione e stabilito il modello velivolo da utilizzare, è possibile sperimentare diverse tipologie di interfacce uomo-macchina caratterizzate, per esempio, da diversi input o output device.

Stabilito lo scopo del simulatore e la sua struttura modulare il passo successivo è stato quello di “progettare l’interazione” tra l’uomo ed il velivolo. Se per interazione si intende un processo in cui il comportamento di un sistema influenza ed è a sua volta influenzato dal comportamento del sistema con cui sta interagendo, progettare l’interazione tra l’uomo, considerato il primo sistema del processo di interazione, ed il velivolo, considerato il secondo sistema, significa stabilire le funzioni operative da allocare ad entrambi e definire i requisiti e le funzionalità¹⁸ dell’interfaccia, attraverso la quale i due sistemi interagiscono. L’approccio seguito per la *progettazione dell’interazione* e, quindi, per la realizzazione di tutto il sistema, è stato un approccio centrato sull’operatore (si parla di *User-Centered Design*). La norma ISO En 13407 afferma che “l’ *User-Centered Design* è un approccio allo sviluppo di sistemi interattivi focalizzato specificatamente sul rendere il sistema usabile¹⁹. È una attività multidisciplinare, che richiede competenze e tecniche specifiche in ergonomia. L’adozione di tali metodi e tecniche nel disegno di sistemi interattivi ne aumenta l’efficacia e l’efficienza, migliora le condizioni di lavoro, contrasta possibili effetti nocivi sulla salute dei lavoratori, sulla sicurezza e sulle prestazioni. Applicare l’ergonomia al disegno dei sistemi informatici richiede di considerare come fattori primari le capacità, competenze, limitazioni ed esigenze degli utenti”[23]. L’ *User-Centered Design*, secondo tale norma, si basa su cinque principi:

¹⁸ La funzionalità di un sistema si riferisce a cosa l’utente può fare con esso e al numero e alla complessità delle cose che può fare il sistema, cioè a come esso supporta o sostituisce le attività dell’uomo [20].

¹⁹ La International Standard Organization (ISO) definisce l’usabilità come “l’ efficacia, l’ efficienza e la soddisfazione con cui particolari utenti raggiungono specifici obiettivi in particolari contesti d’uso” (ISO DIS 9241). L’ usabilità di un sistema viene determinato in base a cinque criteri relativi all’apprendimento del suo funzionamento (*learnability*), alla produttività dell’utente (*efficiency*), alla memorizzazione del suo funzionamento (*memorability*), al numero di errori che si commettono utilizzandolo ed, eventualmente, alla possibilità di annullarne gli effetti (*errors*), ed infine alla soddisfazione dell’utente (*satisfaction*) [20]. Un sistema può essere definito usabile se l’utente riesce facilmente ad imparare ad usarlo e a ricordare come il sistema deve essere utilizzato, in modo che anche se lo usa dopo molto tempo non deve re-imparare ad usarlo. Ancora, un sistema può essere definito usabile se l’utente riesce ad essere produttivo, nel senso che riesce a raggiungere i propri obiettivi senza grande dispendio di energie fisiche e mentali, commettendo nessun o pochi errori e, in questo caso, se riesce ad annullarne gli effetti. Chiaramente è difficile tener conto di tutti i criteri di usabilità nella progettazione di un sistema: prediligere uno piuttosto che un altro dipende dal tipo di sistema in esame e dal tipo di utenti che lo utilizzeranno.

-
- coinvolgimento attivo degli utenti, dall'analisi dei requisiti che il sistema deve soddisfare fino alla fase di testing della sua versione finale;
 - comprensione dei requisiti degli utenti e dei compiti;
 - allocazione appropriata di funzioni tra gli utenti ed il sistema;
 - iterazione delle soluzioni di progettazione;
 - progettazione multi-disciplinare.

In base a tale approccio, progettare l'interazione tra l'uomo ed il velivolo significa analizzare i meccanismi di comunicazione che tra di essi si stabiliscono, comprendere le reciproche specificità ed identificare modalità di interazione che rendano la relazione uomo-velivolo oltre che sicura e funzionale agli obiettivi della missione, anche usabile e, dunque, efficace, efficiente e soddisfacente per l'operatore. È dunque necessario da un lato considerare i processi mentali che si attivano nell'operatore, dall'altro comprendere quali caratteristiche dimensionali, configurative, cognitive e funzionali il sistema di simulazione deve possedere perchè risulti coerente con il suo utilizzatore e adatto al suo utilizzo in condizioni di massimo comfort [23].

La *progettazione user-centered*, quindi, non solo richiede di avere le classiche competenze "progettuali" ma anche di conoscere come "funzionano" gli essere umani sia fisicamente sia cognitivamente. E questo è tanto più indispensabile quanto più il sistema con cui l'uomo deve interfacciarsi è complesso e le conseguenze di un fallimento del suo funzionamento possono essere "importanti".

L'ultimo passo è stato quello di sviluppare singolarmente i vari moduli per poi interfacciarli tra di loro. In particolare, durante il corso di dottorato sono stati sviluppati l'interfaccia e l'algoritmo per la "traduzione" dell'automazione, mentre come modello velivolo è stato utilizzato un modello di un velivolo generale non pilotato opportunamente modificato per interfacciarlo sia con l'algoritmo sia con l'interfaccia.

In Figura III.4. si riporta l'architettura hardware/software finale del simulatore. Tale architettura include tre *workstations*: SIM1, SIM2, SIM3.

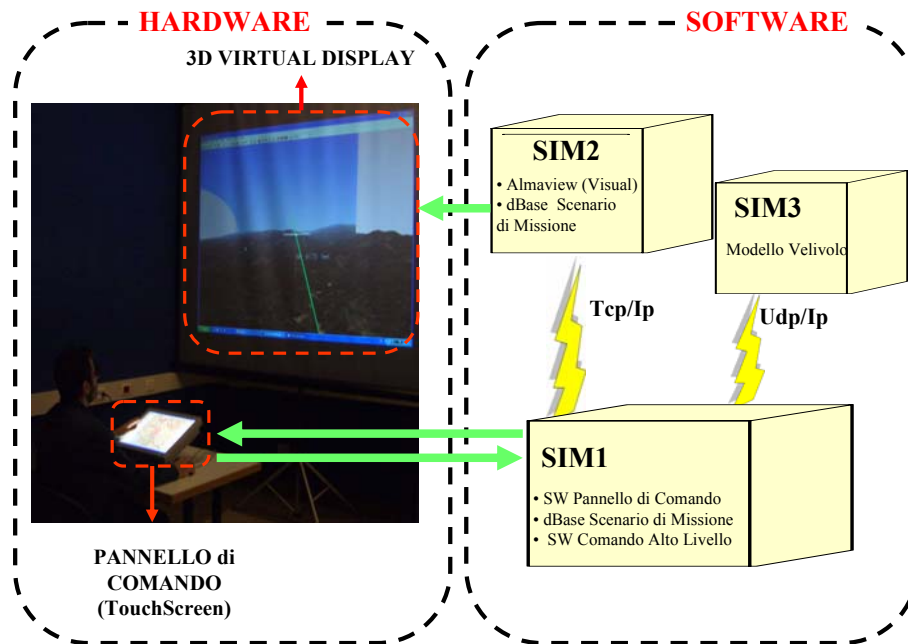


Figura III.4. Simulatore di Interfaccia Uomo-Macchina.

Sulla workstation SIM1 sono implementati:

- il software per il pannello di comando;
- l'algoritmo;
- il data base dello scenario operativo.

Sulla workstation SIM2 sono implementati:

- il software per una visualizzazione stereoscopica dello scenario,
- il data base dello scenario operativo.

Sulla workstation SIM3 è implementati:

- il modello velivolo.

Dai paragrafi successivi si comprenderà chi sono i diversi elementi all'interno delle diverse workstation.

III.3 Il livello di automazione

Nello studio di un'automazione che superi i problemi evidenziati precedentemente bisogna innanzitutto fare una prima considerazione che riguarda il rapporto sistema/uomo: diversi studi hanno dimostrato che, data la difficoltà di programmare un'automazione capace di adattarsi a tutte le situazioni che si potrebbero verificare durante il funzionamento del sistema, è necessario inserire l'uomo anche all'interno di

sistemi altamente automatizzati. In questo modo si potrebbero sfruttare le sue caratteristiche di flessibilità, creatività, improvvisazione, e di *problem solving*, al fine di garantire il corretto funzionamento del sistema anche in condizioni di emergenza o comunque anomale.

A partire da questo assunto, bisogna progettare l'automazione in modo da favorire le prestazioni dell'uomo, mantenendolo nel loop di controllo con elevati livelli di Situation Awareness e assegnandogli funzioni che non richiedano eccessivi sforzi fisici e cognitivi e lunghi tempi di risposta²⁰. L'automazione deve cioè essere centrata sull'uomo. Si parla in questo caso di *Human-Centered Automation (HCA)*. Una tale automazione facilita la cooperazione tra l'uomo ed il velivolo nella gestione e nel controllo della missione, assegnando le funzioni ad entrambi in base alle loro capacità [14],[20].

Un approccio all'automazione *human-centered* porta a considerare livelli di automazione intermedi. A partire dai bassi livelli di automazione si deve aumentare l'autonomia del velivolo in modo da avere un abbassamento dello stress e del carico di lavoro dell'operatore, fino, logicamente, a livelli tali da garantire un coinvolgimento attivo dell'uomo nell'esecuzione delle missioni. A partire, invece, dagli elevati livelli di automazione, per ovviare ai problemi relativi alla SA e all' *out-of-the-loop performance* dell'operatore, si deve garantire la collaborazione tra quest'ultimo ed il velivolo. In definitiva vanno riviste le funzioni che devono essere eseguite dall'operatore e dal velivolo. Quest'ultimo dovrebbe diventare capace di agire autonomamente in alcune fasi della missione (decollo e atterraggio), di eseguire missioni anche a lungo raggio sotto il controllo di una sola stazione di controllo, di provvedere autonomamente alla propria stabilità e controllo diretto, e infine di reagire ad eventuali modifiche dello scenario ripianificando, in collaborazione con l'operatore, la missione oppure eseguendo una manovra evasiva. L'operatore, invece, deve compiere operazioni semplici, adatte alle sue capacità e che comunque ne garantiscano il corretto inserimento nel processo decisionale permettendogli di intervenire in qualsiasi momento durante l'esecuzione della missione.

²⁰ Il *tempo di risposta* è definito come il tempo che intercorre tra il momento in cui un evento si verifica e il momento in cui un individuo emette una risposta.

III.3.1 Il Supervisory Control

Una soluzione è stata trovata nell'implementazione di quella particolare automazione definita *Supervisory Control* [14],[15],[16].

Nell'ambito dei rapporti umani un supervisore di persone è una persona che invia delle direttive che sono comprese e tradotte, in azioni dettagliate, dai suoi subordinati e da questi viene informato riguardo i risultati raggiunti. Il supervisore, grazie alle informazioni ricevute, comprende lo stato del sistema e, in base al suo grado di coinvolgimento stabilito dall'intelligenza dei suoi subordinati, decide la giusta sequenza di azioni da compiere [14]. Nel campo dei sistemi UAV, il *supervisory control* prevede innanzitutto che l'equipaggio sia composto da un singolo operatore²¹ e che questo diventi il supervisore, mentre il velivolo diventi il suo subordinato.

Il supervisore gestisce la missione inviando direttive, definite macroistruzioni o comandi di alto livello, rappresentate da specifiche missioni, obiettivi da monitorare, regole *if-then*, e vincoli. Il velivolo riceve e traduce tali comandi in rotte da seguire, operazioni sul payload ed, a livelli più bassi, azioni sul sistema di controllo. Poi il grado di intelligenza del velivolo stabilisce il grado di cooperazione con l'operatore, cioè stabilisce come e quando l'operatore deve intervenire.

La Figura III.5. mostra l'architettura del sistema UAV definita per implementare il *Supervisory Control*: il sistema è composto da due "moduli" principali, *Human* e *Vehicle*, che si riferiscono rispettivamente all'operatore e al velivolo.

Il modulo *Human* ha due macro-blocchi:

- *Information Perception and Processing*: rappresenta il task cognitivo che l'operatore deve eseguire; è relativo alla percezione e al processamento delle informazioni riguardanti sia il velivolo sia l'ambiente in cui il velivolo sta volando.
- *The High Level Commands*: rappresenta il task esecutivo che deve essere eseguito dall'operatore.

Il modulo *Vehicle* ha tre macro-blocchi:

- *Command Translation Module*:

²¹ Considerare un singolo operatore potrebbe portare all'eliminazione dei problemi dovuti al trasferimento del controllo del velivolo di cui si è parlato nel capitolo precedente.

- Planning Algorithm: esso traduce i comandi di alto livello dell'operatore in rotte che il velivolo assume come rotte di riferimento da seguire per eseguire il comando.
- Payload Manager: esso traduce i comandi dell'operatore in azioni da far compiere al payload.
- Flight Module: riceve le rotte ed è responsabile dell'inseguimento della rotta da parte del velivolo e della sua stabilità.
- Payload: riceve le azioni da far compiere al payload, "osserva" l'ambiente esterno e comunica sia al *Command Translation Module* che all'operatore le informazioni raccolte.

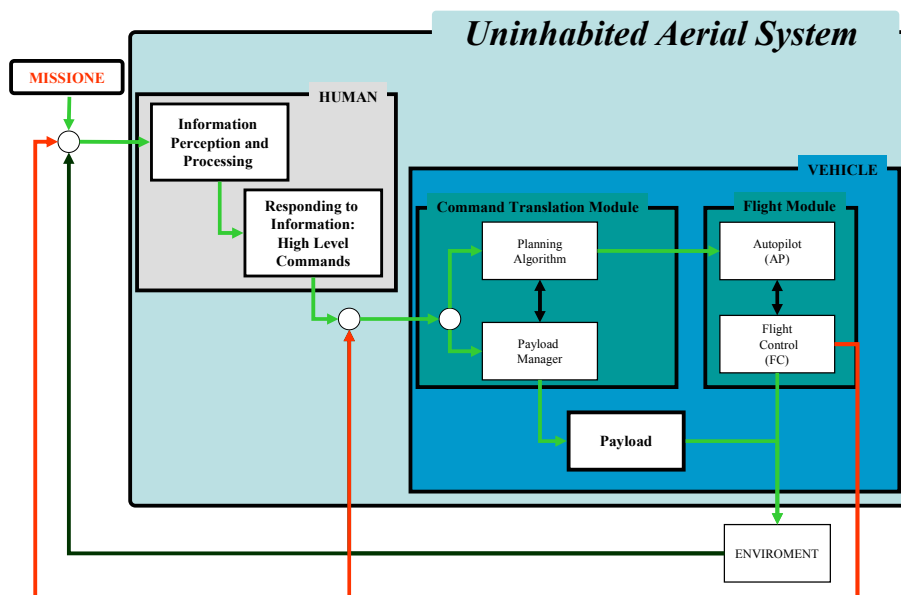


Figura III.5. Architettura del sistema UAV

In un sistema UAV così concepito, all'operatore ed al velivolo sono state assegnate particolari funzioni in modo da garantire la loro collaborazione durante la missione. In particolare, l'operatore

- percepisce le informazioni riguardanti lo stato del velivolo e dell'ambiente esterno,
- le processa e,
- in base agli obiettivi di missione, decide e invia il comando di alto livello al velivolo.
- Non ha il controllo diretto del velivolo.

Il velivolo invece:

- riceve e traduce i comandi dell'operatore in azioni dettagliate, quali rotte da seguire, oppure ai livelli più bassi, operazioni sul sistema di controllo di volo;
- raccoglie le informazioni riguardanti il proprio funzionamento e lo stato dell'ambiente esterno ed informa l'operatore,
- processa i dati, decide se è necessaria un'azione di replanning ed, eventualmente, in base al suo grado di "intelligenza" presenta all'operatore un suggerimento per la modifica della missione oppure la esegue autonomamente;
- riconosce e reagisce a propri malfunzionamenti senza interventi dall'esterno;
- esegue autonomamente le manovre di decollo ed atterraggio.

Si deduce, quindi, che il velivolo non è più solo un'estensione dei sensi dell'uomo, in particolare non è più "l'occhio o l'orecchio" dell'operatore umano in zone a lui inaccessibili, come si verifica negli UAV attualmente in uso, ma diventa anche un'estensione cognitiva della mente dell'uomo, poiché è in grado di prendere decisioni autonomamente e di collaborare con l'uomo nel processo decisionale che si attiva nel caso in cui si rendano necessarie modifiche alla missione come reazione a cambiamenti non previsti dello scenario o a malfunzionamenti del sistema stesso.

Aumentare il grado di intelligenza del velivolo all'interno del sistema UAV porta al trasferimento di alcuni di quei compiti tradizionalmente assegnati ed eseguiti dall'uomo al velivolo. La Figura III.6 riassume questo concetto.

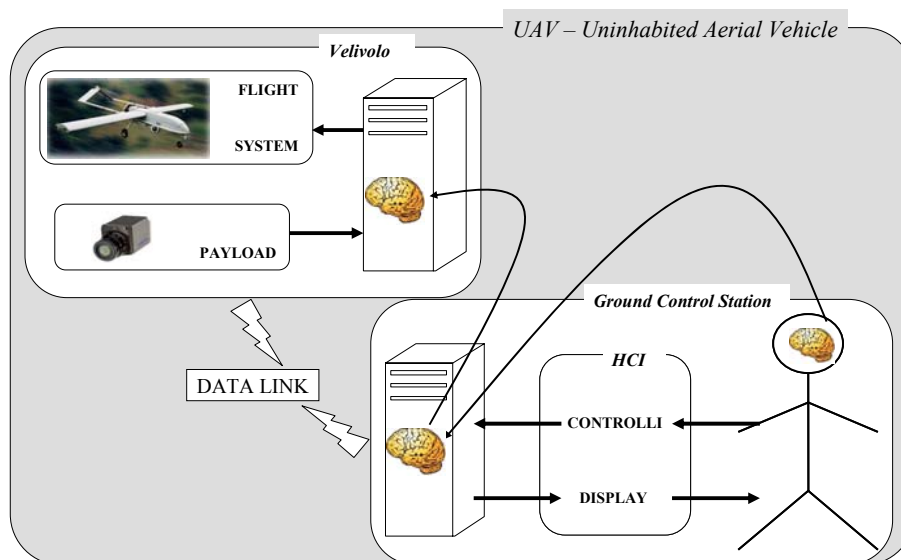


Figura III.6. Il Supervisory Control

Alla Figura II.7, si deve quindi aggiungere la nuova modalità di “controllo” del velivolo (Figura III.7.).

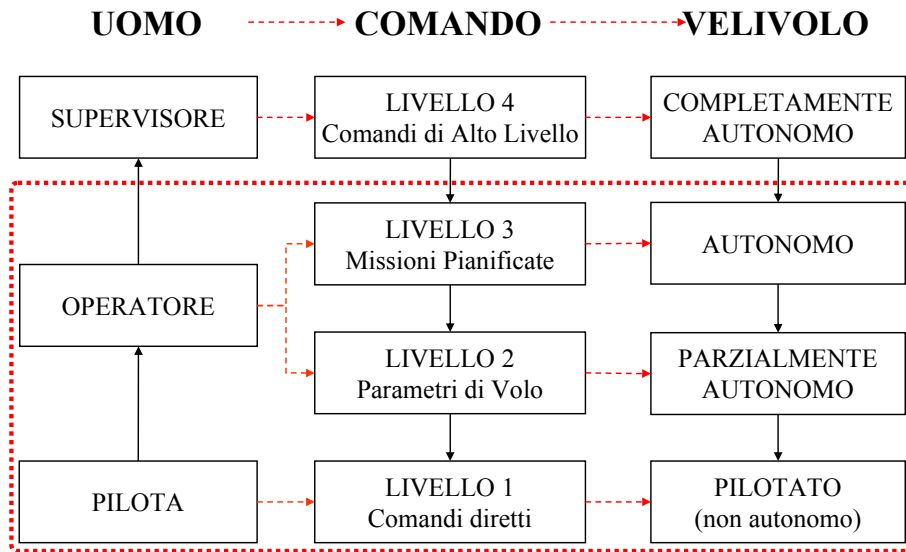


Figura III.7. I livelli di automazione nel sistema UAV

III.3.2 Le Macroistruzioni operative: i comandi di alto livello

I comandi di alto livello sono comandi veloci da inviare, poco dettagliati, semplici a tal punto da essere derivati dall'uso di comandi gestuali di carattere naturale. In questo modo l'operatore spende poche risorse in termini di tempo e sforzo sia cognitivo che fisico e può focalizzare l'attenzione sulla gestione della missione e sulla analisi delle informazioni provenienti dai sensori di bordo.

In questo lavoro il comando di alto livello viene definito come un comando di guida con il quale l'operatore istruisce il sistema UAV a compiere una missione o una parte di essa. Nella scelta di quali comandi implementare si è tenuto conto della funzione primaria degli UAV, che risulta essere quella di sorveglianza di obiettivi e di monitoraggio territoriale.

I comandi di alto livello concepiti e sviluppati sono:

- Comandi di Conduzione: tali comandi consentono all'operatore di comandare un velivolo a portarsi su un punto di coordinate definite.
- Comandi di Survey: tali comandi consentono di indicare al velivolo un obiettivo o un set di obiettivi da sorvegliare, oppure un'area da monitorare.

I comandi di alto livello sono stati costruiti individuando il costruito logico o messaggio attraverso il quale l'operatore potrebbe comunicare al velivolo di compiere la

missione in un determinato punto geografico o area geografica. Generalmente, il comando è composto da due istruzioni che indicano al velivolo cosa fare e dove farlo (per esempio, survey di un target fisso). Inoltre, l'operatore potrebbe definire anche la modalità con cui il velivolo deve eseguire il comando, rappresentato da un indice di priorità, come il tempo di missione, la distanza da percorrere, oppure il carburante da consumare.

Il messaggio di riferimento risulta dunque : **“COMMAND to LOCATION at Time/Distance/Fuel PRIORITY”**. Scomponendo tale messaggio si ottengono il tipo di informazioni minime che l'operatore deve fornire al sistema perché questo agisca. In particolare si distinguono tre componenti del messaggio (Tabella III.1.):

1. COMMAND è il comando di alto livello vero e proprio e può essere un comando di conduzione (*Fly to*), un comando di sorveglianza di un singolo obiettivo o di una serie di obiettivi (*Survey*) o di monitoraggio di un'area (*Monitor*).
2. LOCATION è il punto verso cui il velivolo deve recarsi, oppure gli obiettivi o l'area dove il velivolo deve compiere la missione di osservazione.
3. PRIORITY è il criterio di priorità che l'operatore può fissare a priori e riguarda il tempo totale di svolgimento del segmento di missione comandato o il carburante consumato o la distanza percorsa.

Tabella III.1. Il Comando di Alto Livello

<u>MISSION TASK</u>	<u>LOCATION</u>	<u>PRIORITY</u>
<ul style="list-style-type: none"> • FlyTo. • Survey. • Monitor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Punto di Destinazione. • WP_1, WP_2,..... WP_N: set di waypoints. • Target. • Area. 	<ul style="list-style-type: none"> • Time. • Distance. • Fuel.

Qualche esempio di comando di alto livello potrebbe essere: *“Survey Forlì downtown at fuel priority”*, *“Monitor WP_1, WP_2, WP_3 at distance priority”*, or *Fly To WP_A at time priority*.

Il comando così costruito può essere impartito dall'operatore attraverso diverse modalità di interazione in funzione della tecnologia impiegata nella stazione di controllo, ad esempio impiegando sistemi di riconoscimento vocale, interfaccia *desktop* o *touch screen*. Il parametro LOCATION si presta bene ad essere impiegato con un

sistema di puntamento tipo *touch screen* associato a mappa digitale quando si vogliono indicare punti che non associano un nome ad un punto geografico preciso.

Le location” punto di destinazione” o “obiettivi” comandate dall’operatore sono caratterizzati da:

- Latitudine.
- Longitudine.
- Elevazione.

L’area da monitorare, in questo caso rettangolare, viene indicata al velivolo fissando i vertici opposti.

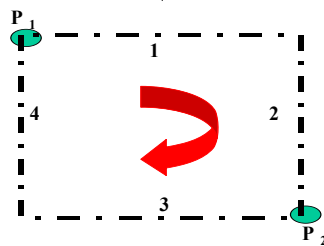


Figura III.8. L’area da Sorvegliare

Inoltre, in questo stadio dello studio, nel caso di comando di *survey* l’operatore oltre all’obiettivo di missione, deve fissare anche l’altezza a cui il velivolo deve eseguire la manovra. La scelta di tale altezza potrebbe dipendere dalle caratteristiche del payload, dalle condizioni atmosferiche, dalla posizione del target o dalla risoluzione richiesta.

I vantaggi di questo tipo di comando potrebbe essere compreso se si pensa che gli scenari in cui i velivoli volano sono semisconosciuti in fase di pianificazione e che nuove situazioni, anche di pericolo, possono nascere durante l’esecuzione della missione. Per esempio, in una missione militare l’operatore potrebbe avere l’esigenza di comandare il velivolo di sorvegliare un target non considerato in fase di pianificazione. Oppure in una missione civile, si potrebbe avere l’esigenza che il velivolo debba abbandonare o momentaneamente sospendere la missione che sta eseguendo per andare a monitorare una determinata area in cui è scoppiato un incendio o si pensi sia scoppiato.

III.3.3 Il planning algorithm

Dalla definizione di comando di alto livello data si deduce che in questo lavoro si è affrontato solamente il problema relativo alla navigazione del velivolo. I comandi di alto livello descritti vengono tradotti in rotte di volo che il velivolo deve assumere come

rotte di riferimento per portare a termine la missione. Inoltre, in questa fase, il velivolo viene assunto essere “già in aria” (non si considerano le fasi di decollo e di atterraggio) ed esente da malfunzionamenti.

Dunque, dei due sotto-blocchi che costituiscono il Command Translation Module, è stato sviluppato solo il *planning algorithm*. Quest’ultimo calcola le rotte in base al comando ricevuto dall’operatore, allo stato del velivolo e dell’ambiente, ed alle prestazioni del velivolo, fornite all’algoritmo in forma di tabelle. I requisiti fissati per l’algoritmo sono:

- calcolo delle rotte di volo in tempi brevi;
- calcolo di rotte di volo sicure;
- calcolo di rotte di volo compatibili con le prestazioni del particolare velivolo che si sta considerando.

In Figura III.9. è evidenziata l’architettura di base dell’algoritmo.

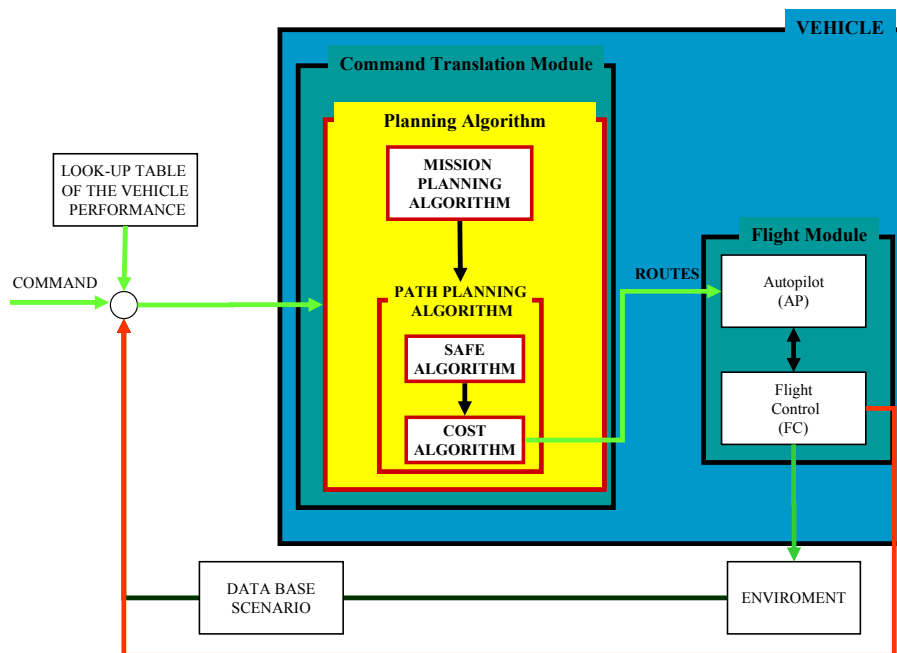


Figura III.9. Il Planning Algorithm

Come mostrato in figura, l’algoritmo è composto da due sub-algoritmi:

- Il *Mission Planning Algorithm* che calcola una sequenza di waypoint, definiti *Primary Mission Waypoint*, che costituiscono la rotta che il velivolo deve volare per eseguire il comando dell’operatore,
- Il *Path Planning Algorithm* che calcola, tra ogni coppia di *Primary Mission Waypoint*, un’ulteriore sequenza di punti caratterizzati da quattro parametri,

longitudine, latitudine, altitudine e velocità di attraversamento del punto. La spezzata che unisce tali punti viene definita Macroleg.

La rotta risultante ha la forma di una spezzata costituita da un numero di Macroleg pari al numero di PMW a cui si sottrae uno:

$$\text{Numero Macroleg} = \text{Numero PMW} - 1$$

Nel capitolo successivo verrà descritto più dettagliatamente il funzionamento dell'algoritmo.

III.3.4 Modalità di interazione uomo-velivolo

Relativamente alla modalità di interazione uomo-velivolo bisogna necessariamente fare una distinzione. Si verificano infatti due situazioni: la prima è relativa al momento in cui l'operatore invia un comando al velivolo, la seconda invece è relativa all'azione di *replanning*, come reazione ad un cambiamento dello scenario operativo.

III.3.4.1 Invio del comando di alto livello

L'invio del comando di alto livello da parte dell'operatore prevede una collaborazione tra l'operatore stesso ed il velivolo. È stato detto precedentemente che il velivolo è in grado di tradurre il comando in rotte di volo. Ma a questo punto bisogna chiedersi se il velivolo assume la rotta calcolata come rotta di riferimento subito dopo averla calcolata oppure è previsto un ulteriore coinvolgimento dell'operatore. Gli step seguenti, che vanno dall'invio del comando alla ricezione della rotta da parte del modulo di volo del velivolo, chiariscono questo punto:

1. l'operatore invia il comando al velivolo;
2. il velivolo traduce il comando in una rotta di volo;
3. il velivolo suggerisce la rotta calcolata all'operatore che la riceve attraverso l'interfaccia uomo-macchina;
4. l'operatore, a questo punto, può approvare o meno la rotta calcolata:
 - a. se non accetta la rotta può inserire dei waypoint intermedi che spostano la rotta verso una porzione di spazio oppure nel peggiore dei casi può inviare un nuovo comando;
 - b. se accetta la rotta questa viene spedita al Flight Module del velivolo;
5. il velivolo assume la rotta come rotta di riferimento se l'operatore ha accettato la rotta, oppure si ritorna al punto 2 se la rotta non è stata accettata.

Come tali step evidenziano vi è una cooperazione tra l'operatore ed il velivolo nell'azione di calcolo delle rotte. Questo ha effetti positivi sulle prestazioni dell'operatore stesso: se da un lato il workload dell'operatore viene diminuito in quanto il calcolo della rotta viene eseguito dal velivolo, dall'altro l'operatore avrà un ruolo attivo in quanto deve verificare che l'automazione “funzioni”, cioè deve verificare che le rotte calcolate rispettino i vincoli imposti.

III.3.4.2 Reazione ad una modifica dello scenario

Sicuramente più importante del precedente è il problema relativo al comportamento del sistema UAV in situazioni non previste, in quelli cioè che risultano essere stati letali in molti incidenti. Fermo restando la capacità del velivolo di tradurre i comandi di alto livello e la sua capacità, simulata, di riconoscere qualcosa “di nuovo” rispetto a quanto programmato, bisogna stabilire fino a dove spingere la capacità decisionale del velivolo, cioè la sua capacità di reagire autonomamente. Bisogna stabilire cioè se, una volta riconosciuto un evento non pianificato, il velivolo reagisce indipendentemente dall'operatore oppure lo coinvolge nell'azione di replanning. Per poter rispondere a questa domanda si possono ipotizzare tre diverse modalità di interazione tra il velivolo e l'operatore: una manuale, una semi-automatica, una automatica. Per spiegare in modo comprensibile che cosa prevedono le tre diverse modalità di interazione, si ipotizza la seguente situazione: mentre il velivolo vola, una forte raffica di vento lo allontana dalla rotta di riferimento e lo porta in una zona montuosa non considerata in fase di pianificazione. A questo punto il sistema UAV deve riconoscere il nuovo ostacolo e reagire ad esso.

Vediamo cosa succede in tutti e tre i casi:

- **Manuale:** il velivolo “sente” di essere in uno spazio nuovo, ma non è capace di adattarsi ad esso. In questo caso è capace solo di informare l'operatore e di inviargli dati riguardo allo spazio in cui si trova. È compito dell'operatore inviare i comandi necessari che permettano al velivolo di adattarsi alla nuova situazione (Figura III.10).



Figura III.10. LOA manuale

- **Semi-Automatico:** il velivolo “sente” di essere in uno spazio nuovo ed è capace di adattarsi ad essa. Calcola, cioè, una rotta alternativa e la propone all’operatore, tramite l’interfaccia, dandogli il tempo di verificarla e, quindi, di rifiutarla o di accettarla: se l’operatore rifiuta la rotta invia un nuovo comando, se invece la accetta, la rotta verrà spedita al Flight Module e il velivolo la assume come rotta di riferimento (Figura III.11). Come si evince dalla figura l’operatore, anche se interviene a valle dell’azione di ricalcolo della rotta, è comunque ancora coinvolto nell’azione di replanning perché ha il compito di autorizzare o meno il velivolo ad assumere la rotta come rotta di riferimento.

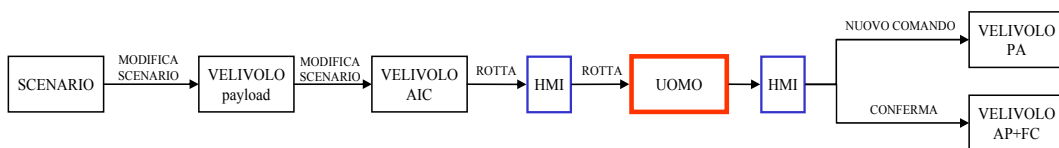


Figura III.11. LOA semi-automatico

- **Automatico:** il velivolo “sente” di essere in uno spazio nuovo ed è capace di adattarsi ad esso. In questo caso calcola la rotta alternativa ma la assume direttamente come rotta di riferimento, senza chiedere nessuna conferma all’operatore. Come si può vedere anche dalla Figura III.12 l’operatore viene completamente escluso dal processo decisionale coinvolto nell’azione di replanning della missione e viene informato solo successivamente di quanto avvenuto.

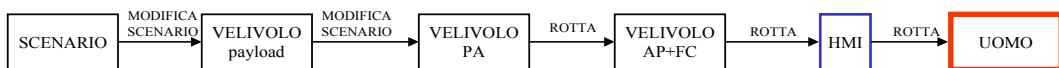


Figura III.12. LOA automatico

Più avanti nella tesi si definirà quale tra queste tre modalità garantisce le migliori prestazioni dell’operatore.

III.4 Interfaccia uomo-macchina per il controllo del velivolo

Nella progettazione dell'interfaccia uomo-macchina in grado di supportare il livello di automazione stabilito, coerentemente con la definizione di *User-Centered Design*, le esigenze dell'operatore sono state prese in considerazione fin dall'analisi dei requisiti che doveva soddisfare e una volta raggiunta la versione finale, sono stati effettuati dei test per valutarne la rispondenza ai requisiti, l'usabilità e ricavare utili informazioni per un eventuale miglioramento.

I requisiti fissati per l'interfaccia uomo-macchina, coerentemente con il livello di automazione stabilito e l'obiettivo di superare i problemi di quelle attualmente in uso, sono i seguenti.

- Un operatore per un velivolo: l'interfaccia deve permettere ad un singolo operatore di supervisionare la missione del singolo velivolo. In questo modo si potrebbero eliminare i problemi derivanti dal trasferimento del controllo da un operatore ad un altro, i problemi di comunicazione tra gli operatori all'interno di una stazione di controllo ed i problemi derivanti dal controllo del velivolo da parte del pilota esterno.
- Adeguati livelli di workload e tempi brevi di risposta: essa deve permettere all'operatore di gestire intuitivamente ed in modo efficiente sia la pianificazione della missione, sia il comando dell'UAV per mezzo di comandi di alto livello in grado di modificare la missione pianificata per adattarla alle esigenze operative. In questo modo l'operatore spenderebbe poche risorse in termini di tempo e sforzo fisico/cognitivo per comandare il velivolo, e potrebbe essere in grado di indirizzare le sue limitate risorse cognitive all'analisi delle informazioni che riceve dai sensori di bordo del velivolo e quindi nella gestione della missione.
- Alti livelli di situation awareness: l'interfaccia deve aiutare l'operatore a percepire cosa sta succedendo, cioè qual è lo stato del sistema e dell'ambiente circostante il velivolo (livello 1), interpretare e comprendere il significato di ciò che sta accadendo (livello 2), e predire lo stato futuro del sistema (livello 3). Solo in questo modo l'operatore avrà tutte le informazioni utili per decidere se e come agire in base alla situazione contingente.

L'interfaccia uomo-macchina è stata realizzata combinando la conoscenza della funzionalità dell'interfaccia stessa sia con la conoscenza teorica del funzionamento

dell'uomo, dal punto di vista fisico e cognitivo, sia con le linee guida per la progettazione di interfacce *user-centered* [20]. Alla fine si è ottenuta un'interfaccia il cui layout è riportato in Figura III.13.

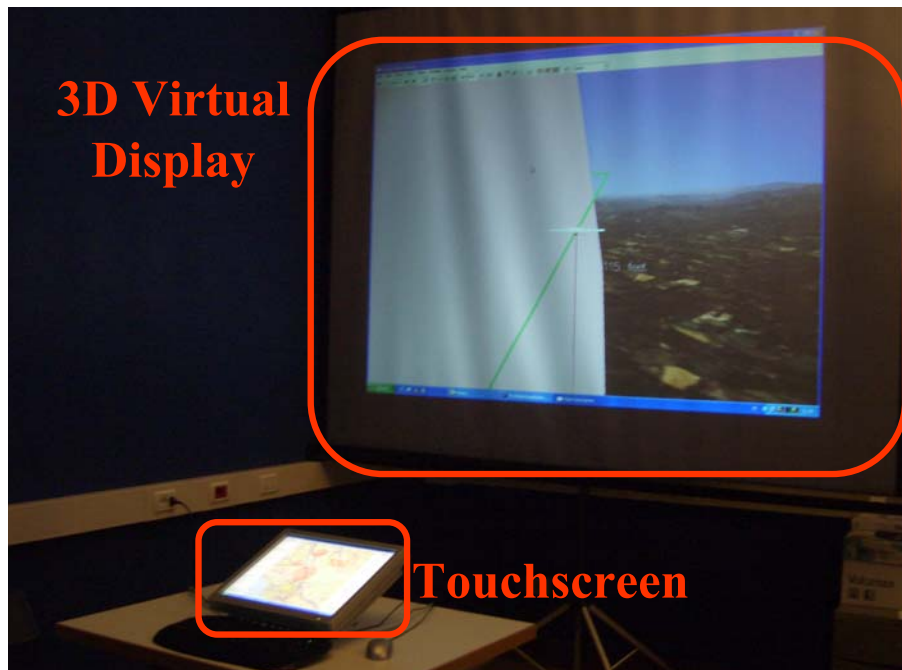


Figura III.13. Layout dell'interfaccia uomo-macchina

In figura sono evidenziate le due componenti dell'interfaccia:

- il *touchscreen*: esso è il pannello di comando, cioè è l'input device principale utilizzato dall'operatore per inviare i comandi; la tastiera, ad esso collegata, viene utilizzata solo per digitare una specifica quota delle "location", in particolare del punto di destinazione;
- il *3D Virtual Display*: esso è il display principale utilizzato dall'operatore per la fase di monitoraggio della missione.

Modificando la Figura II.3 con l'inserimento dell'interfaccia sviluppata ed i task dell'operatore e del velivolo, si ottiene la Figura III.14, in cui è rappresentato il loop della comunicazione tra l'operatore ed il velivolo, che comprende i seguenti step:

- l'operatore invia al velivolo i comandi tramite touchscreen e tastiera;
- il velivolo riceve e traduce i comandi ricevuti e comunica, attraverso gli *output device* dell'interfaccia, all'operatore le informazioni riguardanti la comprensione del comando ricevuto, e le informazioni riguardo il suo stato e quello dello scenario in cui sta volando;
- l'operatore percepisce, comprende ed elabora le informazioni ricevute;

- decide se, come e quando intervenire,
- eventualmente interviene inviando un ulteriore comando di alto livello.

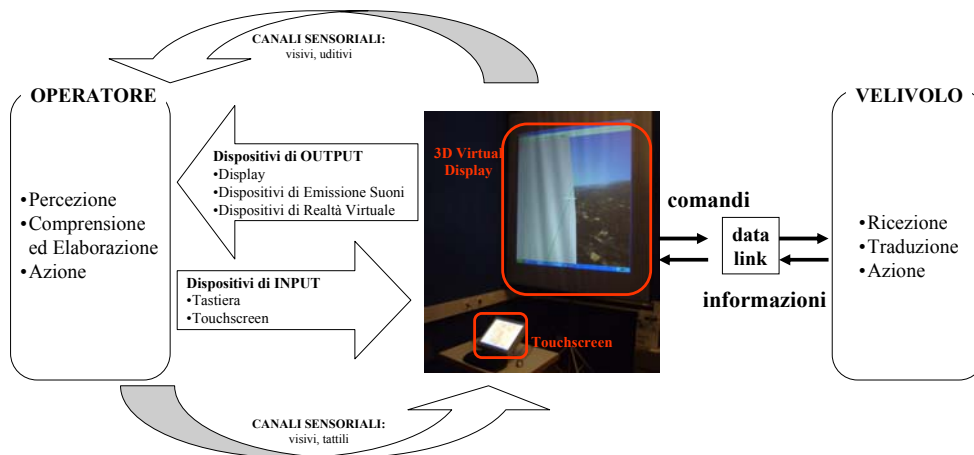


Figura III.14. Il loop di comunicazione tra l'operatore ed il velivolo

III.4.1 Il 3D virtual display

Il 3D Virtual Display fornisce all'operatore una visualizzazione stereoscopica dello scenario operativo: l'operatore vede, attraverso tale display, il volo di un modello virtuale del velivolo reale in un ambiente sintetico, replica di quello reale, in cui può "navigare", cambiando il punto di vista, dall'interno e dall'esterno del velivolo, e la scala di visualizzazione dello scenario, utilizzando un mouse. Un tale display, o meglio il software utilizzato, permette di integrare tutte le informazioni disponibili in una unica e completa rappresentazione dello scenario (Figura III.15): informazioni riguardo l'orografia del terreno, riguardo le condizioni atmosferiche, informazioni riguardo il velivolo ed eventuali altri velivoli all'interno dello scenario, informazioni provenienti dai sensori di bordo, se sono disponibili. In questo modo, se si pensa all'esecuzione di una missione reale, in quest'unico display potrebbero essere integrate informazioni note a priori ed informazioni acquisite in real-time dal payload del velivolo e continuamente aggiornate. La fusione delle informazioni che descrivono lo stato dello scenario operativo è un requisito fondamentale per rappresentarlo in modo efficiente e consentire all'operatore di stimare la sua evoluzione, in ogni istante della missione[29].

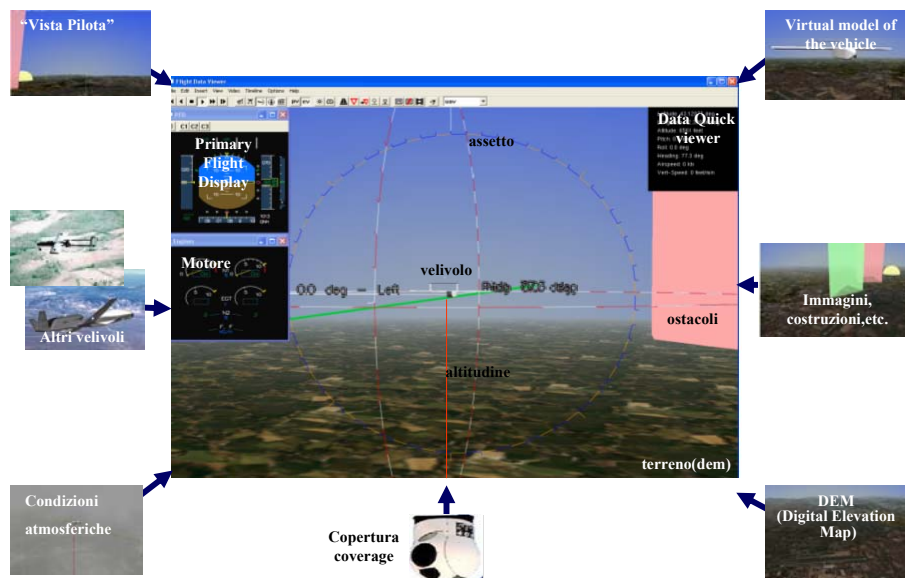


Figura III.15. Il 3D Virtual Display

Il Virtual Display è parte del P.S.T. (Passive Stereo Theatre) di cui dotato il Laboratorio di Realtà Virtuale e Simulazione della II Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna. Esso è un sistema di visualizzazione tridimensionale basato sulla stereoscopia passiva ottenuta attraverso l'utilizzo di filtri e occhiali a polarizzazione lineare. Il sistema è costituito da uno schermo Silver Da-lite di dimensioni di 2x2,5 m, due videoproiettori DLP montati su supporto dedicato, una workstation con 4G di memoria RAM per la gestione di mesh e nuvole di punti di grandi dimensioni, e scheda grafica NVidia della serie FX Quadro 3400 e un set di occhiali polarizzati.

Il programma utilizzato per la visualizzazione dello scenario di missione, sviluppato inizialmente per la ricostruzione di voli tramite lettura di dati provenienti da FDR (Flight Data Recorder) e la cui descrizione dettagliata può essere trovata in [32], è stato modificato opportunamente per fornirgli la capacità non solo di leggere dati di volo e di missione preregistrati, ma anche di animare velivoli 3D tramite i dati di volo provenienti dal modello del velivolo. In entrambi i casi il volo è visualizzato in un ambiente virtuale con un alto grado di fotorealismo. Questo è dovuto alla possibilità di caricare un modello virtuale del velivolo e alla georeferenziazione automatica del volo, basata sull'utilizzo delle DEM (Digital Elevation Map). Il livello di realismo offerto dal programma può essere aumentato inserendo, come texture, immagini satellitari o aeree di aree di particolare interesse, costruendo modelli realistici di aeroporti e sovrapponendo alla scenario componenti come No Fly Zone oppure ostacoli di altra

natura. Inoltre, il programma dà la possibilità di ricreare le condizioni atmosferiche modificando determinati parametri, quali le condizioni di visibilità, la distribuzione e la densità delle nuvole e la presenza di nebbia.

Un'importante caratteristica del programma è la possibilità di riprodurre i movimenti delle parti mobili e del carrello del velivolo e di visualizzare gli andamenti dei parametri di volo. I più importanti parametri, come l'assetto, la rotta, l'altitudine dal terreno, la velocità del velivolo e del vento sono integrati nello scenario 3D. Gli altri parametri sono rappresentati in finestre secondarie che possono essere richiamate e posizionate nello schermo in base alle necessità dell'operatore (Figura III.15).

La capacità del programma di leggere dati off-line permette di ricostruire le missioni in modo da poterle analizzare in un secondo momento. Il programma crea una moviola virtuale del volo e l'operatore può usare una *timeline* per controllare la sequenza del volo: può, cioè, controllare la velocità di riproduzione, accelerarla fino ad arrivare ad eventi di maggiore interesse, può fermarla e addirittura ripetere la riproduzione di una stessa sequenza di volo quante volte lo ritenga necessario. Questa caratteristica del programma risulta essere molto utile per la ricostruzione degli incidenti o di situazioni comunque "anormali", soprattutto per quanto riguarda i fattori umani coinvolti in essi.

Un ulteriore vantaggio del 3D Virtual Display risiede nel fatto che esso fornisce all'operatore tutte le informazioni disponibili, in modo da non costringerlo né a muovere la testa tra diversi display né ad integrare mentalmente le informazioni provenienti da essi. Questo porta da un lato ad una riduzione del carico di lavoro sia cognitivo sia fisico dell'operatore, dall'altro ad un aumento della sua situation awareness, dal momento che in unico display si hanno tutte le informazioni, alcune sempre visibili, altre facilmente "richiamabili". Inoltre, avendo a disposizione sia le informazioni riguardanti lo stato del velivolo sia avendo una visione sintetica dell'ambiente intorno ad esso l'operatore riesce a comprenderne l'assetto, la posizione rispetto allo spazio circostante e la sua direzione di avanzamento. In questo modo si limitano i problemi di disorientamento spaziale con un incremento della probabilità di successo della missione.

III.4.2 Il pannello di Comando

Il pannello di comando, rappresentato da un touchscreen, è lo strumento utilizzato dall'operatore per inviare le macroistruzioni. Sul display vi sono una mappa di navigazione, che fornisce una visione bidimensionale dello spazio in cui si deve svolgere la missione, e due menu fissi. Il menu alla destra della mappa contiene i pulsanti che l'operatore seleziona per inviare i comandi al velivolo. Il secondo menu, alla sinistra della mappa, contiene i pulsanti che l'operatore usa per salvare e richiamare piani di volo (*mission keys*), per manipolare la mappa (*manipulation keys*), per avere informazioni (*information keys*) e per annullare un'azione effettuata o ripeterla (*Undo e Redo keys*) (Figura III.16). Utilizzando il touchscreen l'operatore invia un comando semplicemente puntando fisicamente ad una "location" sulla mappa ed associando ad essa un'azione: il punto di destinazione verso cui il velivolo deve volare, gli obiettivi che il velivolo deve sorvegliare oppure l'area da monitorare. Il comando di alto livello, quindi, coerentemente con la sua definizione, viene inviato velocemente e senza grande accuratezza [20].

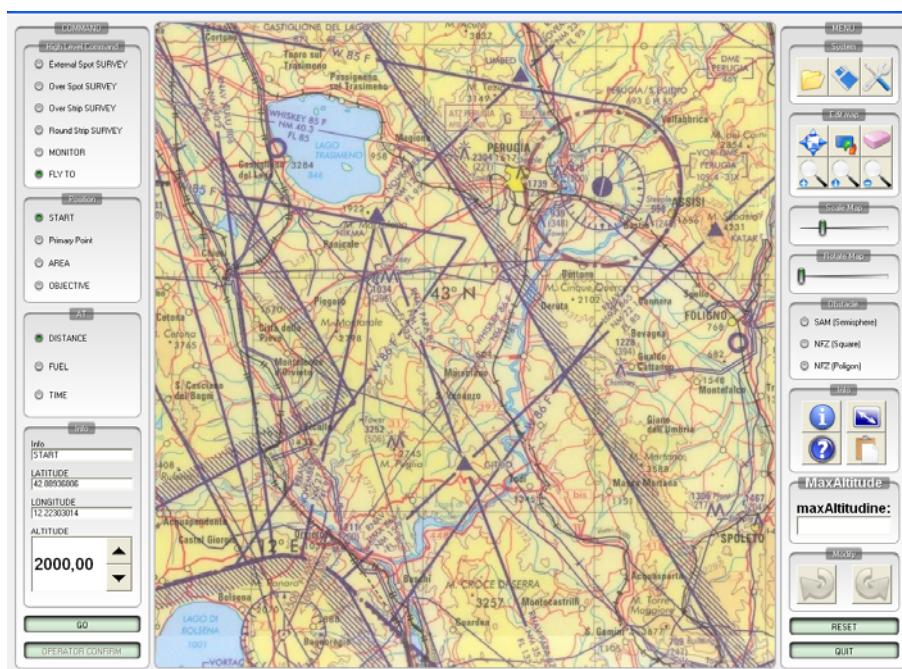


Figura III.16. Il Pannello di Comando

Il menu alla destra della mappa, definito menu di comando, è costituito da tre sotto-menu, ognuno corrispondente ad una delle informazioni che costituiscono la sintassi del comando di alto livello. Si ricorda che il generico comando di alto livello ha la seguente forma:

“COMMAND to LOCATION at Time//Distance/Fuel PRIORITY”.

Ogni elemento dei tre sottomenu corrisponde alle diverse opzioni stabilite per ogni istruzione del comando. In questo modo una loro combinazione risulta nel comando che riceve il velivolo.

Il primo sottomenu è costituito da pulsanti che indicano l'azione che il velivolo deve compiere (Mission Task). Selezionando una “location” dal secondo sottomenu, fissando a sua quota da uno *spinbox*²² e puntando ad essa sulla mappa, l'operatore stabilisce dove il velivolo deve compiere l'azione fissata.

Infine, selezionando uno dei pulsanti del terzo sottomenu l'operatore stabilisce la modalità con cui il velivolo deve eseguire l'azione, cioè il parametro di performance da privilegiare.

La posizione, sia rispetto agli altri elementi del display sia reciproca, dei diversi pulsanti che l'operatore deve selezionare per inviare il comando ha diversi vantaggi:

- rispetta il principio di prossimità-compatibilità, che suggerisce di collocare in stretta prossimità percettiva gli elementi dell'interfaccia che devono essere utilizzati per eseguire uno stesso compito: in questo caso i diversi pulsanti per l'invio del comando si trovano nella stessa colonna e, soprattutto, vengono selezionati nello stesso ordine che l'operatore utilizzerebbe se inviasse il comando oralmente;
- permette all'operatore di evitare errori definiti *blunders errors*²³.
- permette di avere tempi brevi per inviare il comando: aver considerato un numero limitato di alternative tra cui l'operatore può scegliere, definito “complessità della decisione”, e aver progettato l'interfaccia in modo tale da presentargli tali alternative sul display, garantisce tempi brevi di risposta dell'operatore. Questo è particolarmente importante quando si verificano situazioni di pericolo che richiedono risposte veloci: se si considera che il

²² Nella figura sottostante è rappresentato uno *spinbox*



Utilizzando lo *spinbox* l'operatore può fissare la quota per intervalli costanti e discreti. Invece, tramite comando da tastiera può fissare una quota precisa.

²³ L'operatore non corre il rischio di premere due pulsanti insieme, come invece può accadere, per esempio, utilizzando le tastiere dei computer per la vicinanza tra i tasti.

tempo impiegato per inviare il comando è solo una parte dell'intervallo di tempo che intercorre dalla percezione del pericolo da parte dell'operatore alla sua azione è chiaro che aver tempi brevi per l'invio del comando porta ad una diminuzione dell'intero tempo di risposta dell'operatore.

Sul lato sinistro della mappa vi sono differenti gruppi di pulsanti.

1. *mission keys*: permettono all'operatore di salvare segmenti di missione costruiti off-line e richiamarli durante l'esecuzione della missione.
2. *manipulation keys*: permettono sia di traslare e scalare la mappa in modo da indicare più accuratamente la "location", sia di ruotare la mappa in modo che la direzione del velivolo sia consistente con il modello mentale²⁵ che l'operatore ha del moto del velivolo "all'interno" del display.
3. *information keys*: permettono all'operatore di avere informazioni sia riguardo la location selezionata sia riguardo gli eventuali ostacoli all'interno dello scenario, permettono di calcolare la distanza tra coppie di punti nello spazio, di richiamare il file di testo sui quali vi sono tutte le informazioni della rotta "attiva" e di aprire l'*Help*, in cui sono spiegati le funzioni fondamentali del touchscreen.
4. *Undo e Redo keys*: danno all'operatore la possibilità di annullare un'azione e di annullare "l'annullamento" di un'azione.

Dopo aver inviato il comando l'operatore riceve una serie di feedback, sia visivi che uditivi, che gli permettono di avere informazioni sul comando inviato, di comprendere cosa il velivolo ha capito riguardo al comando e come ha intenzione di eseguirlo. Tale feedback è diverso da quello che lo informa riguardo l'azione intrapresa dal velivolo e il suo stato, come rappresentato in Figura III.17.

²⁵ Il modello mentale che un essere umano ha di un sistema include la sua comprensione delle componenti del sistema, di come questo funziona e di come deve essere usato. Nel caso specifico la mappa sarà orientata in modo che la sua parte nord coincide con la parte superiore dello schermo se per l'operatore un velivolo che si muove dal basso verso l'alto dello schermo sta volando in direzione sud-nord.

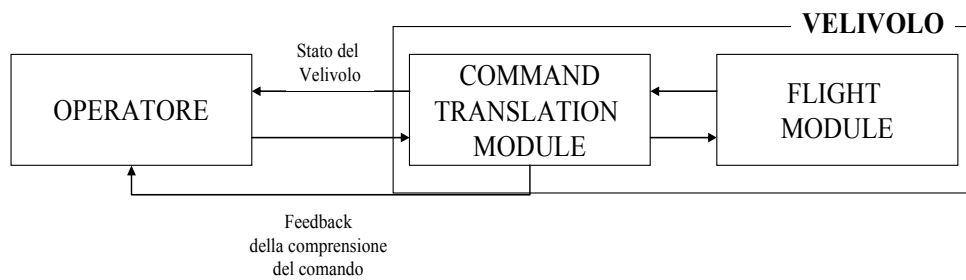


Figura III.17. Feedback sul comando inviato

Una prima forma di feedback visivo è rappresentato dal fatto che i pulsanti selezionati per l’invio del comando rimangono evidenziati. In questo modo l’operatore ha la possibilità di sapere in qualsiasi momento che tipo di comando ha inviato. Altre forme di feedback visivo sono la visualizzazione della rotta, che il velivolo ha calcolato, sulla mappa dello schermo e un file di testo, che l’operatore può “chiamare” se lo ritiene opportuno, nel quale vi sono scritte tutte le informazioni relative alla rotta.

L’ultimo feedback è rappresentato da una comunicazione vocale: l’operatore sente una voce che gli ripete la sentenza che avrebbe detto se avesse inviato un comando oralmente. Se per esempio ha appena comandato al velivolo di recarsi in un punto privilegiando il tempo, riceverà l’audio feedback: “fly to ... at time priority” e vedrà sullo schermo la rotta calcolata dal velivolo (Figura III.19).

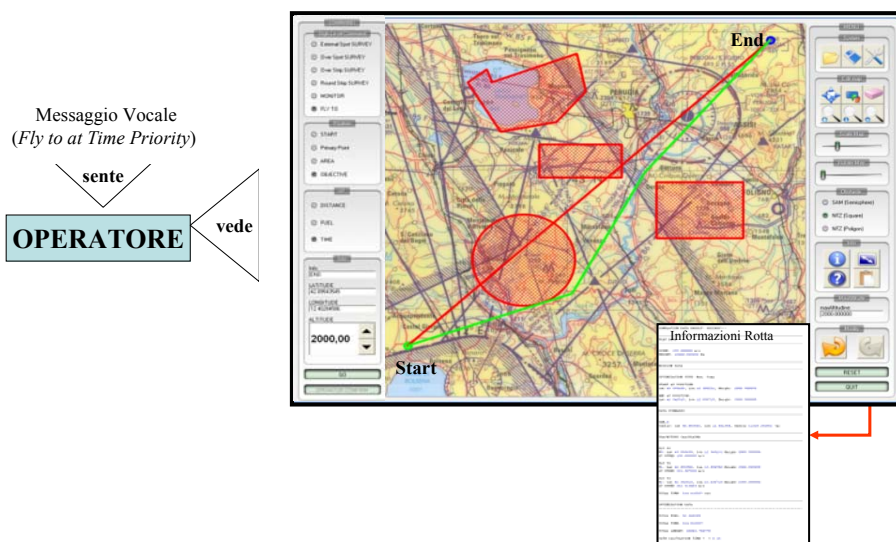


Figura III.18. Feedback sul comando inviato

Tali feedback sono necessari per dare tutte le informazioni necessarie all’operatore per decidere se accettare o meno il suggerimento del velivolo. Se l’operatore non dovesse accettare il suggerimento può fissare waypoint dai quali deve passare la rotta oppure, nel peggiore dei casi, può cambiare l’obiettivo della missione. Se invece accetta il suggerimento, preme il pulsante *Operator Confirm*, e la rotta viene

assunta dal velivolo come rotta di riferimento e viene visualizzata sullo display 3D. L'operatore ha così due visualizzazioni del volo: una stereoscopica attraverso il 3D virtual display e un'altra sul touchscreen (Figura III.19).

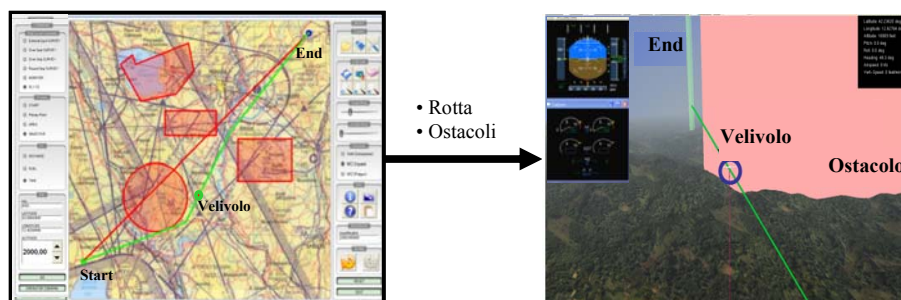


Figura III.19. Visualizzazione del volo

La Figura III.19 riporta il caso di comando di conduzione. In essa:

- con *End* si indica il punto verso cui il velivolo si sta dirigendo che viene rappresentato con un poliedro “infinitamente” alto: in questo modo l'operatore può avere costantemente sott'occhio la posizione del velivolo rispetto al target.
- con *Start* si indica la posizione del velivolo nel momento in cui riceve il comando;
- con *Velivolo* si indica il velivolo in movimento.

In aggiunta al feedback uditivo sul comando inviato, per aumentare il livello di situation awareness dell'operatore sono stati aggiunti anche altri due tipi di feedback uditivi, utili all'operatore durante l'esecuzione della missione: il primo feedback notifica all'operatore una eventuale modifica dello scenario, il secondo, invece, lo informa sull'esecuzione del comando. L'importanza dei feedback uditivi risiede nel fatto che il sistema uditivo è omnidirezionale: l'attenzione dell'operatore viene richiamata da un segnale uditivo, contrariamente a quanto accade con i segnali visivi, indipendentemente da cosa sta facendo o dove sta guardando. È stato dimostrato che coinvolgere anche l'udito migliora le prestazioni dell'operatore in quanto porta ad una riduzione del tempo di risposta [7]. Un altro canale che si sarebbe potuto coinvolgere nel fornire informazioni all'operatore è quello tattile. Ma la stimolazione tattile, quando si utilizzano già canali visivi e uditivi, né migliora né degrada le prestazioni dell'operatore almeno fino a quando l'ambiente in cui si trova l'operatore, la stazione

di controllo e l'ambiente attorno ad essa, non raggiunge elevati livelli di rumore tali da coprire i segnali sonori [7].

III.4.2.1 Il supporto del Pannello di Comando

Come si può vedere dalla Figura III.20 il touchscreen è poggiato su un supporto, che permette all'operatore di variare l'inclinazione dello schermo secondo le proprie "esigenze fisiche". L'uso di questo supporto ha i seguenti vantaggi.

- Lo schermo non disturba l'operatore nella fase di monitoraggio della missione (Figura III.20).



Figura III.20. Monitoraggio della missione

- Possibilità di avere bassi livelli di fatica: avere il touchscreen inclinato permette di avere una posizione ed un movimento "più naturale" delle mani (Figura III.21.).

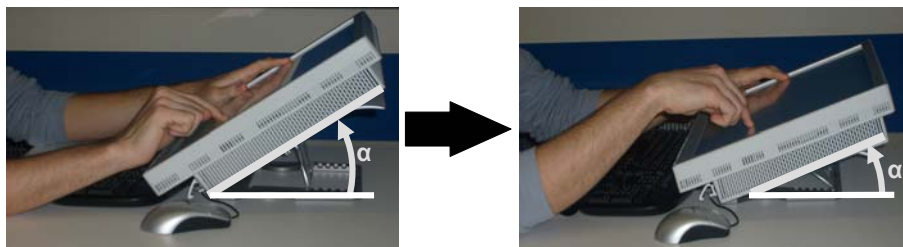


Figura III.21. Variazione dell'inclinazione del touchscreen (rifai foto)

- Possibilità di ottenere tempi brevi per inviare il comando: l'operatore utilizza la mano sinistra per selezionare le diverse opzioni del comando, mentre con la mano destra manipola la mappa e seleziona la "location" (Figura III.22).



Figura III.22. L'invio del comando

Considerando le mani come strumenti di puntamento, con la legge di Fitts si può avere una stima del tempo necessario per inviare il comando. La principale implicazione di tale legge è che la velocità di movimento delle mani dipende da due aspetti principali: la distanza che devono coprire le due mani per raggiungere l'oggetto (i pulsanti per l'invio dei comandi oppure la generica location sullo schermo) e la grandezza dell'oggetto. Se si indica con A l'ampiezza del movimento della mano, con W la larghezza dell'oggetto, la legge di Fitts permette di stimare il tempo necessario per eseguire il movimento (*Movement Time*):

$$MT = a + b \cdot \log(2A/W)$$

dove

- $2A/W$ = indice di difficoltà del movimento,
- a, b = due costanti che dipendono dal particolare strumento utilizzato per inviare il comando (nel caso specifico il touchscreen).

Facendo semplici calcoli è facile dimostrare che, a parità di movimento, più grande sarà l'oggetto più piccolo sarà l' MT ; viceversa, a parità di larghezza

dell'oggetto, più piccolo sarà il movimento richiesto per raggiungere l'oggetto più piccolo sarà l' MT .

Considerando solo la mano destra si ha che l'ampiezza del suo movimento, a partire dalla sua posizione in fase di monitoraggio della missione, dipende dall'angolo di inclinazione del touchscreen (angolo α in Figura III.23): minore sarà tale inclinazione, minore sarà l'ampiezza del movimento che deve compiere la mano e quindi minore sarà il tempo impiegato per inviare il comando (Figura III.23).

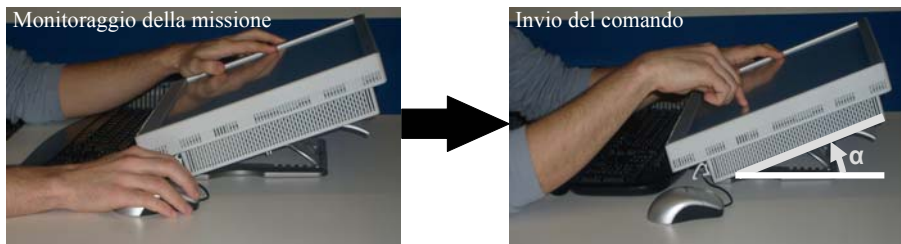


Figura III.23. Dal monitoraggio all'invio del comando

III.5 Il modello velivolo

Il modello velivolo utilizzato per testare l'algoritmo può essere visto come una scatola che riceve in input la rotta calcolata dal planning algorithm e ha come output i parametri di volo del velivolo. Esso è rappresentato dal blocco definito Flight Module in Figura III.5., che qui si riporta per maggior chiarezza.

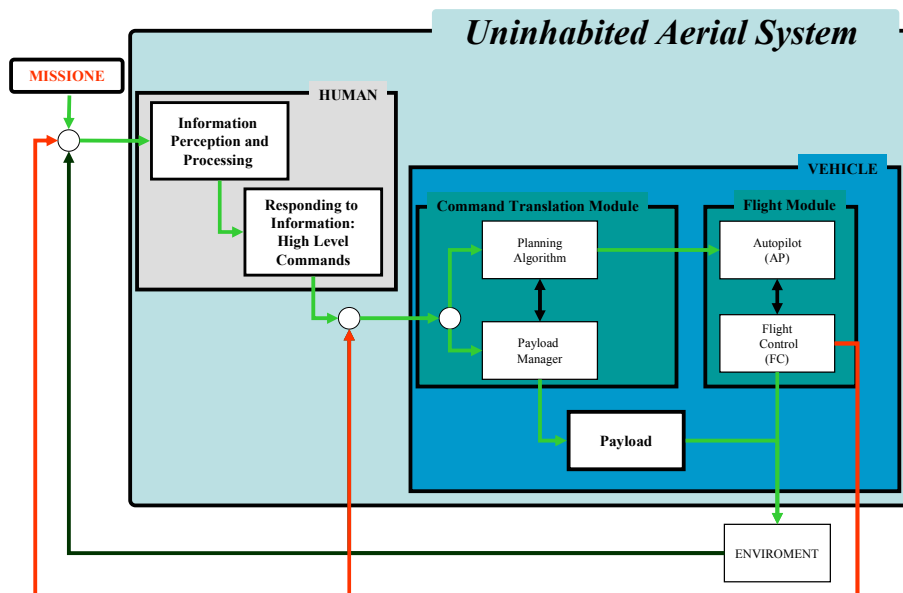


Figura III.24. Architettura del sistema UAV

Dalla figura si può isolare il modulo rappresentativo del modello velivolo ed evidenziare i suoi input (la rotta) e i suoi output (i parametri di volo) che vengono spediti sia al planning algorithm sia all'interfaccia per la visualizzazione (Figura III.25).

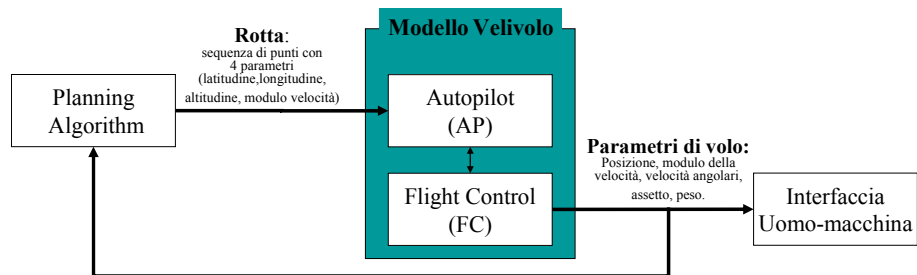


Figura III.25. Il modello velivolo

Capitolo IV - L'algoritmo per il calcolo delle rotte

IV.1 Introduzione

Il livello di automazione definito “*supervisory control*” prevede che il velivolo diventi capace di tradurre i comandi di alto livello in comandi di più basso livello come rotte di volo e azioni di controllo. Per permettere al velivolo di acquisire la capacità di calcolare le rotte di volo è stato sviluppato un algoritmo, definito *planning algorithm*.

L'algoritmo è stato sviluppato partendo dalla definizione dei requisiti che avrebbe dovuto soddisfare e da una ricerca bibliografica relativa alle diverse metodologie utilizzate per sviluppare algoritmi in grado di innalzare il grado di autonomia dei velivoli [34],[35],[36],[37],[38],[39],[40],[41],[42]. Successivamente sono state sviluppate singole parti di codice che dovevano soddisfare un numero limitato di requisiti (rispondenza ai diversi comandi dell'operatore, dal più semplice al più complesso, non collisione con gli ostacoli, rispetto dei limiti prestazionali del velivolo) fino ad arrivare ad una sua versione finale affidabile ed in grado di soddisfare tutti i requisiti prefissati nella parte di studio concettuale.

IV.2 Il principio di funzionamento del *Planning Algorithm*

Il *planning algorithm* fornisce al velivolo la capacità di *calcolo autonomo di rotte di volo*, cioè gli fornisce i mezzi necessari per eseguire il comando dell'operatore oppure per reagire a cambiamenti improvvisi dello scenario. Le rotte calcolate sono sicure, perché evitano gli ostacoli, e sono compatibili con le prestazioni del velivolo. Le prestazioni del velivolo, come il rateo di salita o di discesa, gli angoli di rampa, il minimo raggio di virata, le velocità massime, la massima quota sono fornite sotto forma di tabelle che l'algoritmo consulta per calcolare rotte “volabili”. Inoltre, poiché tali parametri dipendono dal peso e dalla quota di volo, il consumo di combustibile viene continuamente stimato e lo stato del velivolo aggiornato.

Come riportato in Figura IV.1 l'algoritmo, a partire dal comando dell'operatore, dalle tabelle prestazionali del velivolo, dal data base dello scenario (che contiene tutti i dati relativi allo scenario di missione noti), e dalle informazioni che gli arrivano durante la missione riguardanti lo stato del velivolo (posizione, velocità e peso) e l'evoluzione dell'ambiente, calcola la rotta che il velivolo deve seguire. Tale rotta, che rispetta il criterio di priorità fissato dall'operatore, ed un insieme di condizioni al contorno, è rappresentata da una serie di punti caratterizzati da 4 parametri:

- latitudine,
- longitudine,
- altitudine,
- modulo della velocità di passaggio.

Le condizioni al contorno che devono essere rispettate sono:

- orografia del terreno;
- vincoli di aggiramento di zone in cui è interdetto il volo;
- vincoli di non collisione con eventuali ostacoli presenti nello scenario operativo, che possono essere o edifici oppure semisfere (*bubble*²⁶) di raggio fissato.
- vincoli prestazionali del velivolo.

I criteri di priorità consistono nel privilegiare un parametro di *performance* del velivolo. Nel caso specifico la rotta finale è la più efficiente in termini di:

- distanza percorsa;
- tempo impiegato;
- combustibile consumato.

²⁶ Le *bubble* vengono spesso considerate in missioni militari. Esse rappresentano il raggio di azione dei missili terra-aria, utilizzati per proteggere postazioni militari strategiche.

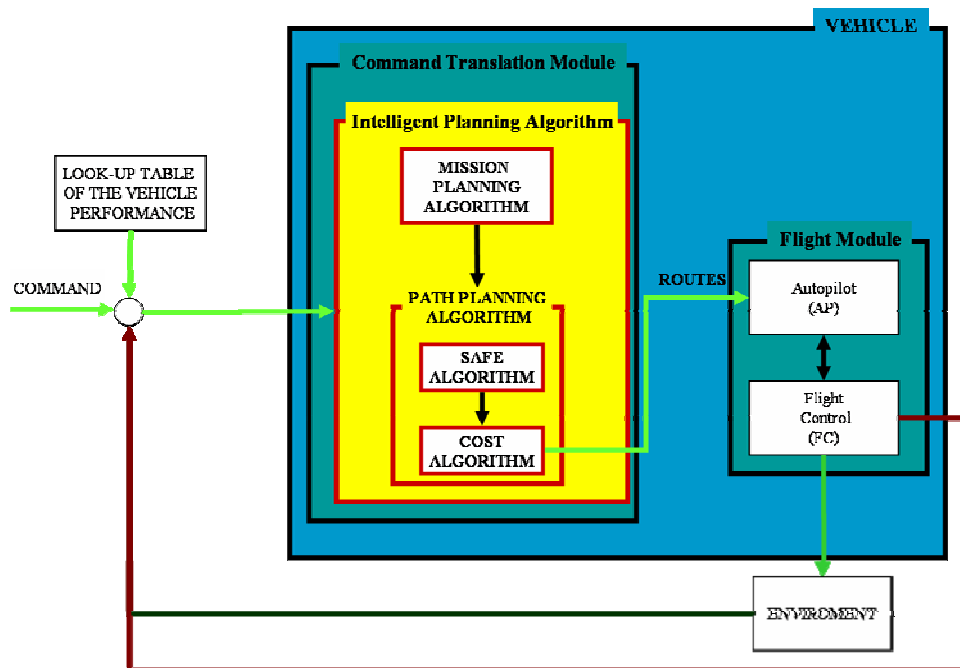


Figura IV.1. Il Planning Algorithm

Il planning algorithm è costituito da due algoritmi che, partecipano a diversi livelli, al calcolo della rotta finale.

- *Il Mission Planning Algorithm* che calcola una serie di waypoint nello spazio, chiamati *Primari Mission Waypoints (PMW)*, dai quali deve passare la rotta.
- *Path Planning Algorithm* che calcola, tra ogni coppia di PMW, una sequenza di punti caratterizzati da quattro parametri (longitudine, latitudine, altitudine e velocità di attraversamento del punto) in modo da ottenere rotte che tengono conto dello scenario e delle prestazioni del velivolo. Il calcolo della sequenza di punti viene eseguito da due sub-algoritmi:
 1. il *safe algorithm* che calcola un set di waypoint che, connessi, formano percorsi sicuri, che evitano gli ostacoli, tra gli estremi della coppia di PMW;
 2. il *cost algorithm* che, per ogni percorso sicuro, manipola la posizione dei suoi punti e assegna loro, in base alle prestazioni del velivolo e in base alla priorità di missione, la velocità di passaggio. Infine, l'algoritmo seleziona il percorso più efficiente, definito *Macroleg*, in termini di distanza, tempo o combustibile consumato che unisce gli estremi di ogni coppia di PMW.

Alla fine, la rotta globale che il velivolo deve assumere come riferimento per eseguire il comando dell'operatore, è costituita dalle Macroleg che uniscono le coppie di PMW.

Data la dinamicità dello scenario in cui le missioni vengono eseguite, l'algoritmo è stato progettato in modo da essere capace di ricalcolare la rotta ogni volta che si verifica un cambiamento dello scenario stesso. In questo caso il data base, in cui sono contenute le informazioni dello scenario prima dell'inizio della missione, viene aggiornato in modo che l'algoritmo riceva nuovi input e calcoli una nuova rotta in funzione di tale cambiamento.

Una caratteristica importante dell'algoritmo è la sua adattabilità a diversi velivoli: si possono utilizzare velivoli diversi semplicemente cambiando le tabelle prestazionali.

IV.2.1 La modellazione dell'ambiente

Il data base dello scenario viene costruito prima che inizi la missione. Esso è una replica virtuale del mondo reale ottenuto modellando le componenti principali dello scenario reale, quali l'orografia del terreno, ostacoli, zone in cui è interdetto il volo. Ognuna di esse è rappresentata nel mondo virtuale da modelli *mesh-based*. Per la loro modellazione sono state utilizzate delle primitive, come sfere, poligoni estrusi e punti *mesh*.

La superficie del terreno è stata modellata usando come primitive i punti *mesh* in modo da ottenere *mesh* quadrangolari (Figura IV.2.a). Gli altri elementi vengono invece modellati da *mesh* triangolari. In particolare, i modelli che rappresentano gli edifici oppure i confini di zone in cui non è permesso il volo, definite No Fly Zone, sono poligoni estrusi nella direzione verticale aventi differenti profili come base. Tali modelli hanno come parametri il numero di vertici della base e le loro coordinate, longitudine, latitudine e altitudine. L'altezza dei poliedri dipende dal tipo di ostacolo: il poliedro che modella una No Fly Zone ha un'altezza maggiore della quota di tangenza teorica del velivolo, mentre quello che modella un edificio ha un'altezza pari a quella dell'edificio stesso (Figura IV.2.b). Anche le *bubble* sono rappresentate da semisfere formate da *mesh* triangolari. Queste hanno il raggio della *bubble* e le coordinate del suo centro come parametri (Figura IV.2.c).

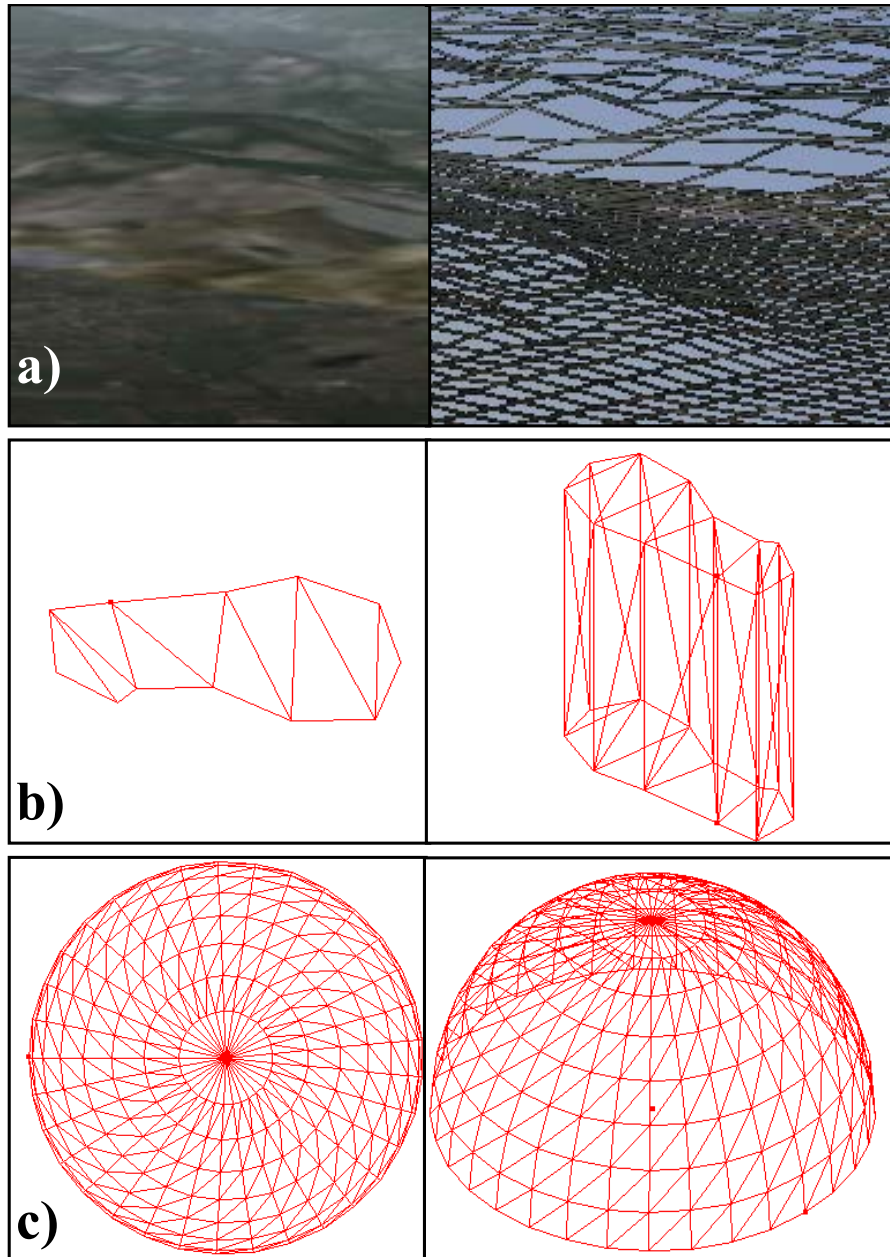


Figura IV.2. Il mondo digitale

IV.2.2 Il Mission Planning Algorithm

Il *Mission Planning Algorithm* calcola punti definiti *Primary Mission Waypoint*, per i quali deve passare la rotta di missione. Le modalità con cui tali punti vengono calcolati dipendono dal comando ricevuto.

IV.2.2.1 Il comando di Survey: set di obiettivi

Per comandare il velivolo a sorvegliare un set di obiettivi l'operatore invia al velivolo le seguenti istruzioni:

- Survey;
- WP_1, WP_2,.....WP_N;
- Priority.

Se l'operatore vuole che il velivolo esegua la missione privilegiando per esempio il combustibile invia il seguente comando:

“Survey WP_1, WP_2, WP_3, WP_4 at fuel priority”.

In questo caso la sequenza dei *Primary Mission Waypoint* coincide con la sequenza di punti inviati dall'operatore. In Figura IV.3 è rappresentato il caso semplice di scenario in cui non vi sono né ostacoli né No Fly Zone da evitare: la rotta finale è rappresentata dalla spezzata che connette i waypoint, a cui il *Path Planning Algorithm* assegna la velocità.

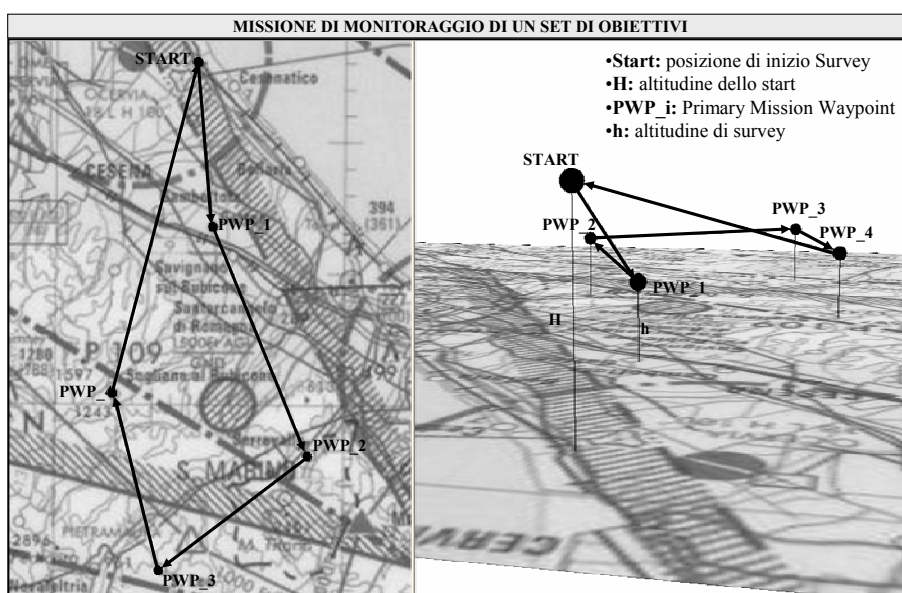


Figura IV.3. Survey di un set di obiettivi

IV.2.2.2 Comando di Survey: Target

Quando l'operatore vuole che il velivolo sorvegli un target, può decidere, in base alla posizione del target, diverse modalità di sorveglianza. Sono stati sviluppate le seguenti modalità di sorveglianza:

- SpotSurvey:
 - External SpotSurvey;
 - Over SpotSurvey.

- StripSurvey:
 - Over StripSurvey;
 - Round StripSurvey.

External SpotSurvey:

Questo tipo di comando implica che l'algoritmo calcoli due punti, PMW_1 e PMW_2 in Figura IV.4., la cui congiungente si trova ad un'opportuna distanza dal target da sorvegliare, che dipende dal payload, detta *offset*. La posizione dei due punti dipende anche dal parametro di survey *dist* che stabilisce quanto lunga deve essere la tratta per il survey. Tale parametro viene fissato dall'operatore e dipende dal tipo di payload del velivolo, dal tipo di target, dalla sua posizione e dalle condizioni atmosferiche.

Over SpotSurvey:

Questa modalità di survey deriva dalla precedente quando l'offset è nullo. A differenza della modalità precedente, questa modalità implica che il velivolo passi sopra il target da sorvegliare (Figura IV.4.).

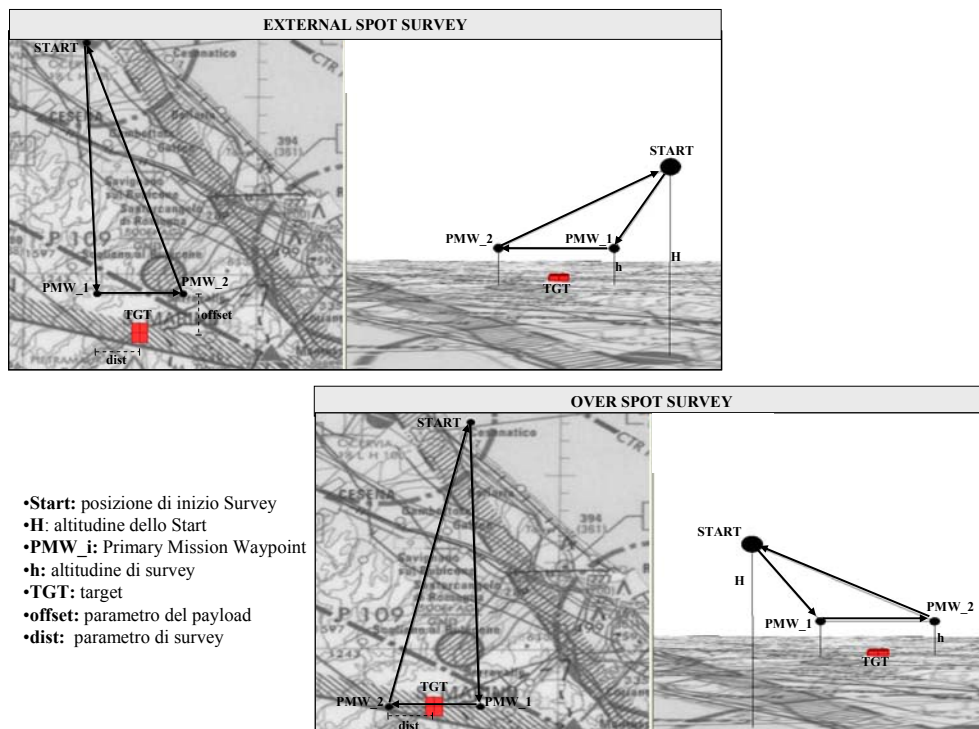


Figura IV.4. SpotSurvey di un Target

Over StripSurvey;

Questa modalità di survey (Figura IV.5.) implica che l'algoritmo calcoli tre punti, PMW_1, PMW_2 e PMW_3 in modo che il velivolo compia una strisciata di immagini sopra il target in direzione parallela alla sua direzione di avanzamento e ritorni nel punto in cui ha ricevuto il comando. Il PMW_3 è un waypoint che corrisponde al raggio minimo di virata.

Round StripSurvey;

Questa modalità di survey calcola una serie di *Primary Mission Waypoint* che richiedono al velivolo di girare attorno al target (Figura IV.5.).

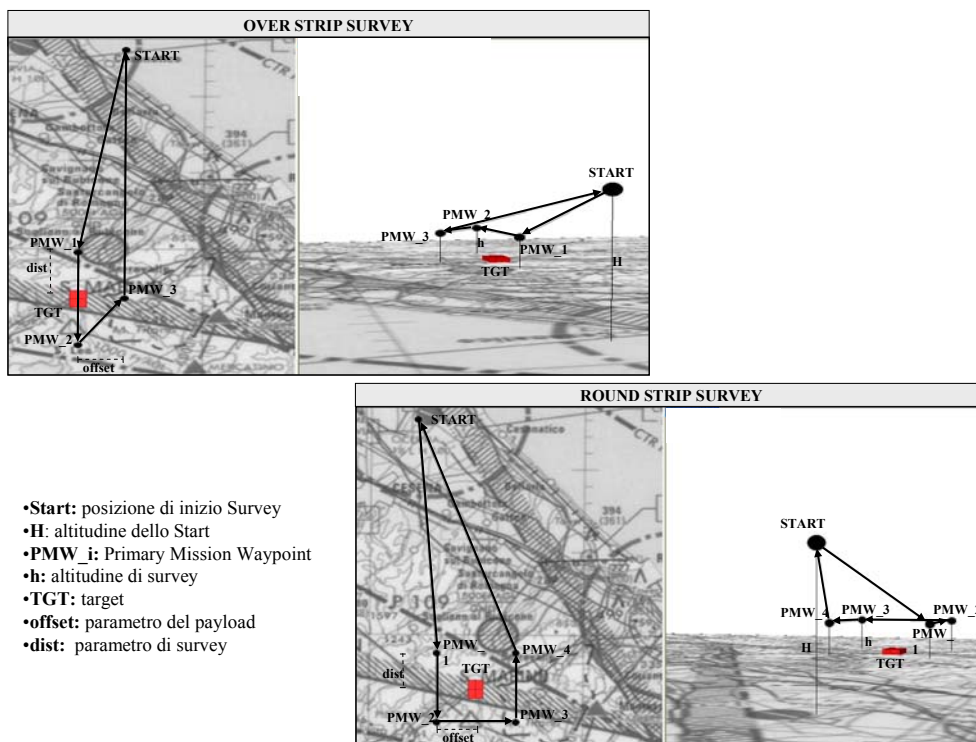


Figura IV.5. StripSurvey di un Target

IV.2.2.3 Il Comando di Survey: Area rettangolare

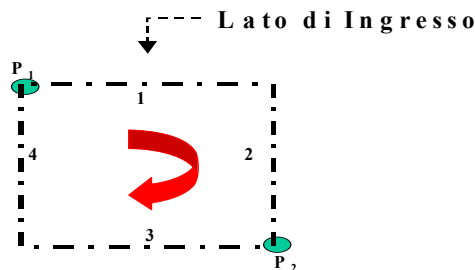
Per il comandare il velivolo a monitorare un'area (rettangolare), l'operatore invia le seguenti istruzioni:

1. monitor,
2. vertici opposti dell'area,
3. priority.

Oltre tali istruzioni l'operatore può indicare al velivolo un punto in cui il velivolo deve recarsi dopo aver eseguito il comando. Se non lo indica, il punto finale della manovra di survey è il punto in cui il velivolo riceve il comando.

Per il calcolo dei PMW, l'algoritmo segue i seguenti step:

1. definisce qual'è il *lato di ingresso*(LI) dell'area in base alla posizione e alla velocità del velivolo.
2. calcola la lunghezza del lato d'ingresso;



3. calcola il rapporto tra il lato di ingresso e una lunghezza, definita *scan length*, definita all'inizio della missione, che dipende dai parametri del sensore utilizzato e rappresenta l'ampiezza di una singola scansione;
4. definisce il numero di scansioni che il velivolo deve compiere per monitorare l'intera area.
5. calcola il numero di PMW:

$$\text{Num. PMW} = 2 * \text{NumScansione}$$

Nell'esempio riportato in Figura IV.6. il velivolo deve eseguire tre strisciate per coprire l'intera area. Il punto PMW_7 è il punto dove il velivolo deve portarsi dopo aver monitorato l'area.

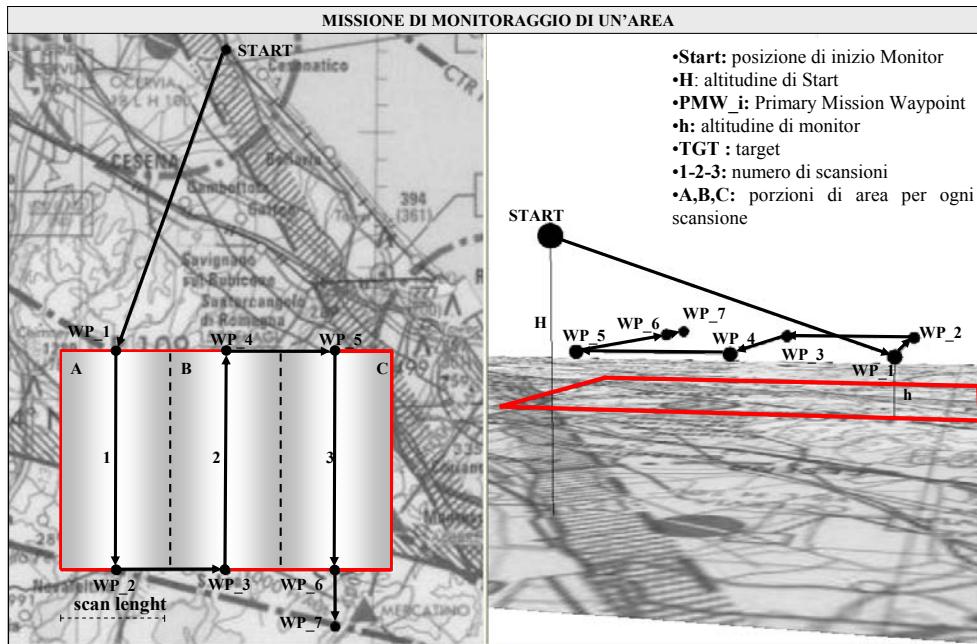


Figura IV.6. Monitor di un'Area rettangolare

IV.2.2.4 Il comando di conduzione: *FlyTo*

Il comando di conduzione rappresenta il comando base dei comandi di alto livello. Per inviare tale comando l'operatore seleziona le seguenti istruzioni:

1. *FlyTo*,
2. *Punto di Destinazione*,
3. *Priority*.

In questo caso l'unico *Primary Mission Waypoint* coincide con il punto di destinazione. La rotta globale è quindi costituita da un'unica macroleg che unisce il punto in cui il velivolo riceve il comando e il punto di destinazione.

IV.2.3 Il path planning algorithm

Il *path planning algorithm* calcola il percorso più sicuro ed efficiente in termini di distanza, tempo o combustibile che connette ogni coppia di PMW. Tale percorso è rappresentato da una spezzata che unisce una sequenza di punti caratterizzati da quattro parametri:

- longitudine,
- latitudine,
- altitudine,
- modulo della velocità di passaggio.

Il calcolo del percorso avviene in due fasi in cui operano un algoritmo chiamato *Safe Algorithm* e un algoritmo chiamato *Cost Algorithm*.

Per spiegare come funziona l'algoritmo si suppone che il comando da tradurre sia quello di conduzione: il primo punto della macroleg è il punto in cui si trova il velivolo nel momento in cui riceve il comando, mentre il secondo punto è il punto di destinazione.

IV.2.3.1 Il safe algorithm

Il *safe algorithm* è il modulo che riceve in input il comando impartito dall'operatore e, in funzione dello stato del velivolo e della configurazione dello scenario, fornisce un insieme di percorsi sicuri(*safe path*), come sequenze ordinate di punti. L'algoritmo si basa sulla discretizzazione dello spazio in un insieme di piani che sezionano lo scenario e sul calcolo, su ognuno di essi, di un insieme di percorsi che evitano gli ostacoli secondo diverse strategie (sorvolo e diverse modalità di aggiramento). In questo modo, almeno in questa fase, il problema del calcolo dei percorsi sicuri viene ridotto ad un problema bidimensionale.

In Figura IV.7. è riportata la procedura seguita dal *safe algorithm* per il calcolo dei percorsi in uno scenario semplificato. In figura le sfere rosse rappresentano le bubble, il punto *Start* la posizione in cui si trova il velivolo nel momento in cui riceve il comando, e il punto *End* il punto di destinazione verso cui il velivolo deve dirigersi.

Gli step seguiti dall'algoritmo sono i seguenti (Figura IV.7.):

1. generazione di un fascio di piani ottenuto dalla rotazione per angoli discreti di un piano passante per la retta congiungente lo Start con l'End (Figura IV.7.2 -Figura IV.7.5);
2. calcolo delle intersezioni piane tra gli ostacoli e ogni fascio del piano (Figura IV.7.6 - Figura IV.7.7);
3. determinazione, su ogni piano, di un set di percorsi che evitano gli ostacoli (*safe path*) (Figura IV.7.8 - Figura IV.7.9).

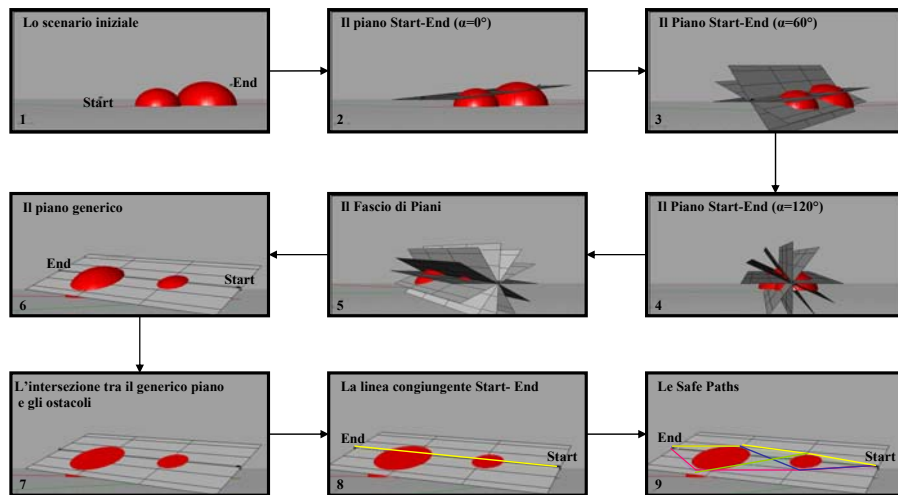


Figura IV.7. Il Safe Algorithm

I percorsi sono generati su ogni piano seguendo strategie per evitare gli ostacoli basate sul un loro aggiramento oppure su un loro sorvolo. Essi sono calcolati connettendo segmenti che sono iterativamente selezionati connettendo lo Start, l'End e i vertici di poligoni che includono gli ostacoli. In Figura IV.8. è riportata la procedura seguita dall'algorithmo per calcolare i percorsi nel piano con $\alpha=0^\circ$ ²⁷. Tale procedura include i seguenti step:

1. i profili degli ostacoli sono inclusi in poligoni distanti da essi di un quantità fissata;
2. la retta congiungente lo Start e l'End viene calcolata (la linea verde in Figura IV.8.1) come soluzione di primo tentativo;
3. poiché tale retta interseca il primo ostacolo, si considerano percorsi passanti per i vertici dei poligoni: la sequenza {START, P₁, END} è il primo percorso calcolato per aggirare l'ostacolo da sinistra, mentre la sequenza {START, P_A, END} è il percorso calcolato per aggirarlo da destra (Figura IV.8.2);
4. dal momento che anche questi percorsi intersecano gli ostacoli, alle sequenze di punti si aggiungono i vertici P₂ e P_B ottenendo le sequenze {START, P₁, P₂, END} per l'aggiramento da sinistra e {START, P_A, P_B, END} per l'aggiramento da destra (Figura IV.8.3); poiché le rette congiungenti lo Start con P₂ e lo Start con P_A non intersecano gli ostacoli i punti P₁ e P_A possono essere eliminati in modo da ottenere

²⁷ L'angolo di rotazione $\alpha=0^\circ$ si ha quando il piano passa per la retta passante per Start, perpendicolare alla retta congiungente lo Start con l'End e parallela al terreno.

rispettivamente le sequenze {START, P_2, END} per l'aggiramento a sinistra e {START, P_B, END} per l'aggiramento a destra;

5. questa procedura è ripetuta fino a quando non vengono trovati percorsi sicuri (Figura IV.8.4-Figura IV.8.6).

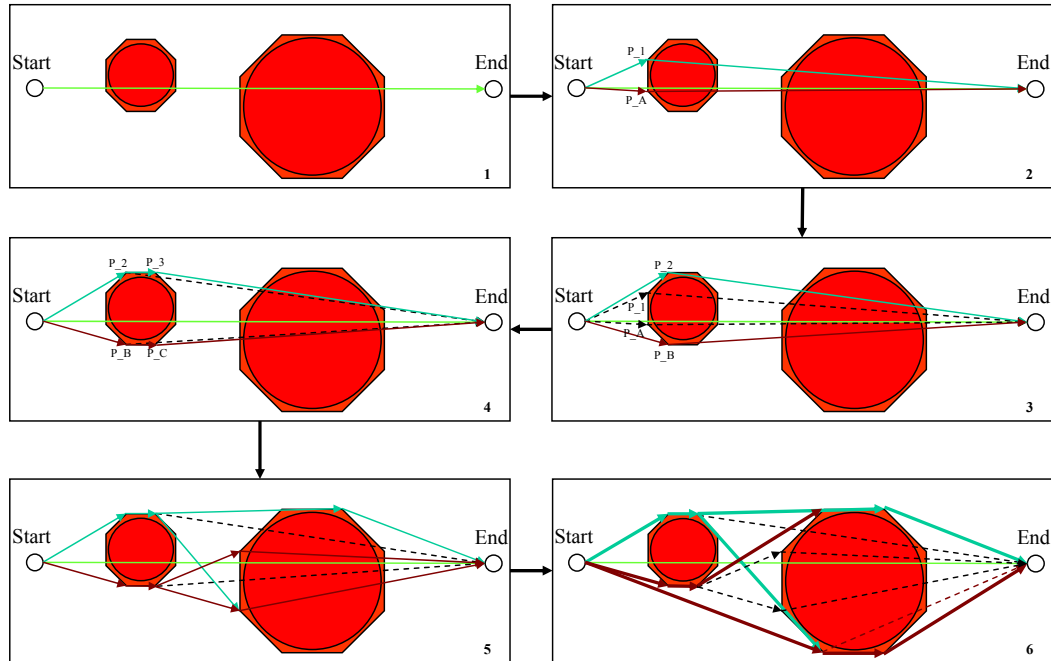


Figura IV.8. Il safe algorithm: calcolo dei percorsi sicuri con $\alpha=0^\circ$

IV.2.3.2 Il cost algorithm

Il *cost algorithm* riceve le *safe path* dal *safe algorithm* sotto forma di sequenza di waypoint. Assumendo che il punto di partenza di ogni percorso abbia coordinate (x_s, y_s, z_s) , che il punto di destinazione abbia coordinate (x_t, y_t, z_t) e che (x_i, y_i, z_i) siano le coordinate dell'i-esimo waypoint, la generica *safe path* può essere rappresentata da (Figura IV.9.):

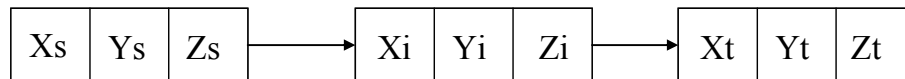


Figura IV.9. La generica safe path

La funzione del *cost algorithm* è quella di analizzare i percorsi ricevuti per verificare che essi siano compatibili con le prestazioni del velivolo, riposizionare nello spazio i waypoint del percorso, assegnare loro la velocità di passaggio del velivolo ed, infine, selezionare il percorso più efficiente.

Il riposizionamento dei waypoint viene eseguito in modo da ottenere rotte di volo costituite da un tratto in salita, un tratto in crociera ed un tratto in discesa.

L'algoritmo è composto di tre routine:

- *Feasibility Routine*: verifica che le *safe path* ricevute rispettino i vincoli posti dalle prestazioni del velivolo.
- *Efficiency Routine*: elabora ogni *safe path* e calcola un percorso, chiamato *fly path*, che è consistente con le prestazioni del velivolo e rispetta la priorità selezionata dall'operatore.
- *Global Routine*: confronta i costi di ogni *fly path* e seleziona quella che costa meno in termini della priorità selezionata.

IV.2.3.2.1 Feasibility routine

La routine verifica la “fattibilità” dei percorsi trovati sia nel piano verticale sia nel piano orizzontale, quindi sia per una variazione di quota, salita o discesa, sia per un cambio di direzione (virata).

Variazioni di quota

Dato un percorso che prevede una variazione di quota, quindi il volo in un piano verticale, la routine verifica che gli angoli di rampa richiesti siano compatibili con le prestazioni del velivolo. Questo significa che la routine confronta l'angolo di salita richiesto dalla *safe path* con l'angolo di rampa massimo [43], calcolato utilizzando le tabelle prestazionali, che indica il valore limite al di sopra del quale il velivolo non è in grado di eseguire la salita richiesta. Percorsi che contengono tratti troppo ripidi verranno dunque scartate.

Si consideri il caso riportato in Figura IV.10.: il primo segmento della *safe path* ricevuta, che congiunge il punto iniziale (Start) con il waypoint Wp_1, richiede un angolo di salita pari a γ_s .

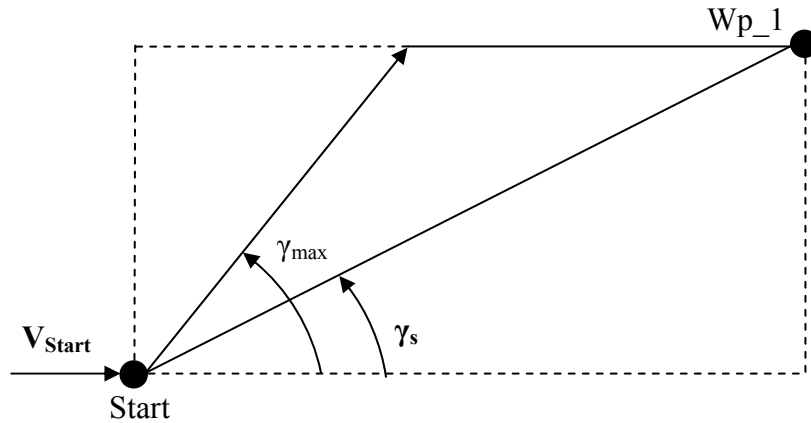


Figura IV.10. Salita iniziale

La verifica di fattibilità consiste nel confrontare l'angolo γ_s con l'angolo di rampa massimo del velivolo, γ_{max} , che dipende dalla quota, dal peso e dalla velocità del velivolo nel punto di partenza: se l'angolo richiesto dalla *safe path* è maggiore di quello ammissibile per il velivolo (es: $\gamma_s > \gamma_{max}$), la *safe path* viene scartata, se invece è minore (es: $\gamma_s \leq \gamma_{max}$) la *safe path* viene spedita all'*efficiency routine*.

Le virate

Per illustrare come vengono effettuate le verifiche sulle virate si considera una generica *safe path* in un piano orizzontale ($\alpha=0^\circ$) (Figura IV.11.):

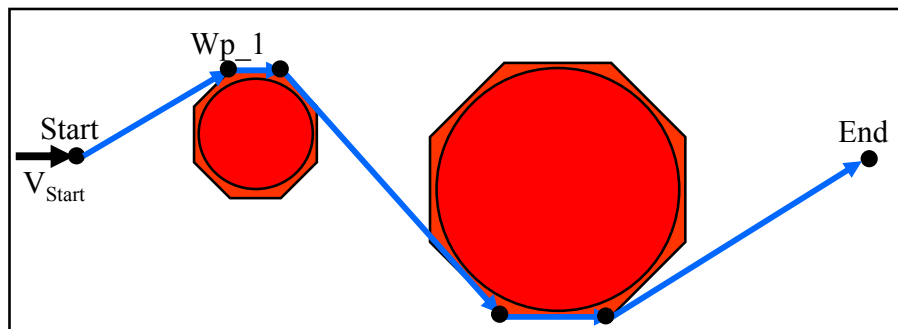


Figura IV.11. Una Safe Path nel piano orizzontale

La *feasibility routine* calcola il raggio di virata e il corrispondente arco di circonferenza che il velivolo deve percorrere per portarsi da un waypoint ad un altro e verifica che tale arco non entri in aree interdette al volo (es. dallo Start al WP_1 in Figura IV.11). Per il calcolo del raggio di virata si impongono al velivolo manovre di virata corretta [43] con un fattore di carico fissato come parametro.

Se si indica il fattore di carico di virata con n_{rm} e il fattore di carico massimo, cioè quello che il velivolo può sopportare nello stato in cui si trova, con n_{max} , deve valere sempre la relazione:

$$n_{rm} \leq n_{max}$$

Nel seguito si analizza cosa succede nel primo segmento della *safe path* riportata in Figura IV.11.: il velivolo dal punto in cui si trova (Start) deve portarsi sul waypoint Wp_1.

Utilizzando il diagramma di manovra [43] la routine calcola la velocità con cui il velivolo può effettuare una virata con un fattore di carico pari a n_{rm} . (Figura IV.12.).

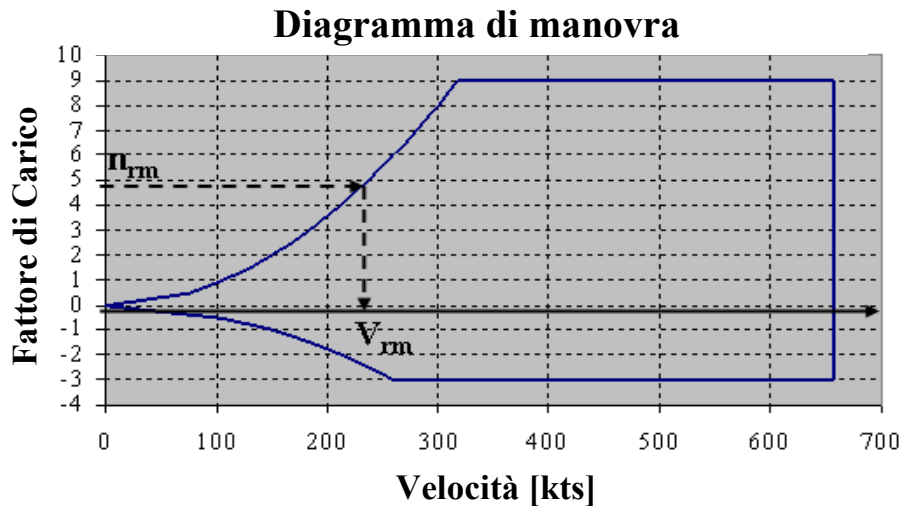


Figura IV.12. Diagramma di manovra

$$V(n_{rm}) = \sqrt{\frac{2 * n_{rm} * W}{C_{Lmax} * \rho * S}}$$

dove:

- W: peso del velivolo;
- C_{Lmax} : coefficiente di portanza massima;
- ρ : densità dell'aria;
- S: superficie alare.

Indicando con V_s la velocità di stallo, con V_{lim} la velocità limite e con V_r la velocità del velivolo, si possono distinguere due casi:

- $V_s < V_r < V(n_{rm})$
- $V(n_{rm}) < V_r < V_{lim}$

Si analizzano i due casi.

Caso:

$$V_s < V_r < V(n_{rm})$$

Quando la velocità del velivolo è minore di $V(n_{rm})$ bisogna calcolare il fattore di carico corrispondente a quella velocità (Figura IV.13.) e, da esso, calcolare il raggio di virata:

$$n = \frac{\rho * S * C_{L_{max}} * V_r^2}{W}$$

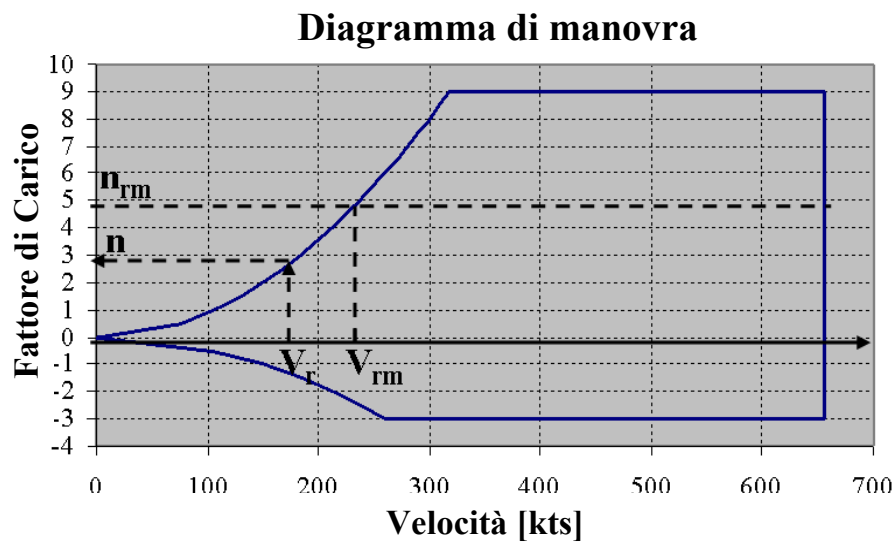


Figura IV.13. Calcolo fattore di carico per velocità inferiori a V_{rm}

$$r = \frac{V_r^2}{g * \sqrt{n^2 - 1}}$$

Caso:

$$V(n_{rm}) < V_r < V_{lim}$$

Quando la velocità di volo del velivolo è maggiore di quella a cui si può avere un fattore di carico pari a quello fissato, n_{rm} , il raggio di virata è calcolato utilizzando tale fattore di carico (Figura IV.14).

Diagramma di manovra

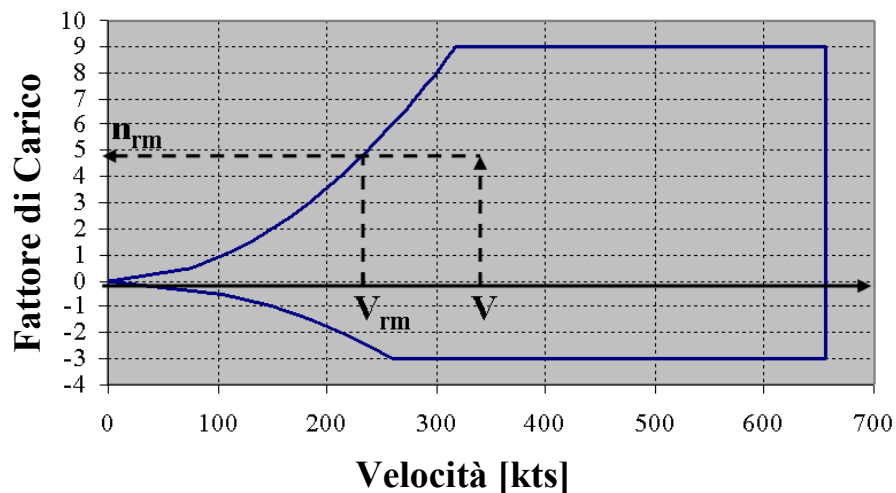


Figura IV.14. Diagramma di manovra: fattore di carico di virata

$$r = \frac{V_r^2}{g * \sqrt{n_{rm}^2 - 1}}$$

Calcolato il raggio di virata, l’algoritmo ricava il segmento curvilineo che il velivolo deve percorrere per portarsi sulla congiungente il punto di partenza e il waypoint successivo. Se questo arco non interseca una zona interdotta la rotta viene analizzata dall’*efficiency routine*. In caso contrario, si riduce la velocità e di conseguenza il raggio di virata, fino a che l’arco corrispondente non si trovi completamente all’esterno dell’ostacolo. La *safe path* viene considerata “non fattibile”, e dunque viene scartata, nel caso in cui la velocità necessaria per ottenere un arco esterno all’ostacolo è inferiore a quello di stallo.

IV.2.3.2.2 Efficiency routine

Una volta che la *safe path* è stata verificata viene manipolata dall'*efficiency routine*.

Nel caso più generale possibile tale *safe path* giace su un piano inclinato di un angolo α ed è costituita da una sequenza di tratti che impongono variazioni di quota e variazioni di direzione. Nel caso rappresentato in Figura IV.15, essa è formata dai waypoint wp_1 e wp_2 , oltre che, naturalmente, dal punto di partenza (*Start*) e di destinazione (*End*). L'*efficiency routine* elabora ciascuna delle *safe path* "fattibili" ridisponendone i waypoint nello spazio in modo da avere una *fly path* compatibile con le prestazioni del velivolo e con la priorità scelta dall'operatore. Gli angoli di rampa e i cambi di direzione richiesti dalla *safe path*, vengono adattati, sempre rispettando i vincoli di non collisione, alle caratteristiche del velivolo e all'indice di priorità prescelto. In base a quest'ultimo una stessa *safe path* potrà essere manipolata in modo da ottenere diverse *fly path*, sia per la posizione dei waypoint sia per la velocità ad essi associata (Figura IV.15).

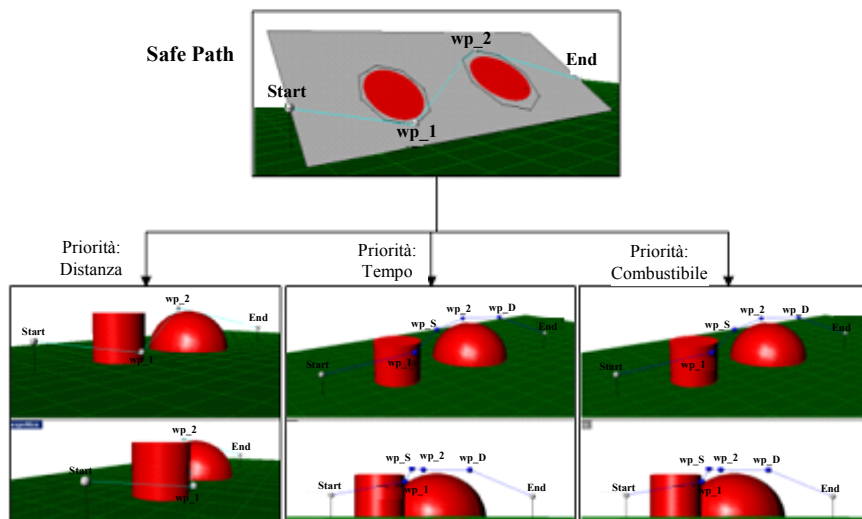


Figura IV.15. Generazione delle *fly path*

Priorità: Distanza

La *fly path* che privilegia la distanza viene ricavata dalla *safe path* semplicemente assegnando ai suoi waypoint i valori di velocità. Per comprendere come lavora l'algoritmo si considera la generica coppia di punti costituita dall'*i-esimo* waypoint (wp_i) e dall'*i+1-esimo* waypoint (wp_{i+1}): il wp_i , in cui si conosce lo stato del velivolo, è il punto di partenza dell' *i-esimo* segmento, mentre il wp_{i+1} è il punto di arrivo del segmento, in cui l'algoritmo definisce la velocità. Questa coincide con quella assegnata all' *i-esimo* tratto. Il calcolo della velocità da assegnare ad ogni singolo

waypoint della *safe path*, a partire dal punto iniziale, verrà effettuato allo stesso modo per ogni coppia di waypoint. Nel seguito si considerano come wp_i il wp_1 e come wp_{i+1} il wp_2 della *safe path* riportata in Figura IV.16 e si descrivono i singoli passi seguiti dalla routine per assegnare la velocità al waypoint wp_2 .

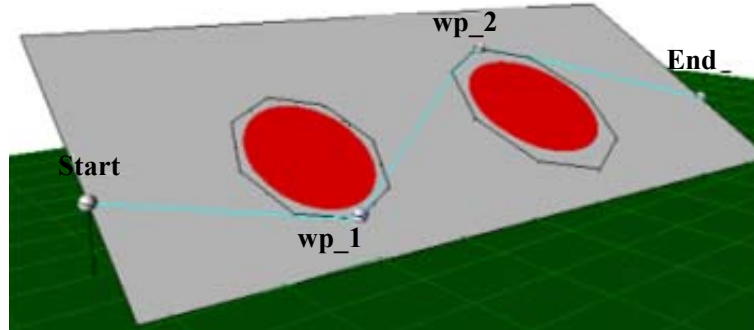


Figura IV.16. Una *safe-path* nel piano inclinato

Step 1.

La routine calcola l'angolo geometrico γ_{geom_i} , formato dal segmento *i-esimo* e dalla retta orizzontale passante per il punto di partenza e appartenente al piano inclinato che contiene i due punti (Figura IV.17).

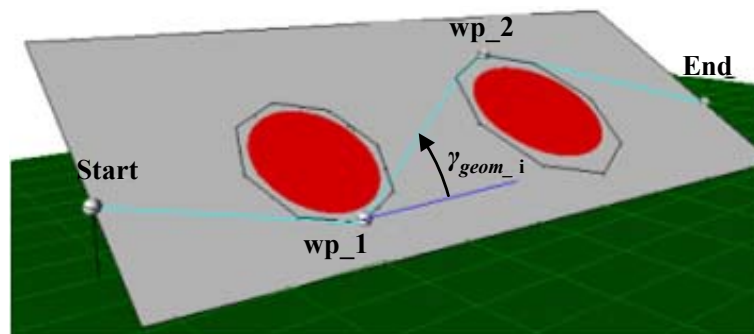


Figura IV.17. L'angolo geometrico di salita

Step 2.

In funzione del valore dell'angolo individuato si possono distinguere tre casi:

- Tratto di crociera: $\gamma_{geom_i} = 0$: non vi è nessuna variazione di velocità tra i waypoint.

$$V_{i+1} = V_i$$

- Tratto di salita: $\gamma_{geom_i} > 0$: la velocità del wp_{i+1} viene calcolata con le equazioni del moto in salita.

$$V_{i+1} = V_i * \sqrt{\cos \gamma}$$

-
- Tratto di discesa: $\gamma_{geom_i} < 0$: la velocità del wp_i+1 viene calcolata con le equazioni del moto in discesa.

$$V_{i+1} = V_i * \sqrt{\cos\gamma}$$

Step 3.

Dalla distanza dei punti ricava la lunghezza del segmento:

$$L_i = dist(wp_i, wp_{i+1})$$

Step 4.

Dalle tabelle che riportano i valori del consumo specifico al variare della velocità per i diversi angoli di rampa a quote e pesi diversi, la routine ricava il consumo specifico del velivolo. Da esso, poi, calcola la quantità di combustibile consumata per percorrere il segmento i -esimo:

$$G_i = \frac{Ch_i * L_i}{V_{i+1}}$$

dove:

- G_i : quantità di combustibile consumata nel segmento i -esimo;
- Ch_i : consumo specifico nel segmento i -esimo;
- V_{i+1} : velocità nel segmento i -esimo;
- L_i : lunghezza del segmento i -esimo.

Step 5.

Dalla quantità di combustibile consumato aggiorna il peso del velivolo calcolando il peso in wp_i+1 :

$$W_{wp_i+1} = W_{wp_i} - G_i$$

Step 6.

Infine, definisce le caratteristiche del wp_i+1 :

- Latitudine.
- Longitudine.
- Altitudine.
- Velocità.

Step 7.

Calcola la lunghezza totale della *fly path* come somma delle lunghezze dei singoli segmenti.

$$L_{totale} = \sum_1^{n-1} L_i$$

dove con i si è indicato l' i -esimo segmento e con n il numero di waypoint della *safe path*.

In Figura IV.18 è rappresentata la *fly path* ricavata dalla *safe path* nel generico piano inclinato.

Step 8.

Spedisce alla *Global Routine* la *fly path* trovata.

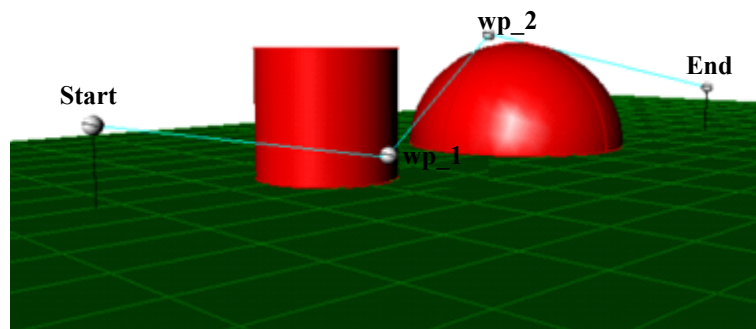


Figura IV.18. Fly Path: Priorità = Distanza

Priorità: Tempo

La *fly path* che privilegia il tempo di esecuzione della missione viene ottenuta dalla *safe path* ridisponendo i waypoint nello spazio e assegnandogli il modulo della velocità di passaggio. Dovendo privilegiare il tempo totale impiegato per arrivare al punto di destinazione, il velivolo percorre i tratti in salita in condizioni di salita rapida, i tratti in crociera assumendo la velocità limite e i tratti in discesa assumendo una velocità ottenuta dall'equilibrio delle forze.

Gli step di calcolo seguiti dalla routine per ottenere la *fly path* dalla *safe path* riportata in Figura IV.19 sono i seguenti.

Step 1.

La routine seleziona, tra i waypoint della *safe path*, quello a quota maggiore (Figura IV.19).

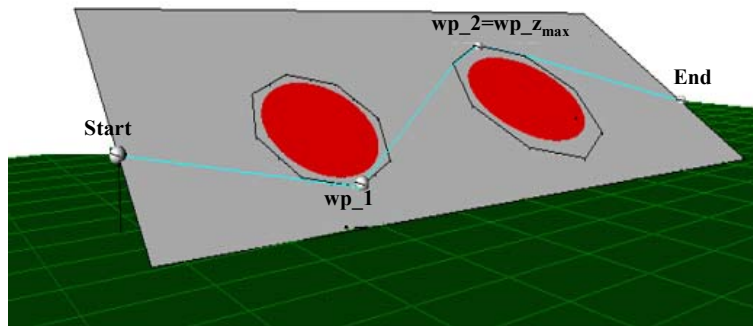


Figura IV.19. Quota massima della safe path

Step 2.

Successivamente traccia il piano orizzontale parallelo al terreno e passante per il waypoint della *safe path* che si trova a quota maggiore (Figura IV.20).

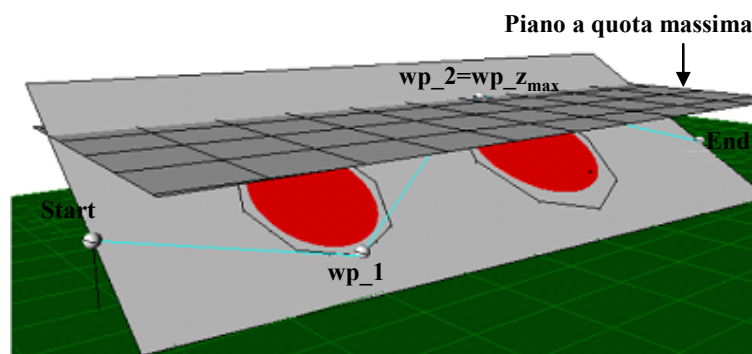


Figura IV.20. Il piano orizzontale alla quota massima

Step 3.

Individuato il piano orizzontale, i waypoint della *safe path*, ad eccezione dello *Start* e dell' *End*, vengono proiettati su di esso. Nell'esempio riportato il *wp_1* della *safe path* viene proiettato sul piano orizzontale passante per il *wp_2* (Figura IV.21).

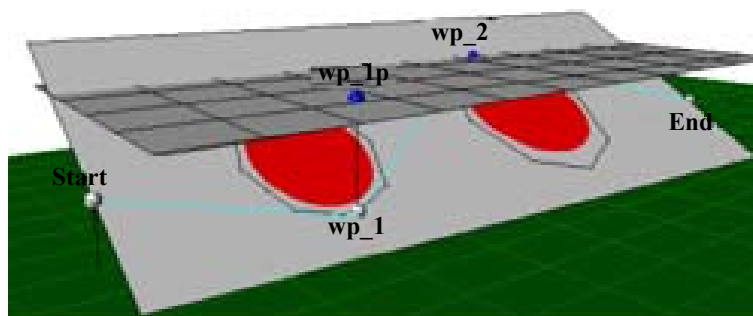


Figura IV.21. Le proiezioni dei punti della safe path

Step 4.

La routine traccia i piani verticali passanti per ogni segmento della *safe path* (Figura IV.22).

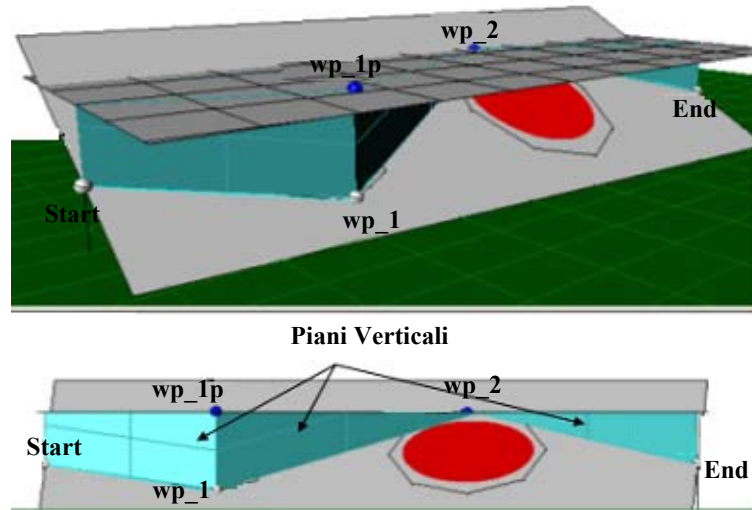


Figura IV.22. Piani verticali

Step 5.

La routine calcola l'angolo di salita geometrico richiesto per andare dal punto di partenza al waypoint wp_{1p} , indicato con γ_{geom} (Figura IV.23).



Figura IV.23. L'angolo di salita geometrico

Step 6.

In funzione del peso del velivolo e della quota iniziale la routine ricava dalle tabelle la velocità di salita rapida, V_{rap} , e della sua componente verticale, V_{ver_rap} .

Step 7.

Dal valore della velocità di salita rapida e della sua componente verticale ricava il corrispondente angolo di salita, γ_{rap} .

$$\gamma_{rap} = \arcsen \left(\frac{V_{rap}}{V_{ver_rap}} \right)$$

Step 8.

Confronta l'angolo di salita rapida trovato, indicato con γ_{rap} , con l'angolo di salita geometrico, indicato con γ_{geom} .

Caso: $\gamma_{rap} > \gamma_{geom}$.

La routine aggiunge un punto, chiamato wp_S , calcolato come intersezione della retta, contenuta nel piano verticale, passante per $Start$ e avente inclinazione pari all'angolo di salita rapida, con la retta passante per $Start$, parallela al piano orizzontale e contenuta nel piano verticale. La fase di salita è così costituita da una *leg* contenuta nel piano verticale congiungente lo $Start$ con il waypoint, wp_S (Figura IV.24). wp_S rappresenta il waypoint in cui inizia la fase di crociera.

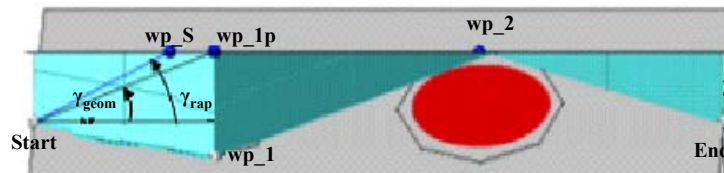


Figura IV.24. L'angolo di salita rapida maggiore dell'angolo geometrico

Caso: $\gamma_{rap} < \gamma_{geom}$.

Il primo segmento di salita viene eseguito lungo il segmento inclinato, rispetto all'orizzontale, dell'angolo γ_{rap} appartenente al piano verticale di salita. Tale segmento ha come estremi lo $Start$ e la proiezione di wp_1p sul piano parallelo al piano a quota massima e alla quota del punto di intersezione tra il segmento di salita e il segmento di retta verticale che unisce il wp_1p e wp_1 . Dal secondo estremo del segmento di salita inizia un secondo segmento di salita lungo una retta appartenente al piano verticale passante per il wp_1 e il wp_2 e inclinato rispetto all'orizzontale sempre di un angolo pari all'angolo di salita rapida. Dall'intersezione di quest'ultimo segmento e il piano orizzontale a quota massima si ottiene un nuovo waypoint, wp_S , che è il waypoint in cui inizia la fase di crociera nel piano orizzontale (Figura IV.25).

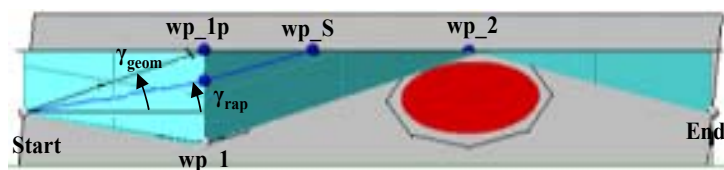


Figura IV.25. L'angolo di salita rapida minore dell'angolo geometrico

Se si considerano due generici waypoint del segmento di salita, wp_i e wp_{i+1} , il segmento di rotta che li unisce è il segmento i -esimo. Dallo Step 1 allo Step 14 si farà riferimento a tali waypoint per descrivere il volo in salita.

Step 9.

Dalla posizione dei waypoint la routine calcola la lunghezza del segmento i -esimo di salita.

Step 10.

Dalla lunghezza del segmento, indicata con L_{Si} , e dalla velocità, indicata con V_{Si} , la routine calcola il tempo di salita T_{Si} :

$$T_{Si} = \frac{L_{Si}}{V_{Si}}$$

Step 11.

Definiti i tratti in salita, la routine, utilizzando la tabella che riporta i valori del consumo specifico al variare della velocità per i diversi angoli di rampa a quote diverse e a pesi diversi, ricava il consumo specifico del tratto i -esimo di salita, Ch_{Si} .

Step 12.

Indicando la quantità di combustibile consumato con $G_{Si}(kg)$, si ottiene:

$$G_{Si} = Ch_{Si} * T_{Si}$$

Step 13.

Dalla quantità di combustibile consumato la routine calcola il peso del velivolo nel waypoint in cui termine l' i -esimo segmento. Se si indica con $W_{S(i+1)}$ il peso del velivolo nell' $i+1$ -esimo waypoint e con W_{Si} il suo peso nell' i -esimo waypoint di salita, si ottiene:

$$W_{S(i+1)} = W_{Si} - G_{Si}$$

Step 14.

Infine, la routine definisce le caratteristiche dei waypoint nel segmento in salita:

- Latitudine.
- Longitudine.
- Altitudine.

- Velocità di salita rapida.

Negli step successivi si considera il caso in cui l'angolo di salita rapida è minore dell'angolo di salita geometrico definito dalla *safe path* (Figura IV.25).

Step 15.

La routine, individuato il punto in cui inizia la fase di crociera, calcola il punto in cui termina tale fase. Per determinare la posizione di tale punto deve calcolare l'angolo di discesa che determina la pendenza del tratto di discesa. Tale angolo deriva dal confronto tra l'angolo di discesa geometrico richiesto dalla *safe path* e l'angolo di discesa calcolato in modo da rispettare la priorità fissata.

Come primo passo, la routine calcola l'angolo geometrico di discesa richiesto dalla *safe path*, cioè quello formato dal segmento che unisce il wp_2 con il target e la retta orizzontale passante per l'End (Figura IV.26).

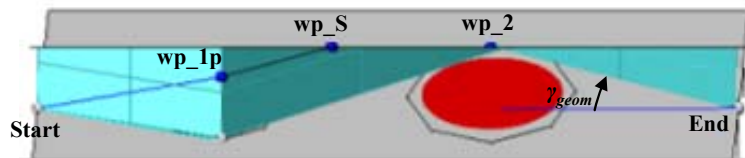


Figura IV.26. L'angolo di discesa geometrico dell'ultimo segmento della *safe path*

Step 16.

Per il calcolo dell'angolo di discesa che privilegia il tempo nel segmento di discesa la routine necessita di una stima del peso nell'ultimo segmento. Pertanto il risultato viene conseguito in modo (approssimato) come segue.

- 1) La routine proietta il punto finale sul piano orizzontale ottenendo il waypoint wp_T (Figura IV.27).

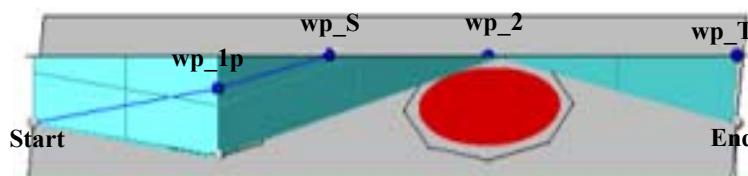


Figura IV.27. Proiezione del target sul piano orizzontale

- 2) Tra il wp_S e il wp_T il velivolo vola in condizioni di crociera. Per ogni coppia di punti nel piano la routine calcola la velocità di volo, la lunghezza del segmento che unisce i due punti, il tempo di percorrenza e il peso del velivolo in ogni waypoint. Per illustrare il funzionamento della routine in questa fase si considera la coppia di waypoint wp_S e wp_2 e il segmento che li unisce.

- 3) Dovendo arrivare al punto di destinazione nel minimo tempo l'algoritmo ricava dalle tabelle il valore della velocità limite in base alla quota di volo e al peso del velivolo nel waypoint wp_S.
- 4) Calcola la lunghezza del segmento che unisce i due waypoint presi in considerazione.
- 5) Calcola il tempo impiegato per percorrere il segmento in esame.

$$T = \frac{L}{V}$$

- 6) Ricava il consumo specifico, Ch.
- 7) Dal consumo specifico calcola la quantità di combustibile consumato nel segmento.

$$G = Ch * T$$

- 8) Calcola il peso del velivolo nel punto finale del segmento, wp_2:

$$W_2 = W_S - G$$

- 9) La routine ripete i passi dal 3)all'8) per tutte le coppie di waypoint nel piano orizzontale fino al wp_T.
- 10)Dalla quota e dal peso del velivolo nel wp_T la routine ricava l'angolo di discesa utilizzando la tabella che riporta il valore dell'angolo di discesa al variare della velocità di volo per diverse quote e per diversi pesi.
- 11)Confronta l'angolo di discesa trovato dalle tabelle con quello geometrico (Figura IV.28)

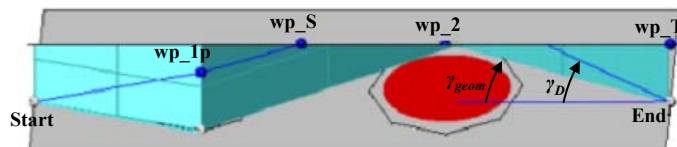


Figura IV.28. L'angolo di discesa

Si presentano due casi:

- $|\gamma_D| < |\gamma_{geom}|$: si impone al velivolo di percorrere il segmento di discesa con l'angolo geometrico γ_{geom} .

- $|\gamma_D| > |\gamma_{geom}|$: si assume come angolo di discesa l'angolo trovato dalle tabelle e si aggiunge alla rotta il waypoint, wp_D , trovato come intersezione tra la retta appartenente al piano verticale di discesa, passante per il target e inclinata di un angolo pari a γ_D , con il piano a quota massima. Questo waypoint è il waypoint in cui inizia la fase di discesa (Figura IV.29).

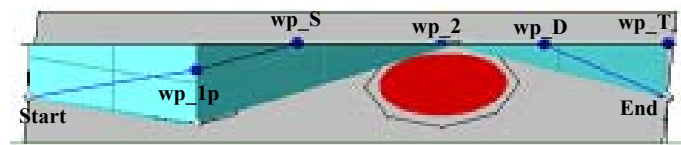


Figura IV.29. Il waypoint aggiuntivo per la discesa

Step 17.

Definito il wp_D la routine esegue i passi dal 3) all'8) dello step precedente per ogni coppia di waypoint compresa tra il wp_S e il wp_D , in modo da trovare le caratteristiche dei waypoint della fase di crociera.

Si sottolinea che la crociera si svolge in condizioni di sicurezza rispetto al terreno ed agli ostacoli a terra in quanto i waypoint si spostano in un'area sicura al di sopra del piano di sezione (Figura IV.30).



Figura IV.30. Il piano di crociera e gli spazi interdetti al volo

Step 18.

Infine, la routine definisce le caratteristiche dei waypoint nel piano orizzontale:

- Latitudine.
- Longitudine.
- Altitudine.
- Velocità limite.

Step 19.

Conoscendo la velocità in volo orizzontale e l'angolo di discesa la routine calcola la velocità di discesa:

$$V_{discesa} = V_{crociera} * \sqrt{\cos\gamma_D}$$

Step 20.

Dalle posizioni dei punti estremi del segmento di discesa calcola la sua lunghezza.

$$L_{discesa} = dist(wp_D, End)$$

Step 21.

Conoscendo la velocità e la lunghezza del segmento in discesa ricava il tempo di discesa:

$$T_{discesa} = \frac{L_{discesa}}{V_{discesa}}$$

Step 22.

Analogamente a quanto fatto nel segmento in salita, dopo aver trovato il consumo specifico dalle tabelle, la routine calcola la quantità di combustibile consumato:

$$G_{discesa} = Ch_{discesa} * T_{discesa}$$

Step 23.

Sottraendo la quantità di combustibile consumato al peso del velivolo nel wp_D la routine calcola il peso del velivolo nel punto di destinazione:

$$W_{end} = W_{wp_D} - G_{discesa}$$

Step 24.

Ottenuti i tempi di volo nei tre tratti calcola il tempo totale di volo della fly path.

$$T_{totale} = \sum_1^{n-1} T_i$$

dove con i si è indicato l' i -esimo segmento e con n il numero di waypoint.

In Figura IV.31 è riportata la *fly path* più efficiente in termini di tempo di missione.

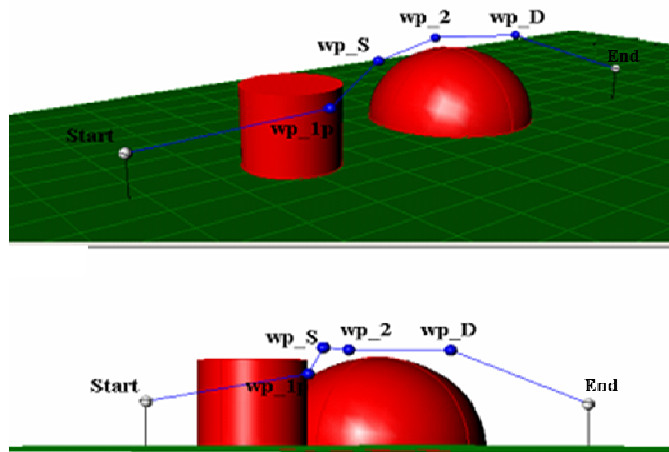


Figura IV.31. Fly Path: Priorità = Tempo

Step 25.

Spedisce alla Global Routine la *fly path* trovata.

Priorità: Combustibile

La *fly path* che privilegia il consumo di combustibile viene ottenuta dalla *safe path* nello stesso modo utilizzato per calcolare quella che privilegia il tempo di missione. L'unica differenza risiede nell'assegnare ai waypoint del tratto di crociera la velocità di minimo consumo invece che la velocità limite.

IV.2.3.3 Global Routine:

La *Global Routine* confronta il costo di ogni singola *fly path* ottenuta dalla *Efficiency Routine* e seleziona quella che costa meno in termini di distanza, tempo o combustibile.

Nel caso di comando di Conduzione la *fly path* selezionata rappresenta la rotta che il velivolo assume come riferimento per l'esecuzione della missione.

Nel caso di comando di Survey le *fly path* che uniscono le singole coppie di PMW vengono connesse in modo da ottenere la rotta globale.

Capitolo V - Test del simulatore e risultati

V.1 Introduzione

Il processo di progettazione del simulatore di interfaccia uomo-macchina si è concluso con la fase di testing delle sue due componenti principali, l'interfaccia uomo-macchina e il planning algorithm, nella loro versione finale, in modo da verificare la rispondenza di entrambi ai requisiti fissati e ricavare utili indicazioni per ulteriori sviluppi. Prima di arrivare alla loro versione finale e, quindi, alla fase di testing, entrambi sono stati soggetti ad un processo di progettazione iterativo: dalla definizione, sviluppo e test di singole funzionalità mirate a soddisfare un numero limitato di requisiti, ed implementando poi funzionalità caratterizzate da un grado di complessità crescente, si è arrivati ad una versione finale in grado di soddisfare tutti i requisiti definiti nella parte di studio concettuale. In particolare, data la difficoltà di reperire tester per una valutazione dell'interfaccia, le sue valutazioni “intermedie” sono state effettuate sia euristicamente utilizzando le dieci euristiche di Nielsen sia utilizzando il metodo definito cognitive walkthrough, che ha come obiettivo quello di identificare problemi di progettazione simulando il comportamento di un utente che debba raggiungere un particolare obiettivo[20],[22]. Tali valutazioni hanno portato a continui miglioramenti dell'interfaccia fino al punto in cui solo l'utente finale avrebbe potuto dare indicazioni valide per una sua valutazione finale.

La prima parte del presente capitolo illustra i risultati relativi ai test dell'algorithm, mentre la seconda parte descrive la metodologia utilizzata per eseguire i test di valutazione dell'interfaccia e presenta risultati ottenuti.

V.2 Validazione dell'algorithm

Per verificare il funzionamento dell'algorithm e per valutare il grado di affidabilità dell'algorithm, cioè la sua rispondenza al comando inviato, e il carico

computazionale richiesto, sono state effettuate numerose simulazioni di missioni in diverse condizioni operative corrispondenti a diverse configurazioni di scenario e impostando diversi criteri di priorità. Tali simulazioni sono state differenziate, per uno stesso task di missione e di *location*, per:

- Modalità di volo.
- Posizione ostacoli.
- Numero di ostacoli.
- Dimensione ostacoli.

V.2.1 Affidabilità dell'algoritmo

Per la presentazione dei risultati per semplicità si riportano solo pochi esempi significativi. In Figura V.1 sono riportati quattro esempi di calcolo della rotta nel caso di comando di conduzione in quattro scenari differenti. Per ogni scenario è stata variata la modalità di volo (criterio di priorità) e per ognuno di essi sono state calcolate le rispettive rotte. In figura le colonne delle matrici rappresentano il percorso corrispondente al criterio di priorità prescelto, mentre le righe riportano i valori di distanza, tempo e combustibile corrispondenti al percorso.

In figura il percorso 1 è calcolato impostando come criterio di priorità la distanza da percorrere: in tutti e quattro i casi riportati, esso è caratterizzato da un valore della distanza percorsa inferiore rispetto a quella del percorso 2 e del percorso 3, in accordo con l'impostazione data di privilegiare la distanza percorsa. Analogamente il percorso 2 presenta il valore più piccolo, se confrontato con gli altri due, di tempo di missione. Il percorso tre è, infine, quello che consente di andare dal punto iniziale a quello finale al minor costo di combustibile. Si sottolinea che la figura riporta una visione bidimensionale delle rotte. Questo significa che, anche se apparentemente la rotta interseca un ostacolo, nella realtà, cioè in uno spazio tridimensionale, essa lo sorvola.

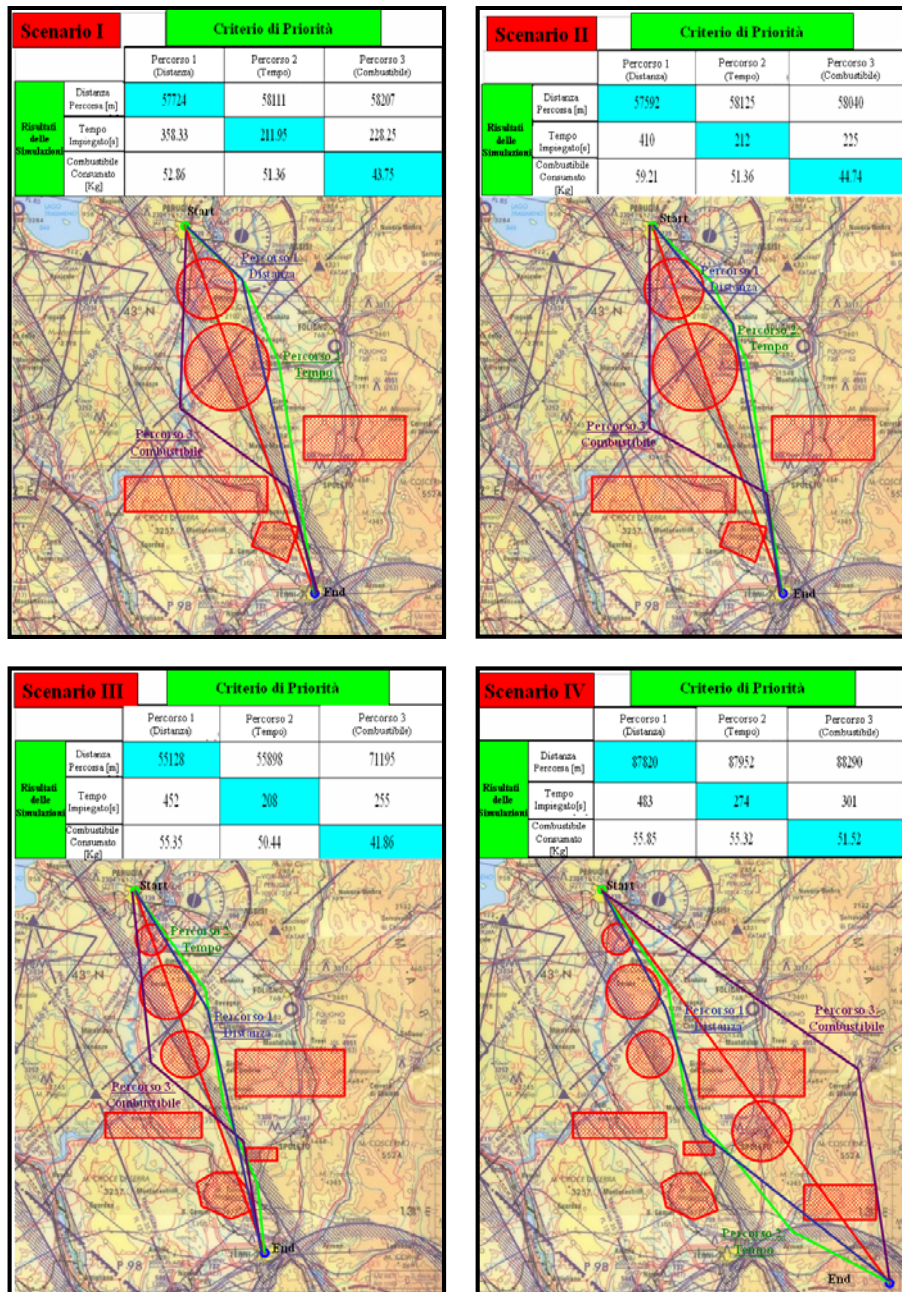


Figura V.1. Validazione algoritmo: l'affidabilità

Inoltre aver calcolato rotte compatibili con la dinamica del velivolo ha permesso di verificare che anche le traiettorie calcolate dal simulatore del velivolo in funzione delle rotte calcolate dal *Planning Algorithm* non entrano in collisione con gli ostacoli nell'ambiente tridimensionale.

V.2.2 Carico computazionale

Per verificare il carico computazionale richiesto dall'algoritmo è stata scritta una routine che consente di calcolare il tempo impiegato per calcolare la rotta. L'algoritmo

nelle condizioni simulate fino ad oggi si è dimostrato veloce anche se messo in funzione su PC di medie prestazioni.

In Figura V.2 si riportano i tempi impiegati dall'algoritmo per calcolare la rotta in risposta ad un comando di conduzione in uno scenario caratterizzato da un aumento del numero di ostacoli.

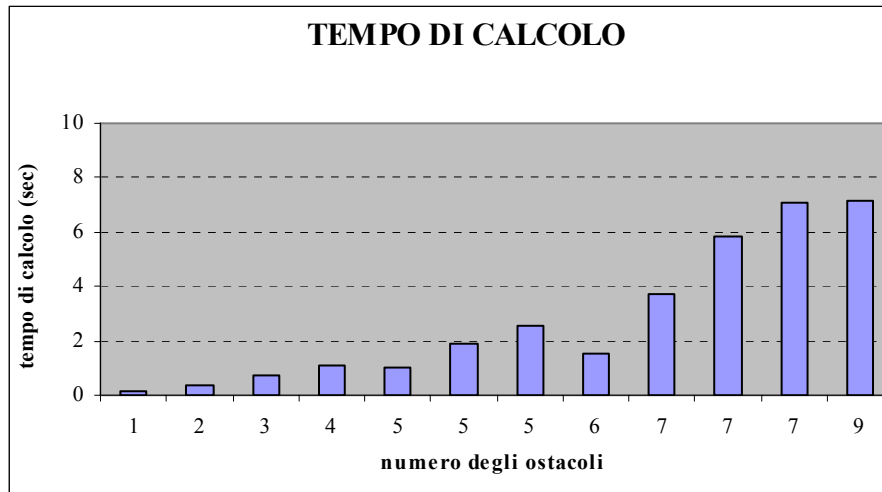


Figura V.2. Tempi di calcolo al variare del numero di ostacoli

In particolare dalla figura si può facilmente comprendere che, a parità di numero di ostacoli, il tempo di calcolo potrebbe essere diverso. Questo è dovuto sia alla posizione degli ostacoli rispetto la congiungente la posizione del velivolo nel momento in cui questo riceve il comando e il punto di destinazione, sia alla dimensione degli ostacoli. In Figura V.3 si riportano tre esempi di missioni simulate caratterizzate da una variazione della posizione degli ostacoli e delle loro dimensioni.

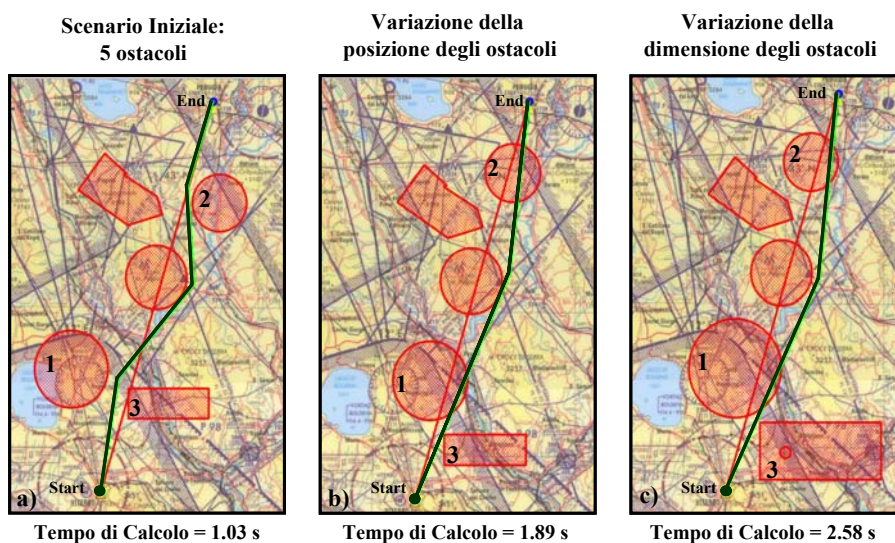


Figura V.3. Tempi di calcolo al variare della posizione e della dimensione degli ostacoli

Dalla Figura V.3 si nota che il tempo di calcolo della rotta rappresentata in Figura V.3.B è maggiore di quello della rotta rappresentata in Figura V.3.A: questo è dovuto allo spostamento degli ostacoli indicati con i numeri 1 e 2 verso la congiungente la posizione del velivolo (Start in figura) e il punto di destinazione (End in figura). Confrontando, inoltre, le Figura V.3.B e la Figura V.3.C si nota che, aumentando le dimensioni degli ostacoli indicati con il numero 1 e 3 il tempo di calcolo della rotta aumenta ulteriormente.

Da quanto riportato nelle figure precedenti si può dedurre che il tempo di calcolo è naturalmente influenzato, a parità di prestazioni Hardware, dalla complessità dello scenario relativamente all'obiettivo di missione, ed in particolare è influenzato dagli ostacoli che sono prossimi o si trovano sulla congiungente lo Start con l'End.

In definitiva, si può concludere dalle simulazioni effettuate che l'algoritmo:

1. rispetta i vincoli di sicurezza perché calcola rotte che evitano gli ostacoli (bubble, edifici, No Fly Zone);
2. rispetta la priorità selezionata;
3. richiede tempi di calcolo accettabili per il contesto in cui opera.

V.3 I test dell'interfaccia

La versione finale dell'interfaccia è stata testata per valutare la sua rispondenza ai requisiti fissati e, quindi, la sua efficacia ed efficienza nella gestione di missioni di velivoli senza pilota a bordo e per ricavare utili indicazioni per ulteriori sviluppi. La fase di testing dell'interfaccia è stata composta dalle seguenti sottofasi:

- preparazione del test di interfaccia (scelta della missione dimensionante e delle modalità di raccolta dati);
- scelta del campione e conduzione degli esperimenti;
- analisi e reporting dei risultati.

V.3.1 Preparazione del test di interfaccia

La preparazione del test ha riguardato la scelta:

- del compito dei tester,
- delle variabili sperimentali;
- delle modalità di acquisizione dei dati.

V.3.1.1 Compito dei tester

In fase di progettazione degli esperimenti è stato fissato uno scenario dimensionante ed è stato definito come compito da assegnare ai tester l'invio di un comando di conduzione al velivolo, la supervisione della missione e la ripianificazione della missione in caso di modifica dello scenario. Per l'esecuzione dei test è stata fatta l'ipotesi di assenza di malfunzionamenti del velivolo.

Lo scenario è uno scenario dinamico perché, in fase di esecuzione della missione, veniva modificato dall'inserimento *random* di ostacoli, di diverse forme e dimensioni, da parte di uno sperimentatore seduto in una workstation, chiamata "*obstacle workstation*", posizionata dove il tester non poteva vederla. Lo sperimentatore, dalla sua postazione, poteva osservare il progresso della missione e, in base ad essa, inserire ostacoli di diversa forma e dimensione, che venivano notificati al tester attraverso la visualizzazione nei due display dell'interfaccia e mediante messaggi vocali.

V.3.1.2 Le variabili sperimentali

In genere, la scelta delle variabili sperimentali per l'esecuzione di test dipende dalle ipotesi che si fanno a monte dell'esperimento e dagli obiettivi dell'esperimento stesso. Dal momento che è noto che il livello di SA e di WL di un operatore umano che opera con un sistema automatizzato dipendono strettamente dal livello di automazione implementato sul sistema, si è scelta come variabile sperimentale proprio il livello di automazione del sistema, allo scopo di verificare l'effetto che questo ha sulle prestazioni dell'operatore.

V.3.1.2.1 Il livello di automazione

I valori di questa variabile sperimentale sono relativi alle diverse modalità con cui si può attivare il comando di calcolo di una nuova rotta (*azione di replanning*) come reazione alla comparsa di un nuovo ostacolo: essi sono stati scelti riprendendo le diverse modalità di interazione fissate precedentemente. In particolare i valori sono tre e si riferiscono all'attivazione del comando di replanning manuale, semi-automatico o automatico.

- Attivazione comando Manuale: il velivolo si accorge del nuovo ostacolo ed avvisa l'operatore che attiva il comando di ricalcolo della rotta.
- Attivazione comando SemiAutomatico: il velivolo si accorge del nuovo ostacolo, calcola una nuova rotta e la propone all'operatore dandogli un limitato

intervallo di tempo per verificarla, prima che il velivolo stesso la assumi come rotta di riferimento (Figura V.4). L'operatore, una volta visualizzata la rotta, la può accettare, ed in questo caso non fa nulla, oppure la può rifiutare aggiungendo un waypoint intermedio tra il velivolo ed il punto di destinazione, sul quale la rotta deve passare, oppure, nel peggiore dei casi, può cambiare il punto di destinazione.

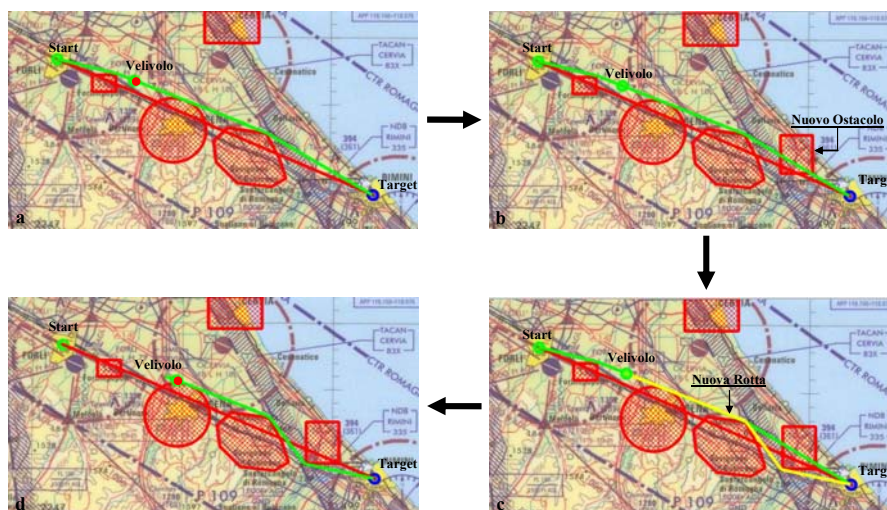


Figura V.4. Il livello di automazione semi-automatico: il velivolo segue la rotta(A); compare un nuovo ostacolo (B); il velivolo si accorge del nuovo ostacolo e calcola una nuova rotta che propone all'operatore (C); il velivolo assume la rotta calcolata come rotta di riferimento, se l'operatore non agisce (D).

- Attivazione comando Automatico: il velivolo si accorge del nuovo ostacolo, calcola la nuova rotta e, solo dopo averla assunta come rotta di riferimento, informa l'operatore.

Per ogni tester sono stati progettati tre differenti test, ognuno per ogni valore del livello di automazione. Per controbilanciare gli effetti di “apprendimento²⁸”, cioè gli effetti negativi derivanti dall'ordine con cui i tester avrebbero sperimentato i diversi LOA, è stato variato, per ogni tester, l'ordine con cui doverli sperimentare (Tabella

²⁸ Nella fase di test di un sistema, quando si fissano diversi livelli di una variabile sperimentale da far testare a più tester (per esempio 6 tester) è buona norma far testare ad ognuno di essi i diversi livelli della variabile in un ordine diverso l'uno dall'altro, in modo da avere risultati il più generale possibile. Supponiamo di voler calcolare il livello di workload associato al raggiungimento di un obiettivo nelle diverse condizioni operative corrispondenti ai diversi valori della una variabile sperimentale (esempio: A, B o C). Dal momento che il workload dipende anche dal grado di confidenza che un utente ha con un sistema, se si fanno sperimentare a tutti i tester i valori della variabile sempre nello stesso ordine (A-B-C) si avrebbero valori del workload associato al livello A, sempre sperimentato per primo, sicuramente più alto rispetto a quello associato al livello C, sempre sperimentato per ultimo, e quindi i risultati dei test non potrebbero essere ritenuti pienamente attendibili.

V.1). Inoltre, per rendere i risultati più generali e ricavare utili informazioni riguardo all'usabilità dell'interfaccia, in particolare riguardo al criterio della *memorability*, anche se nel tempo limitato richiesto dalla campagna di esperimenti, ai tester sono stati fatti eseguire i test in maniera discontinua: ognuno di essi, dopo aver effettuato un primo test, ha dovuto aspettare l'esecuzione di un test anche da parte degli altri.

Tabella V.1. Ordine di sperimentazione dei LOA

<u>TESTER</u>	<u>LOA</u>
1	A
	B
	C
2	C
	A
	B
3	B
	C
	A
4	C
	B
	A
5	A
	C
	B
6	B
	A
	C

V.3.1.3 Modalità di acquisizione dati

Per raccogliere quanti più dati possibile, è stato deciso di utilizzare più di una modalità di raccolta dati. Si è optato per tre diverse metodologie:

- Osservazioni dirette;
- Questionario;
- Debriefing.

Questionario:

Il questionario sottoposto ai tester è stato formulato in modo da comprendere domande riguardanti il livello di SA, il livello di workload, fisico e mentale, percepito dai tester, ed infine riguardo l'usabilità dell'interfaccia. Per la formulazione del questionario si è partiti dalle diverse metodologie utilizzate per

valutare l'usabilità di un'interfaccia uomo-macchina e calcolare il livello di SA e WL di un operatore umano che interagisce con tale interfaccia [14],[20],[21], [22], [23],[44]. Come indici di misura per il carico di lavoro sono stati considerati posizione delle mani e braccia in condizioni di monitoraggio della missione, i movimenti da fare per inviare il comando e la posizione della mani nel momento dell'invio del comando, azioni da fare per richiamare le informazioni di cui si ha bisogno durante la missione e la complessità della decisione

Tali domande, alcune a risposta multipla (5 opzioni) alcune a risposta aperta, sono state raggruppate in diversi gruppi:

1. personali (età, ore di volo, eventuali brevetti posseduti, conoscenza degli UAV);
2. touchscreen;
3. 3D Virtual Display;
4. intero simulatore;
5. usabilità dell'interfaccia;
6. suggerimenti per eventuali sviluppi futuri.

Osservazioni

Durante l'esecuzione del test, ogni tester è stato osservato da uno sperimentatore che, da una posizione tale da essere il "meno intrusivo" possibile, cioè cercando di non interferire con l'esecuzione dell'esperimento, annotava il suo comportamento, con particolare attenzione alle sue azioni e reazioni al momento della comparsa dell'ostacolo.

Debriefing

Quest'ultima modalità consiste in discussioni tra lo sperimentatore e ogni tester, dopo la compilazione del questionario, riguardanti sia i risultati delle osservazioni sia le risposte date ai questionari.

Le osservazioni e il debriefing possono essere viste come modalità complementari al questionario nella raccolta dati. L'osservazione del tester rappresenta uno strumento che permette allo sperimentatore di osservare il comportamento del tester in tutte le fasi

dell'esperimento, riuscendo a coglierne atteggiamenti o sfumature del comportamento che il tester potrebbe non menzionare nelle risposte dei questionari. Il debriefing, invece, permette allo sperimentatore di fare domande mirate ai tester e a questi ultimi di spiegare più chiaramente e dettagliatamente le loro risposte e il loro punto di vista.

V.3.2 Scelta del campione e conduzioni esperimenti

Come tester sono stati usati sei allievi piloti²⁹ con già qualche ora di volo come esperienza. Prima dell'inizio dei test è stato fatto un briefing tra i tester ed lo sperimentatore in cui è stata presentata la ricerca in atto presso il Laboratorio della II Facoltà di Ingegneria, le funzionalità del simulatore, il ruolo dei tester all'interno della ricerca ed il loro compito durante gli esperimenti. Inoltre sono state presentate le modalità con cui sarebbero stati raccolti i dati di interesse ed è stato assicurato ai tester l'anonimato per garantire la loro massima sincerità sia nella fase di compilazione del questionario sia nella fase di debriefing.

Successivamente ogni tester ha eseguito un periodo di training per imparare ad usare il simulatore e ha iniziato il test solo quando lo sperimentatore ha ritenuto soddisfacente il grado di familiarità del tester con il simulatore.

V.3.3 Analisi e reporting dei risultati

Le diverse modalità di raccolta dati e i diversi valori della variabile sperimentale hanno permesso di ricavare importanti indicazioni riguardo i livelli di SA e quelli di WL percepiti dai tester e riguardo l'influenza che su di essi ha il livello di automazione.

Le risposte dei tester sia ai questionari sia in fase di debriefing hanno rivelato che essi hanno potuto costruire e mantenere elevati livelli di SA. Le caratteristiche dei due display hanno permesso all'operatore di avere facile accesso, diretto (semplicemente guardando lo schermo) o indiretto (richiamandole), a tutte le informazioni di cui avevano bisogno per essere consapevoli del moto del velivolo e dell'evoluzione dello scenario, per comprendere l'effetto di un cambio dello scenario o di un loro comando, e quindi di essere in grado, senza eccessivo sforzo mentale, di fare previsioni sullo stato del velivolo o dello scenario nel breve futuro.

²⁹ Aumentare il numero di tester aiuta ad identificare più problemi, ma dopo 5-6 tester i benefici derivanti dall'aumento dei test diminuisce. È stato dimostrato che conviene effettuare i primi test con sei tester, apportare le modifiche al software e successivamente fare una seconda campagna di prove. In questo modo si garantisce un aumento delle "prestazioni" del software di circa il 50%[20].

Particolarmente apprezzata è stata la rappresentazione di tutte le informazioni relative alla missione in un unico schermo, il 3D Virtual Display, e quindi la possibilità di avere le informazioni primarie sempre *sott'occhio* e di richiamare altre informazioni con semplici operazioni, come quella di aprire un menu a tendina, di selezionare l'opzione desiderata, e di posizionare e dimensionare la piccola finestra in cui l'informazione desiderata è rappresentata. Inoltre, un utile strumento per conoscere lo scenario intorno al velivolo, l'assetto del velivolo e la sua posizione relativa all'interno dello scenario è stata individuata nella possibilità di poter *switchiare* tra il punto di vista interno ed esterno al velivolo e, in questo secondo caso, di poter cambiare punto di vista e scala di visualizzazione, in modo da comprendere la posizione relativa del velivolo ed il terreno oppure la posizione relativa tra il velivolo e gli ostacoli (Figura V.5).

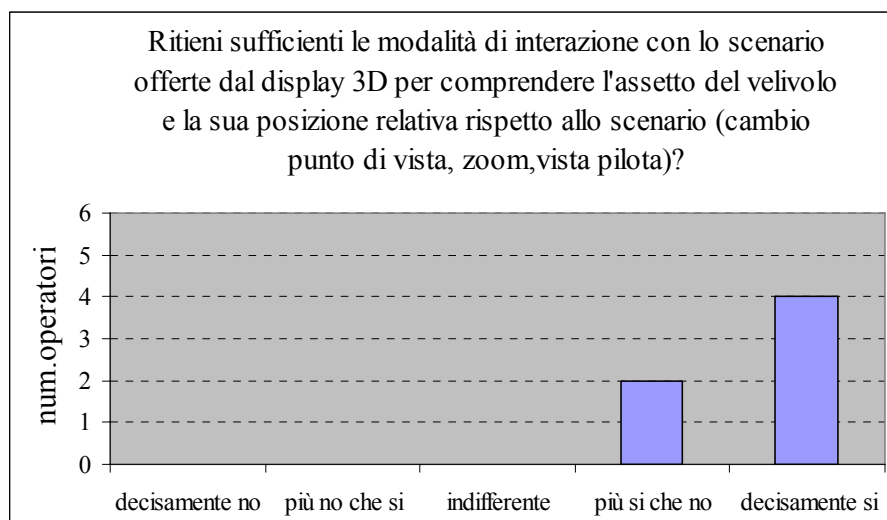


Figura V.5. Risultati dei test: Modalità di interazione con lo scenario

Oltre alla parte “visiva” dell’interfaccia, un ruolo fondamentale per mantenere elevati i livelli di vigilanza è svolto dai feedback audio: l’80% dei tester ha dichiarato che tali feedback, che non solo ripetevano il comando inviato ma notificavano ai tester l’esecuzione del comando e le variazioni dello scenario, ha permesso loro di mantenere elevati livelli di SA (Figura V.6). Inoltre, il 50% dei tester ha consigliato di inserire anche audio feedback relativi ad eventuali malfunzionamenti del velivolo perché potrebbero permettere all’operatore di conoscere lo stato alterato del velivolo prima di quanto potrebbero fare solo con le informazioni visive, ed uno di loro ha consigliato di attivare l’audio feedback relativo al comando inviato ogni intervallo di tempo prefissato in modo da ricordare all’operatore l’obiettivo della missione.

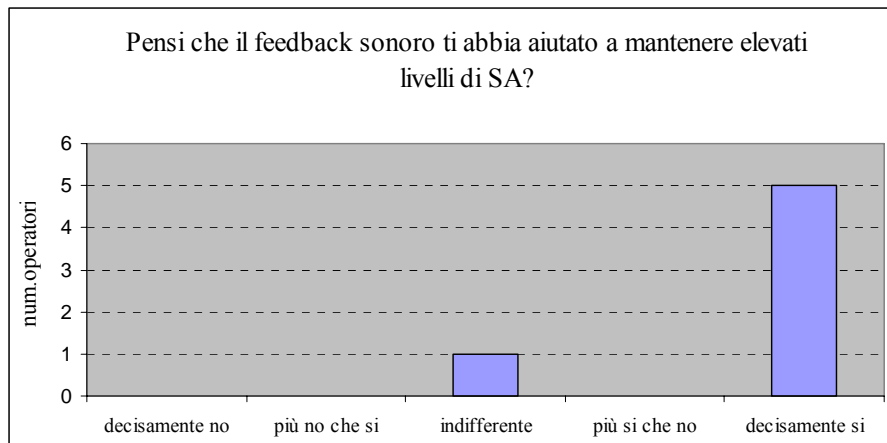


Figura V.6. Risultati dei test: l' audio-feedback

A garantire elevati livelli di SA ha contribuito anche il livello di automazione implementato perché permette all'operatore di monitorare la missione ed, eventualmente, di intervenire per mezzo di comandi di alto livello, lasciando il controllo del velivolo al sistema. I dati hanno rivelato che, nelle diverse simulazioni effettuate, l'attenzione dell'operatore aumentava nei casi in cui era attivato il comando Semi-Automatico del replanning. In questo caso infatti l'operatore risultava essere consapevole e gratificato del suo ruolo attivo nell'esecuzione della missione: il suo compito era quello di verificare il corretto funzionamento dell'automazione e di intervenire nel caso in cui essa avesse fallito. Se si vedono le prestazioni dell'operatore in termini di carico di lavoro mentale e di SA si può certamente concludere che esse aumentavano quando il livello di automazione era quello intermedio. Il perché può facilmente essere compreso leggendo due delle risposte più significative date dai tester:

- “Il livello semi-automatico crea una situazione simile a quella pilota-copilota, in cui uno dei due può correggere eventuali errori dell'altro”.
- “L'operatore nel caso in cui è necessaria una modifica della missione deve solo verificare che la rotta calcolata dal velivolo rispetti i vincoli imposti. In ogni caso, se l'automazione non dovesse funzionare, il tempo e il workload richiesto all'operatore per intervenire sono minimi”.

Inoltre, grazie all'utilizzo del touchscreen come *input device*, al costruito dei comandi di alto livello e alla modalità scelta di invio di tali comandi (selezione di pulsanti posti in una colonna) i tester hanno percepito carichi di lavoro non eccessivi. Questo perché a partire dalle posizioni delle mani in fase di monitoraggio della missione, la mano destra sul mouse e la mano sinistra sullo touchscreen, gli unici movimenti richiesti all'operatore sono quelli della mano destra dal mouse fino al

touchscreen per indicare la location, e quello della mano sinistra per selezionare le diverse opzioni del comando. Riguardo agli strumenti utilizzati ed utilizzabili per inviare il comando, i risultati hanno rivelato che 2 tester, pur gradendo il touchscreen come input device, hanno consigliato di inserire un secondo strumento ridondante per inviare i comandi, come per esempio un mouse, in modo da riuscire ad operare anche nel caso in cui si verificano problemi al touchscreen.

I risultati dei test hanno permesso anche di trarre importanti conclusioni sulla usabilità dell'interfaccia uomo-macchina. Dalla brevità del periodo di training, in media 20 minuti, durante il quale i tester hanno dovuto familiarizzare con il simulatore, e dal raggiungimento dell'obiettivo prefissato, cioè il successo della missione in tutti i test, si può sicuramente concludere che il sistema rispetta i criteri di *learnability*, *memorability* ed *efficiency*. Inoltre la mancanza di difficoltà dichiarate di utilizzare il sistema dopo un certo intervallo di tempo e la mancanza di errori gravi tali da compromettere il successo della missione fanno concludere che l'interfaccia sviluppata è anche semplice da usare, non favorisce la commissione di errori ed, eventualmente, dà all'utente la possibilità di annullarli.

Conclusioni

L'aspetto caratterizzante dei sistemi UAV è la separazione fisica tra l'operatore ed il velivolo. Questo rappresenta sicuramente il loro principale vantaggio rispetto ai velivoli pilotati perchè permette di utilizzarli nelle missioni definite missioni 3-D (*dull, dangerous e dirty*), ma rappresenta anche la più grande fonte di problemi. Tali problemi sono legati in particolare ad inadeguati livelli di automazione del sistema e alle interfacce uomo-macchina non usabili. I livelli di automazione sono tali da allocare le funzioni tra l'operatore ed il velivolo in modo da non sfruttarne le relative capacità e non permettere al velivolo di modificare la missione, mentre le interfacce sono progettate senza tener conto delle limitazioni che derivano dall'isolamento sensoriale in cui si trova l'operatore, cioè della privazione di tutti quei canali sensoriali (visivo, uditivo, cinestesico/vestibolare) che invece avrebbe a bordo dei velivoli convenzionali.

L'attività di ricerca presentata riguarda proprio i due problemi appena descritti. Durante il corso di dottorato è stato concepito e sviluppato un simulatore modulare di interfaccia uomo-macchina, che simula diverse tipologie di missione degli UAV, con il quale sperimentare diverse soluzioni a tali problemi. Le componenti principali del sistema di simulazione, una definita *automazione*, che contiene un algoritmo euristico per l'implementazione del livello di automazione fissato, ed una seconda, rappresentata da un'interfaccia uomo-macchina che supporta l'automazione stabilita, possono essere facilmente sostituite in modo da sperimentare diverse modalità di interazione uomo-velivolo, sia dal punto di vista dell'automazione che da quello dell'interfaccia. Tutto il simulatore è stato sviluppato seguendo un approccio *User-Centered*, cercando cioè di adattare il sistema alle capacità psico-fisiche dell'operatore, alle sue limitazioni e alle sue esigenze, che vanno dalla necessità di costruire e mantenere elevati livelli di Situation Awareness alla necessità di inviare comandi in breve tempo e senza elevati sforzi fisici e cognitivi.

Come livello di automazione è stato implementato quello concepito dalla teoria del *Supervisory Control*. Essa prevede che l'operatore diventi il supervisore del velivolo e ad esso invii le macroistruzioni, o comandi di alto livello, mentre il velivolo li riceve, li comprende e li traduce in azioni dettagliate, come rotte di volo e azioni di controllo.

Per permettere al velivolo di calcolare rotte di volo è stato sviluppato un algoritmo che, come i test hanno dimostrato, permette di calcolare, in modo euristico ed in tempi brevi e compatibili con il contesto che si sta considerando, rotte 3D sicure ed efficienti che rispettano i vincoli imposti (non collisione con gli ostacoli, rispetto delle prestazioni del velivolo).

Inoltre, data la complessità e dinamicità degli scenari operativi in cui i velivoli si muovono, è stato affrontato anche il problema dell'interazione uomo-velivolo in fase di ripianificazione della missione. Simulata la capacità del velivolo di accorgersi delle modifiche dello scenario, per comprendere fin dove spingere l'autonomia del velivolo ed il grado di coinvolgimento dell'operatore, si sono ipotizzate diverse modalità di interazione uomo-velivolo, da quella che prevede l'attivazione del comando di ripianificazione da parte dell'operatore (livello manuale), a quella che prevede una collaborazione tra l'operatore ed il velivolo (livello semi-automatico) fino a quella che prevede una completa autonomia del velivolo (livello automatico).

L'interfaccia uomo-macchina realizzata è composta di due elementi: un touchscreen, che rappresenta il principale strumento utilizzato dall'operatore per inviare le macroistruzioni al velivolo, ed uno schermo, definito *3D Virtual Display*, che fornisce all'operatore una visualizzazione stereoscopica e comprensiva dell'intero scenario di missione. Un importante elemento è rappresentato da comunicazioni audio che riguardano sia il comando inviato e la sua esecuzione sia eventuali modifiche dello scenario.

Coerentemente con l'approccio *User-Centered*, l'intero sistema di simulazione, nella sua versione finale, è stato testato per valutarne l'usabilità e per valutare le prestazioni dell'operatore in termini di Situation Awareness e Workload. I test, eseguiti da allievi piloti, hanno dimostrato che il sistema permette all'operatore, in particolare quando livelli di automazione intermedi sono implementati, di mantenere elevati livelli di Situation Awareness durante tutto l'arco della missione e che, il costruito dei comandi di alto livello, la limitata complessità della decisione, unitamente all'utilizzo del touchscreen come input device, hanno richiesto adeguati livelli di workload sia fisico che cognitivo.

I risultati raggiunti possono essere ritenuti incoraggianti perché potrebbero dare un contributo alla risoluzione dei problemi che riguardano gli UAV. L'isolamento

sensoriale dell'operatore ed i problemi legati al disorientamento spaziale potrebbero essere risolti utilizzando un unico schermo virtuale che fornisce all'operatore tutte le informazioni, visive ed uditive, riguardanti la missione e che permette di avere una visuale dello scenario anche da un punto di vista esterno del velivolo. I problemi legati al pilota esterno, alla comunicazione tra gli operatori e al ritardo della comunicazione tra l'operatore ed il velivolo potrebbero essere risolti implementando un livello di automazione che aumenti l'autonomia del velivolo in modo che questo sia in grado di "agire anche da solo" in particolari fasi della missione e di cooperare con l'operatore per una modifica della missione, in base alle condizioni dello scenario operativo. Inoltre, questa accresciuta autonomia da parte del velivolo, se unita con lo sviluppo di capacità "sense", potrebbe contribuire a risolvere il problema dell'inserimento del velivolo nel traffico civile e permettere un maggiore utilizzo degli UAV.

Bibliografia

- [1] http://it.wikipedia.org/wiki/Fratelli_Montgolfier
- [2] http://it.wikipedia.org/wiki/Fratelli_Wright
- [3] Jane's Unmanned Aerial Vehicle and Targets, Edited by Kenneth Munson.
- [4] H.Geer, C. Bolkcom, "*Unmanned Aerial Vehicles: Background and Issues for Congress*", CRS Report for Congress, Undated November 21, 2005.
- [5] S.A.Cambone, K.Krieg, P.Pace, L.Wells, *Unmanned Aircraft System (UAS) Roadmap 2005 – 2030*, Department of Defense, United State of America.
- [6] Maurizio Di Loreto, "*Impiego Joint e Combined di Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Stato dell'Arte e Prospettive Future di Impiego*", Centro Militare di Studi Strategici, anno accademico 2006.
- [7] N.J.Cooke, H.L.Pringle, H.K.Pedersen, O.Connor, "*Human Factors of Remotely Operated Vehicles*", Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research, Volume 7, Edited By Eduardo Salas.
- [8] K.W. Williams, "*A summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications*", December 2004, Civil Aerospace Medical Institute, Federal Aviation Administration, Oklahoma City, OK 73125.
- [9] K.W. Williams, "*Human Factors Implications of Unmanned Aircraft Accidents: Flight Control Problems*", April 2006, Final Report, Civil Aerospace Medical Institute, Federal Aviation Administration, Oklahoma City, OK 73125.
- [10] J.S.McCarley, C.D.Wickens, "*Human Factors Implications of UAVs in the National Airspace*", Technical Report AHFD-05-05/FAA-05-01, April 2005, Prepared for Aviation Administration Atlantic City International Airport, NJ.
- [11] J.S.McCarley, C.D.Wickens, "*Human Factors Concern in UAV Flight*", Institute of Aviation, Aviation Human Factors Division, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [12] D.B. Kaber, M.R. Endsley, "*The effects of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task*", Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2003, 1-40.
- [13] I. A. McManus, Rodney A. Walker, "*Multidisciplinary Approach to Intelligent Unmanned-Airborne-Vehicles Mission Planning*", Journal of Aircraft, Vol.43, No.2, March-April 2006, pp.318-335.

-
- [14] T.B. Sheridan, "*Human and Automation*", a John Wiley & Son, Inc., Santa Monica, Publications, 2002.
- [15] M.L. Cummings, J.T.Platts, A. Sulmistras, "*Human Performance Considerations in the Development on Interoperability Standards for UAV Interface*", Moving Autonomy Forward Conference 2006, De Vere Hotel Belton Woods, Lincoln.Uk.
- [16] R.E. Weibel, "*Unmanned Aerial Vehicle, Human Supervisory Control and Semi-Structured*", Massachusetts Institute of Technology.
- [17] F.Di Nocera, "*Che cos'è l'Ergonomia Cognitiva*", Carocci Editore.
- [18] R.A. Best, Jr, "Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR) Programs: Issues for Congress", CSR Report for Congress, updated February 22, 2005.
- [19] <http://www.aiaa.org/aerospace/Article.cfm?issuetocid=365&ArchiveIssueID=39>
- [20] C.D. Wickens, J. D.Lee, Y.Liu, S.G. Becker, "*An Introduction to Human Factors Engineering*", second edition, Pearson, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- [21] M.R.Endsley, "*Automation and Situation Awareness*", Automation and human performance: Theory and applications, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, pp.163-181.
- [22] F.Ferlazzo, "*Metodi di Ergonomia Cognitiva*", Carocci Editore.
- [23] M.La Rosa, P.Cenni, P.Gazzi, "Un percorso formativo per la professione di ergonomo", Sociologia del lavoro, Teorie e ricerche, FrancoAngeli.
- [24] P.J.Antsaklis, K.M. Passino, "*Toward Intelligent Autonomous Control Systems: Architecture and Fundamental Issues*", Journal of Intelligent and Robotic Systems 1: 315-342, 1989.
- [25] K. S. Tso, G. K. Tharp, W. Zhang, and A. T. Tai, "*A multi-agent operator interface for unmanned aerial vehicles*" in Proceedings of the 18th Digital Avionics Systems Conference, (St. Louis, MO), pp.6.A.4.1-6.A.4.8, Oct. 1999.
- [26] K. S. Tso, G. K. Tharp, A. T. Tai, M. H. Draper, G. L. Calhoun, and H. A. Ruff, "*A human factors testbed for command and control of unmanned air vehicles*" in Proceedings of the 22nd Digital Avionics Systems Conference, (Indianapolis, IN), Oct. 2003.
- [27] H.A.Ruff, G.L.Calhoun, M.H.Draper, J.V.Fontejon, B.J.Guilfoos, "*Exploring Automation Issues in Supervisory Control of Multiple UAVs*", Proceedings of the Human Performance, Situation Awareness and Automation Technology Conference, March, 2004, pp.218-222.

-
- [28] G. Barbato, G. Feitshans, R. Williams, T. Hughes, “*Operator Vehicle Interface Laboratory: Unmanned Combat Air Vehicle Controls & Displays for Suppression of Enemy Air Defences*” from Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology, 2002.
- [29] B.E. Walter, J.S. Knutzon, A.V. Sannier and J.H. Oliver, “*VR Aided Control of UAVs*”, 3rd AIAA Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, Paper No. AIAA 2004-6320, Chicago, IL, September 20-23, 2004.
- [30] C.D. Wickens, S.R. Dixon, “*Human Machine Interface Analysis of Unmanned Vehicle Systems*”, Final Technical Report, HFD-06-1/MAAD-06-1, January 2006.
- [31] B. Cervin, C. Mills, B.C. Wunsche, “*A 3D Interface for an Unmanned Aerial Vehicle*”, Proceedings of Image and Vision Computing '04, 21-23 November 2004, Akaroa, New Zealand.
- [32] A. Boccalatte, F. De Crescenzo, F. Flamigni, F. Persiani, “*A Highly Integrated Graphic Environment for Flight Data Analysis*”, XV ADM - XVII INGEGRAF International Conference, Sevilla, June 1st-3rd 2005.
- [33] <http://www.aiaa.org/aerospace/Article.cfm?issuetocid=233&ArchiveIssueID=28>.
- [34] M. Barbier, E. Chantry, “*Autonomous mission management for Unmanned Aerial Vehicles*”, Aerospace Science and Technology, Volume 8, Issue 4, June 2004, Pages 359-368.
- [35] S.A. Bortoff, “*Path Planning for UAVs*”, Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June 2000.
- [36] R.D'Andrea, M. Jun, “*Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments*”, Chapter of “*Cooperative Control. Models, Application and Algorithms*”, Kluwer, edited by S. Butenko, R. Mulphey, and P. Pardalos.
- [37] J. How, E. King, Y. Kuwata, “*Flight Demonstrations of Cooperative Control for Uav Teams*”, Proceedings of AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference, Workshop and Exhibit, 20-23 September 2004, Chicago, Illinois.
- [38] J. C. Rubio, Juris Vagners, Rolf Rysdyk, “*Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions*”, AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference 20 - 22 September 2004, Chicago, Illinois.

-
- [39] J. How, Y. Kuwata, “*Stable Trajectory Design for Highly Constrained Environments using Receding Horizon Control*”, Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004.
- [40] M. Norsell, *Multistage Trajectory Optimization with Radar-Range Constraints*, Journal of Aircraft, Vol42, N.4, July-August 2005.
- [41] S. Rathinam, M. Zennaro, T. Mak, R. Sengupta, *An Architecture for UAV Team Control*.
- [42] A. Richards, J. Bellingham, M. Tillerson, J. How, *Coordination and Control of Multiple UAVs*, Space Systems Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- [43] Carlo Casarosa, *Meccanica del Volo*, Edizioni Plus, Press Pisa University.
- [44] M.E. Endsley, R. Sollenberger, E. Stein, “*Situation Awareness: a comparison of measures*”, Proceedings of the Human Performance, Situation Awareness and Automation: User Centered Design for the New Millennium Conference, October 2000.
- [45] K.T. Ulrich, S. D. Eppinger, “*Progettazione e sviluppo prodotto*”, McGraw-Hill

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutta la mia famiglia per il sostegno dato in questi ulteriori tre anni di studio.

Desidero ringraziare il Prof. Franco Persiani che è sempre stato un esempio da seguire per la sua professionalità e umanità. Non mi ha trasmesso solo conoscenza ed entusiasmo ma anche grande umanità, guidandomi, per macroistruzioni, nella mia attività scientifica ma anche interessandosi anche alla mia vita privata. Una caratteristica, tra le tante, che lo contraddistingue e che spero di ereditare è la sua capacità di mettersi al livello delle persone con cui parla.....

Ogni parola presente nel vocabolario italiano non darebbe il senso di quello che ha rappresentato l'Ing. Francesca De Crescenzo. Durante i tre anni di dottorato è stata una maestra ma soprattutto un'amica!! La sua umanità e comprensione hanno spesso calmato gli entusiasmi e gli "sconforti" di un giovane (??) dottorando. La sua professionalità, serietà, allegria, diplomazia, ambizione, multidisciplinarietà, pazienza..... mi ha trasformato da quasi neo-laureato in un dottore di ricerca. Spero di mettere sempre in pratica i suoi insegnamenti.GRAZIE FRA!!

Ringrazio l'Ing. Tiziano Bombardi per la pazienza avuta nel guidarmi nell'oscuro mondo della programmazione.

I colleghi Massimiliano Fantini e Sara Bagassi.

L'Ing. Ivan Meneghin, o per gli amici IVANNN,un' Amico.

Vale, Riccardo, Gatto, il Nanni, Jean-Daniel (lo Svizzero), Diego Cop, Dany, Alessandro, Enrico, GianMarco, Fabrizio, Alessandro, Leonardo, Matteo, Andrea, Angela, Roberta, Cosetta, Simona, Daniele, Cinzia.

Cristina e Marilena.....

Gli ingegneri di Alenia Aeronautica: Marco, Fabio, Andrea D., Davide, Andrea G.

Il Prof. Lecce dell'Università di Napoli, grazie al quale è iniziato tutto, ed i correlatori della tesi di laurea, Barbara Procaccini, Mauro Borrelli, Luca Ferrazzano.

Un pensiero va a chi, giocando a carte, cucinando o ricamando mi guarda e mi protegge dall'alto.