

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Premessa

Il volo acrobatico nasce dalla passione per l'alta spettacolarità delle evoluzioni aeree messe in atto durante i combattimenti, ed esalta sicurezza, padronanza, sensibilità e coordinazione in qualsiasi assetto di volo.

Da sempre l'acrobazia aerea ha affascinato ed entusiasmato e per le caratteristiche di alta professionalità, dedizione e preparazione tecnica degli uomini che la rendono possibile, costituisce vanto dell'Aeronautica Militare.

L'acrobazia aerea collettiva, a motivo delle sue caratteristiche intrinseche, attualmente mal si presta ad una gestione automatizzata della configurazione dei velivoli, che volano mantenendo posizioni relative, velocità, orientamenti, velocità angolari l'uno rispetto all'altro, in condizioni estreme.

*“.....non utilizziamo alcun tipo di ausilio
se non la mente umana e la nostra preparazione.
Al momento non esiste nessuna applicazione o
artificio in grado di riprodurre il volo acrobatico.....”*

**Cap. Andrea SAIA
(Frecce Tricolori)**

A differenza del volo aereo in formazione non acrobatico, l'acrobazia aerea collettiva presenta un ulteriore grado di difficoltà: *il sincronismo*, elemento essenziale all'alta spettacolarità delle manovre.

Lo scopo di questa tesi è quello di fornire un valido supporto informatico alla progettazione e allo studio delle difficoltà delle manovre, nonché alla fase di addestramento dei piloti e alla progettazione di air shows.

L'applicazione sviluppata permette "*la definizione delle traiettorie spaziali dei velivoli*" e costituisce il primo passo nella realizzazione di supporti informatici, che consentiranno in futuro di riprodurre e automatizzare il volo acrobatico.

Attualmente non esistono software che permettano di definire traiettorie spaziali per l'acrobazia collettiva, in grado di mostrare l'evoluzioni in 3D, ma solo applicazioni che producono diagrammi 2D che rappresentano le sequenze acrobatiche, tra i quali il più noto ed accreditato è *Aresti 6*.

*".....Aresti software works as a subset of Stencil.....
Aresti 6 is a 2-dimensional diagramming system.
Aresti 6 is used for drawings and forms depicting aerobicic sequences."*

Alan Cassidy
Aresti Software
Freestyle Aviation

La presente tesi è strutturata in modo da evidenziare le caratteristiche dell'applicazione realizzata e giustificare le scelte e le semplificazioni adottate.

Nel presente capitolo sono riportate le caratteristiche della formazione (*con riferimenti esemplificativi alla P.A.N.*), riferimenti ai software esistenti e alcune delle manovre base del combattimento aereo da cui prendono spunto le manovre acrobatiche.

Nel capitolo 2 sono trattati gli aspetti fondamentali di meccanica del volo che hanno dettato i requisiti software dell'applicazione, distinguendo in *caratteristiche e prestazioni dei velivoli acrobatici e requisiti utente*.

Nel capitolo 3 sono esposte le caratteristiche strutturali e funzionali dell'applicazione e le problematiche affrontate per realizzare un software intuitivo e facile da usare.

Il capitolo 4 è dedicato alla implementazione e alle tecniche usate per la costruzione di un' interfaccia grafica capace di mettere a disposizione dell'utente le funzionalità previste.

Nel capitolo 5 è affrontato il tema del rendering 3D e i problemi incontrati per la ridefinizione delle traiettorie ad istanti temporali multipli.

Nel capitolo 6 ho ritenuto opportuno descrivere il progetto di test condotto durante l'implementazione e le tecniche usate, tralasciando la documentazione prodotta.

In appendice al presente lavoro riporto alcune delle procedure, realizzate in Matlab Language, che mostrano le potenzialità di questo ambiente di sviluppo, la procedura di calcolo delle traiettorie di inseguimento, l'applicazione di installazione del software prodotto e per finire le caratteristiche del modello 3D (*da me realizzato*) del velivolo MB-339 A/PAN in dotazione alle Frecce Tricolore, a cui spesso farò riferimento.

1.2 La formazione nel volo acrobatico collettivo

Il numero dei velivoli che compone la formazione acrobatica varia da un minimo di 3 ad un massimo di 10 come nel caso delle Frece Tricolore.

Nella formazione ogni velivolo ha un ruolo ben preciso, che ogni pilota osserverà per la sicurezza e la riuscita dell'evoluzione.

Di seguito facendo riferimento alla P.A.N., sono riportate le caratteristiche dei componenti della formazione a scopo esemplificativo e perché molti degli esempi riportati in seguito fanno riferimento ad essa, tuttavia ciò non preclude la possibilità (*prevista dall'applicazione realizzata*) di riferirsi ad una formazione con un numero inferiore di velivoli.

Ogni manovra viene eseguita secondo le direttive date dal leader, che adatta le traiettorie in funzione delle condizioni ambientali e costituisce il punto di riferimento principale nell'esecuzione della manovra per tutti i gregari.

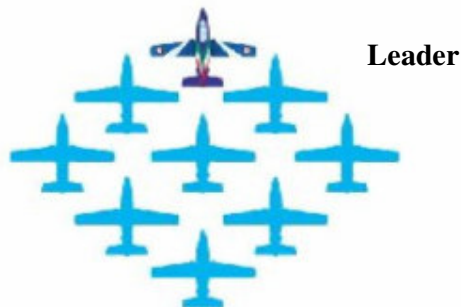
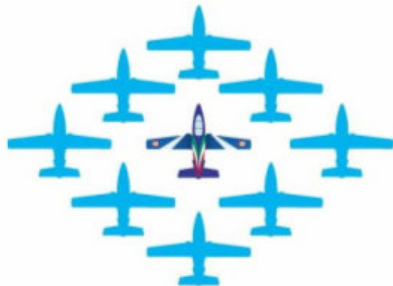


Figura 1.1

Nell'esecuzione delle acrobazie il 1° fanalino (o leader di seconda sezione) deve eseguire le manovre di separazione ed incrocio in perfetta sincronia con il leader, effettuando i ricongiungimenti sempre in vista del pubblico.

1° Fanalino
1st Slot



2° Fanalino
2nd Slot

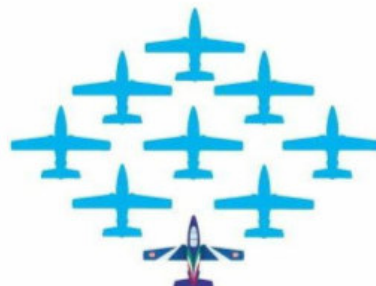
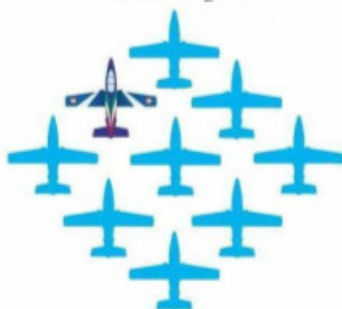


Figura 1.2

Il solista riveste un ruolo altamente spettacolare nell'esecuzione della manovra e risalta le caratteristiche di maneggevolezza del velivolo.

Gli altri ruoli della formazione

1° Gregario Sinistro
1st left wingman

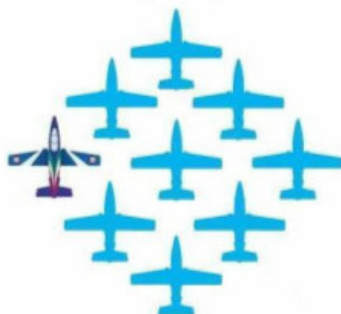


1° Gregario Destro
1st right wingman



Figura 1.3

2° Gregario Sinistro
2nd left wingman



2° Gregario Destro
2nd right wingman



Figura 1.4

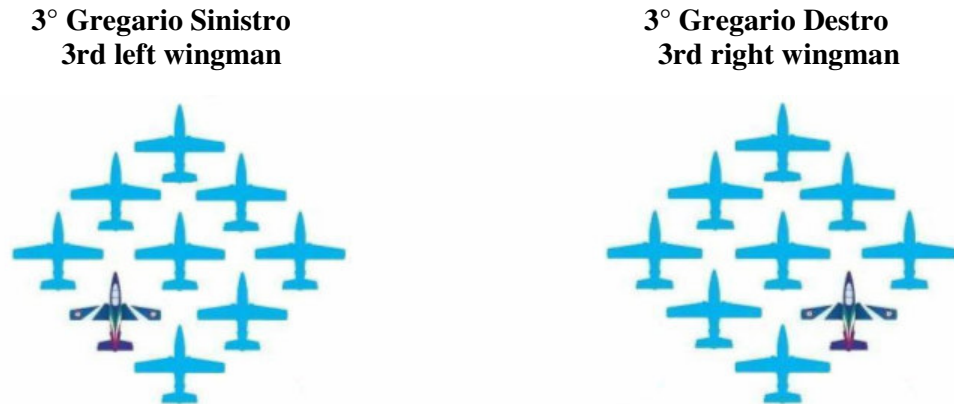


Figura 1.5

Il volo acrobatico collettivo è condotto attualmente facendo affidamento alle capacità di valutazione dei piloti, che volano *a vista*, rispettando precise regole di manovra in relazione, agli ordini impartiti dal leader, dai capi sezione, e alla posizione dei velivoli di riferimento e dei riferimenti a terra.

Il software realizzato non permette ovviamente di riprodurre la situazione di volo reale, la quale dipende da molteplici fattori, che vanno oltre la definizione delle traiettorie spaziali dei velivoli (*raffiche, condizioni di luce, morfologia del terreno*), ma costituisce il punto di partenza per sviluppare applicazioni di simulazione che tengano conto dei suddetti fattori.

La gestione del volo in formazione può essere centralizzata o decentralizzata. In una gestione centralizzata abbiamo un gestore della topologia della formazione, nel caso di gestione decentralizzata ogni singolo velivolo ha potere decisionale in accordo con le regole di mantenimento della formazione.

Nel volo acrobatico il tipo di gestione predominante è quello centralizzato affidato ad uno o più velivoli della formazione. Il ruolo di gestore è affidato al leader che decide il via dell'esecuzione della manovra, seguito dal 1° Fanalino e dal 2° Fanalino; i gregari seguiranno a seconda della manovra, il leader o i capi di sezione, rispettando gli algoritmi di manovra.

Nel volo acrobatico è presente anche una componente di gestione decentralizzata del volo in formazione, in quanto non sempre i riferimenti sono costituiti da altri velivoli a motivo della non visibilità della loro posizione. E' proprio questa componente ha rendere ancora più spettacolare il volo acrobatico.

1.3 Software per la pianificazione di air shows

Aresti 6 è tra i software più conosciuti per la pianificazione di air shows e di gare acrobatiche e permette, sfruttando la simbologia Aresti, di descrivere con un linguaggio simbolico le evoluzioni aeree.

Come riferito da *Alan Cassidy*, *Aresti 6 software* descrive con diagrammi 2D le sequenze acrobatiche. Di seguito sono riportati degli esempi tipici dei diagrammi prodotti con *Aresti 6 software*, nei quali è messa in evidenza l'uso della simbologia Aresti.

Sequenza di due Half Cuban Eight intervallati da uno snap roll

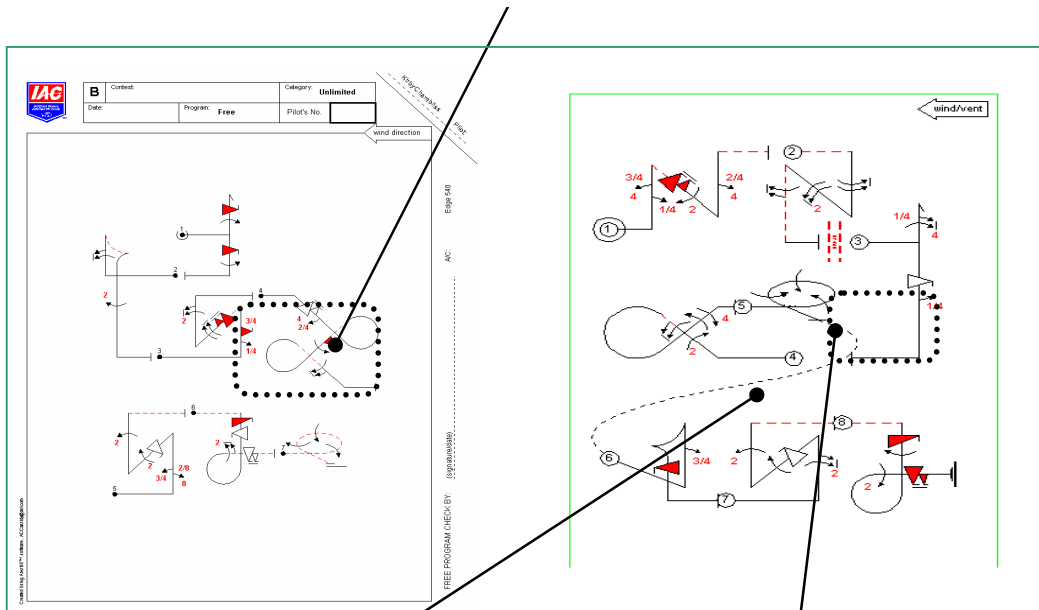


Figura 1.6 – Aresti 6 Software

Indica che il velivolo sta volando con l'asse z della terna assicorpo non diretta (convenzionalmente) verso il centro della terra

Indica l'esecuzione di una manovra che combina una virata a quota costante di 270 gradi e un roll rate costante

La simbologia aresti costituisce un formalismo consolidato di cui si è tenuto conto nella realizzazione dell'applicazione oggetto di questa tesi, prevedendo altresì la possibilità di definire nuove figure elementari, in modo da personalizzare la progettazione di air shows.

Aresti 6 software ha il grande pregio di sfruttare un linguaggio grafico, ma non riesce a dare una visione completa della formazione nel volo acrobatico collettivo, per cui si presta maggiormente alla pianificazione di air shows per singoli velivoli (*gare acrobatiche*). Nell'applicazione realizzata invece chi pianifica l'air show ha costantemente la possibilità di verificare il comportamento di uno qualsiasi dei velivoli o di un gruppo di essi.

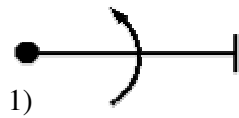
1.3.1 Simbologia Aresti

Per permettere un confronto con le caratteristiche dell'applicazione realizzata, di seguito vengono riportati alcuni dei simboli Aresti più comuni ed una breve spiegazione della manovra compiuta dal velivolo.

Alcune delle seguenti figure acrobatiche furono inventate durante i combattimenti aerei nella WW I, in occasione della quale si osservò che le missioni di due o più velivoli avevano maggiori possibilità di successo. Il volo acrobatico collettivo affonda quindi le sue radici, nei combattimenti aerei di formazione della WW I ed esprime così anche caratteristiche strategiche.

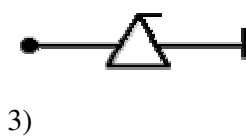
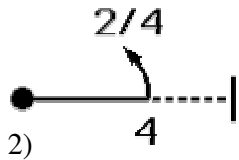
L'inizio delle figure acrobatiche, rappresentate tramite la simbologia Aresti, coincide con la posizione del pallino nero, la fine con il segmento verticale. I simboli Aresti indicano che ogni figura acrobatica comincia e finisce con un tratto rettilineo in cui il velivolo può trovarsi in assetto rovesciato o livellato.

Gli elementi usati nella simbologia Aresti sono segmenti orizzontali, verticali e inclinati di 45 gradi, continui e non (*rotazione intorno all'asse X della terna assi corpo del velivolo*), che indicano un volo livellato in quella direzione; per l'indicazione del roll rate sono raffigurate delle frecce con il valore frazionario, riferito ad una rotazione completa del velivolo intorno all'asse X della terna assi corpo.



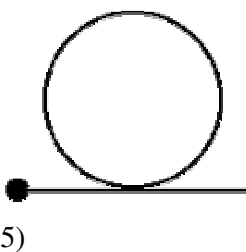
Slow Roll

Il roll rate è costante e l'asse longitudinale del velivolo è livellato. Questa manovra richiede un cambiamento costante dei comandi di timone ed alettone. Il valore alla base del simbolo indica il numero di punti in cui l'angolo di rollio cambia, per cui i valori 2,4,8 descrivono una variazione non continua dell'angolo di rollio di 180 gradi,90 gradi e 45 gradi. Se tale valore non è indicato l'angolo di rollio varia in maniera costante. La frazione sulla freccia è riferita ad una rotazione completa.



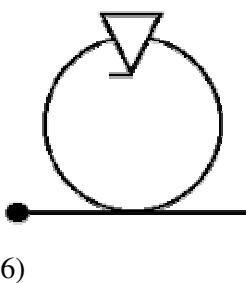
Snap Roll

È simile ad una vite orizzontale e consiste in una rotazione intorno ad un asse immaginario posizionato sull'ala ed avente la stessa direzione dell'asse longitudinale del velivolo. In snap roll 3) è applicata una forza positiva nel verso dell'accelerazione di gravità, in snap roll 4) una forza negativa.



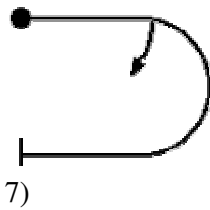
Loop

È una delle manovre base più presenti nelle evoluzioni acrobatiche; viene eseguita mantenendo il velivolo nel piano tangente la traiettoria con le ali ortogonali alla direzione di volo. La quota a cui termina la manovra è la stessa a cui è iniziata.



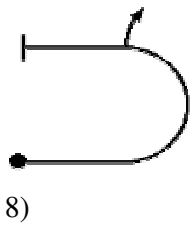
Avalanche

È un loop base con un una rotazione di rollio alla sua sommità (di solito uno snap roll). La quota a cui termina la manovra è la stessa a cui è iniziata.



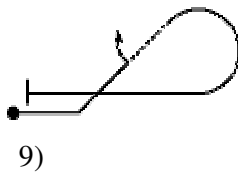
Split-S

La manovra combina una rotazione di rollio di 180 gradi e $\frac{1}{2}$ loop in discesa ed è messa in atto per invertire la direzione del velivolo. Il velivolo perde quota ma aumenta la sua velocità.



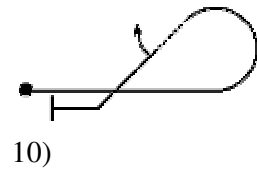
Immelman

La manovra combina $\frac{1}{2}$ loop in salita ed una rotazione di rollio di 180 gradi ed è messa in atto per invertire la direzione del velivolo. Il velivolo prende quota ma diminuisce la sua velocità.



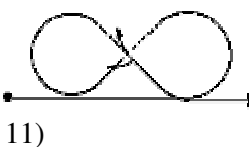
Reverse Half Cuban Eight

La manovra combina una salita a 45 gradi una rotazione di rollio di 180 gradi ed un $\frac{5}{8}$ di loop da cui il velivolo esce in assetto orizzontale. Questa manovra è messa in atto per invertire la direzione del velivolo mantenendo invariate quota e velocità.



Half Cuban Eight

La manovra combina un $\frac{5}{8}$ di loop da cui il velivolo esce in discesa di 45 gradi compiendo una rotazione di rollio di 180 gradi ritrovandosi così in assetto orizzontale. Questa manovra è messa in atto per invertire la direzione del velivolo mantenendo invariate quota e velocità.



Cuban Eight

La sequenza continua di due Half Cuban Eight permette di realizzare questa figura acrobatica con il vincolo che il raggio del loop sia costante e la quota di inizio manovra uguale a quella di uscita.



12)

Reverse Cuban Eight

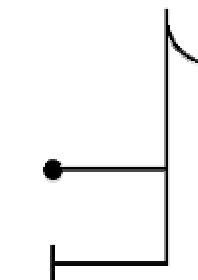
La sequenza continua di due Reverse Half Cuban Eight permette di realizzare questa figura acrobatica con il vincolo che il raggio del loop sia costante e la quota di inizio manovra uguale a quella di uscita.



13)

Inside-Outside Eight

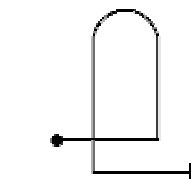
Questa figura è simile al Cuban Eight con la differenza che il velivolo non compie nessun rotazione intorno al suo asse longitudinale.



14)

Hammerhead

I tratti spigolosi indicano un raggio costante del loop. In questa manovra il velivolo compie $\frac{1}{4}$ di loop che lo introduce in una salita verticale al termine della quale il velivolo evolve, facendo leva sull'asse z della terna assi corpo, fino a puntare l'asse longitudinale diretto verso il basso. Il *naso* del velivolo si muove lungo un cerchio verticale e quando punta all'orizzonte il velivolo ha acquisito nuovamente velocità per poter compiere l'ultimo $\frac{1}{4}$ di loop che lo porta ad invertire la sua direzione rispetto a quella iniziale (vedi Fig. 11 air show Frece Tricolore).



15)

Humpty-Bump

Questa figura si compone di $\frac{1}{4}$ di loop con lo stesso raggio, una salita, $\frac{1}{2}$ loop con raggio non necessariamente costante e una discesa terminante con $\frac{1}{4}$ di loop avente raggio costante.



16)

Competition turn

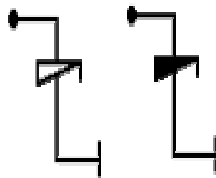
Il velivolo compie una virata di 270 gradi mantenendo costante la quota e l'angolo di rollio.



17)

Rolling turn

Il velivolo compie una virata di 360 gradi mantenendo costante la quota ed imponendo una rotazione di rollio costante. Nelle diverse varianti è nota anche come schneider.



18)

Spin

Il velivolo va in avvitamento compiendo un numero prefissato di giri e sembra essere in stallo. Nelle diverse varianti questa manovra è nota anche come Lomčovak.

1.4 Manovre del combattimento aereo e volo acrobatico

Le manovre del combattimento aereo generalmente sono viste in funzione di due velivoli *attacker* e *defender*, ma durante la WW I viene sperimentato con successo il combattimento aereo collettivo.

Le manovre basilari non sono necessariamente viste in funzione di un avversario (*es. accelerations, climbs, turns*) e le loro caratteristiche sono influenzate dal tipo di velivolo.

Di seguito vengono riportate alcune delle manovre base del combattimento aereo in quanto costituiscono la fonte di ispirazione del volo acrobatico, cercando di cogliere le analogie e i riferimenti alle evoluzioni delle Frece Tricolori e alla simbologia Aresti.

Rolling scissor

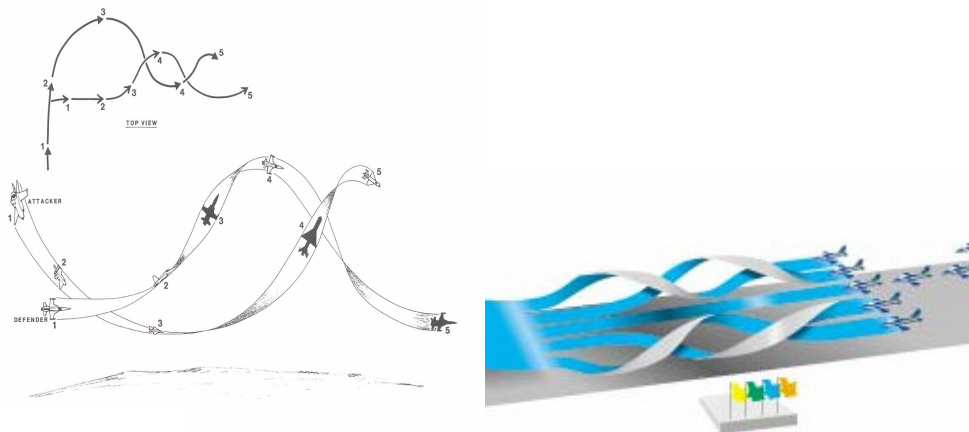
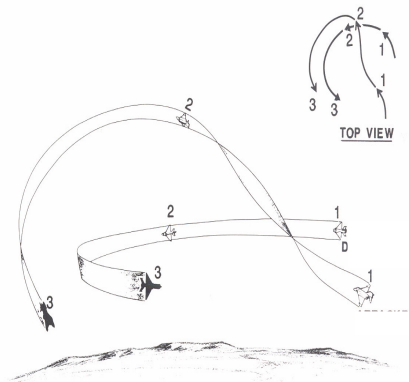


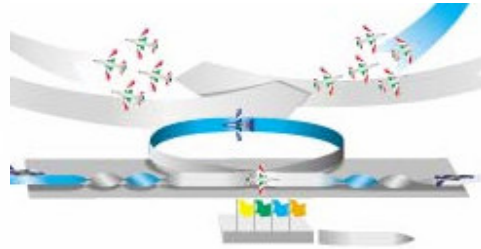
Figura 1.7

Nel caso del rolling scissor non esiste un simbolo Aresti corrispondente, anche se lo snap roll è quello che più si presta a descriverlo, in quanto il velivolo compie una rotazione intorno ad un asse immaginario posizionato su una delle ali nella direzione dell'asse longitudinale. Nel rolling scissor due velivoli avanzano ruotando intorno ad un asse immaginario non posizionato sul velivolo e nella direzione di avanzamento.



Lag - Pursuit Roll

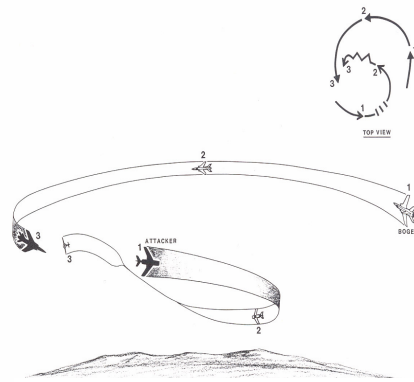
Il velivolo defender compie uno schneider o turn roll, mentre l'attacker una salita e 5/8 di loop.



Incrocio Aquila

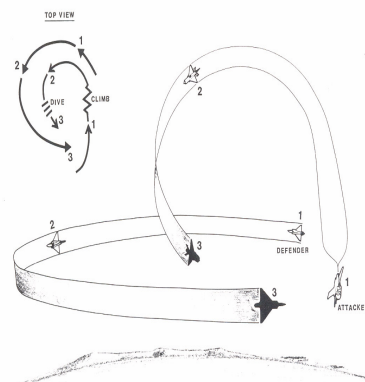
Il solista compie uno schneider o turn roll, mentre la formazione incrocia. Il 1° Fanalino con il 3° gregario destro e sinistro e il 2° Fanalino compiono un lag-Pursuit roll.

Figura 1.8



Low - Yow Yow

Il velivolo defender compie uno schneider o turn roll, mentre l'attacker un turn roll e salita a 45 gradi.



High - Yow Yow

Il velivolo defender compie uno schneider o turn roll, mentre l'attacker una salita, 1/2 loop, una discesa e 1/4 di loop.

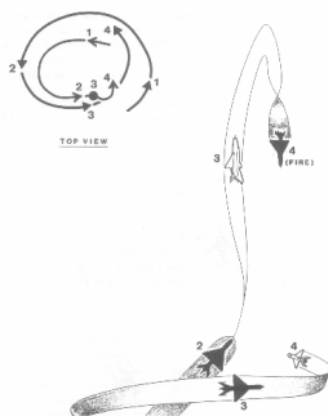
Figura 1.9

Il corrispondente simbolo aresti per il *lag-pursuit roll* (fig 1.8) è l'half cuban eight, per l'*high yow yow*(fig 1.9) l'Humpty-Bump invece per il *low yow yow* non esiste un simbolo aresti specifico, ciò spiega la scelta adottata nella realizzazione dell'applicazione oggetto di questa tesi, di permettere all'utente di specificare con un grado di accuratezza soggettivo nuove manovre base, in aggiunta a quelle proprie del formalismo Aresti.



Figura 1.10

Nell'evoluzione raffigurata sopra (fig. 1.10) facendo riferimento alla simbologia aresti, la formazione esegue un looping e un l'half cuban eight, il solista compie un tonneaux lento (*slow roll del formalismo aresti*).



Modified-Zoom Maneuver



Scampanata

Figura 1.11

Nella figura 1.11 è possibile cogliere le analogie della manovra compiuta dall'attacker del *Modified-Zoom Maneuver* e il solista delle Freccie Tricolore nella *scampanata*; è evidente la corrispondenza con il simbolo Aresti *Hammerhead*.

Le analogie messe in evidenza fino a questo momento fanno riferimento a manovre del combattimento aereo in funzione di un *attacker* e un *defender*, di seguito sono riportate le analogie tra le manovre del combattimento collettivo e le evoluzioni delle Freccie Tricolore.

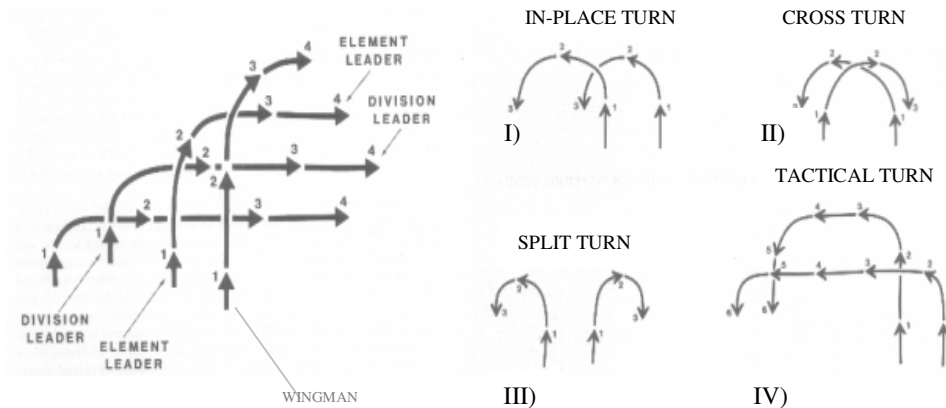


Figura 1.12

In figura 1.12 è riportato uno schema per una formazione di quattro velivoli (*German Schwarm in Finger Four*) in cui è possibile cogliere le analogie anche nella denominazione dei ruoli con la pattuglia delle Freccie Tricolori (*division leader* → *leader / 1° Fanalino* *wingmans* → *gregari*).

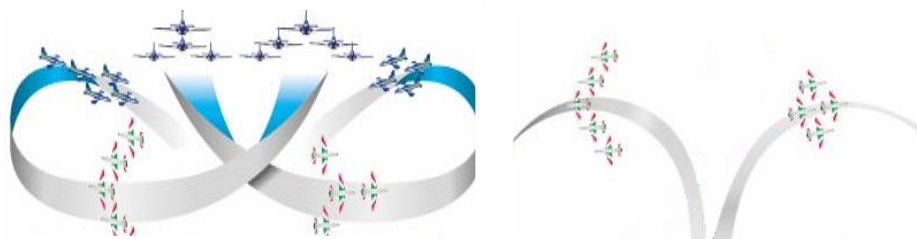


Figura 1.13 – Cross Turn / Split Turn

In figura 1.13 è raffigurato un *cross turn* e uno *split turn (o big apple)* compiuto dalle Frece Tricolore.

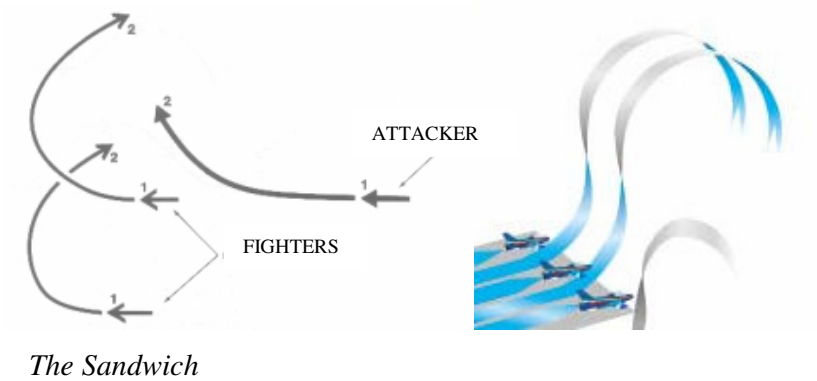


Figura 1.14

In figura 1.14 è raffigurato una manovra a tenaglia tra le più spettacolari del repertorio delle Frece Tricolori (*incrocio della bomba*).