ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

Seconda Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

# APPROCCI MULTI-AGENTE AL CONTROLLO DEL TRAFFICO AEREO

**Progetto per il corso di Sistemi Multi-Agente LS**

Luigi Guagneli

Prof.Andrea Omicini

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

# Indice


**1 Introduzione** **3**
- 1.1 Definizione . . . 3
- 1.2 Importanza della computerizzazione . . . 4

**2 Contestualizzazione del problema** **6**
- 2.1 Incremento del traffico aereo . . . 6
- 2.2 Approcci tradizionali alla gestione del traffico aereo . . . 7
- 2.3 Controllo del traffico Aereo basato sugli agenti . . . 8

**3 Primo approcio** **10**
- 3.1 Gestione del flusso di traffico aereo . . . 10
- 3.2 Configurazione dello spazio aereo . . . 11
- 3.3 FACET . . . 11
- 3.4 Evoluzione del sistema . . . 11
- 3.5 Flusso del traffico aereo basato su agenti . . . 13
- 3.6 Definizione degli agenti . . . 14
- 3.7 Definizione delle azioni degli agenti . . . 15
- 3.8 Selezione degli algoritmi di apprendimento degli agenti . . . 15
- 3.9 Selezione della struttura ricompensa dell'agente . . . 16
  - 3.9.1 Differenza di ricompensa . . . 16
  - 3.9.2 Stima del difference reward . . . 17
  - 3.9.3 Difference rewards precalcolato . . . 18

**4 Un ulteriore approccio ad agenti al controllo del traffico aereo** **19**
- 4.1 Considerazioni per approccio ad agenti . . . 19
- 4.2 Infrastruttura del software . . . 21
  - 4.2.1 SisBDPar . . . 22
  - 4.2.2 JADE . . . 22
  - 4.2.3 DASE . . . 22

**5 Terzo approccio: AgentFly** **24**
5.1 AgentFly, software per simulazione, pianificazione e Collision Avoidance . . . . . 24
5.2 Pianificazione . . . . . 25
5.3 Collision Avoidance . . . . . 26

**6 Conclusioni** **29**

# Capitolo 1

# Introduzione

## 1.1 Definizione

**Air traffic control (ATC)** è un servizio fornito da controllori a terra che dirigono gli aerei sulla terra e in aria. Lo scopo principale dei sistemi ATC in tutto il mondo è quello di separare gli aeromobili per evitare collisioni, per organizzare e accelerare il flusso del traffico, e per fornire informazioni e supporto per i piloti quando possibile. In alcuni paesi, ATC può anche giocare un ruolo di sicurezza e di difesa (come negli Stati Uniti), o essere interamente gestito dai militari (come in Brasile).
La prevenzione delle collisioni fa riferimento alla ***separation***, un termine che si riferisce alla prevenzione degli aeromobili di avvicinarsi troppo l'uno l'altro mediante l'uso di distanze minime di separazione laterale, verticale e longitudinale; molti aerei ormai dispongono di sistemi anticollisione che fungono da backup per l'osservazione e l'istruzione ATC. Oltre alla sua funzione primaria, l'ATC può garantire servizi aggiuntivi, come fornire informazioni ai piloti, su meteo e informazioni di navigazione e NOTAM (avvisi ai piloti). In molti paesi, i servizi ATC sono previsti per tutta la maggior parte dello spazio aereo, e i suoi servizi sono disponibili per tutti gli utenti (privati, militare e commerciale). Quando i controllori sono responsabili per la separazione di alcuni o di tutti gli aeromobili, tale spazio aereo viene chiamato "spazio aereo controllato" a differenza dello "spazio aereo non controllato", nel quale gli aerei possono volare senza l'uso del sistema di controllo del traffico aereo. A seconda del tipo di volo e la classe di spazio aereo, l'ATC può impartire ***instructions*** che sono tenuti a seguire i piloti, o semplicemente ***flight information*** (in alcuni paesi noto come advisories) per assistere i piloti che operano nello spazio aereo. In tutti i casi, però, il comandante ha la responsabilità finale per la sicurezza del volo, e può discostarsi dalle

istruzioni ATC in caso di emergenza.

## 1.2 Importanza della computerizzazione

Un "Sistema di Controllo del Traffico Aereo" può essere considerato come un "Sistema di trattazione dell'informazione in tempo reale". In un sistema di controllo "fonetico - manuale" puro, le operazioni di controllo per la maggior parte di natura essenzialmente intellettuale, sono effettuate in maniera rigidamente coordinata e in tempo reale da un gruppo di individui operanti in "equipaggi".

Malgrado l'elevata capacità di adattamento dell'uomo appropriatamente addestrato, esistono dei limiti di capacità del sistema che non possono esser superati senza che si proceda, man mano che il traffico aereo aumenta, ad una suddivisione sempre più spinta dei compiti assegnati a ciascun individuo e a ciascuno equipaggio. Si stabilisce in tal modo un circuito senza fine tra la dispersione dell'informazione e la riduzione dell'apporto effettivo di ciascuno individuo al lavoro d'insieme. Il risultato finale è che al di là di una certa densità di traffico che gravita su un Centro di Controllo, il tempo disponibile per la trattazione manuale dell'informazione risulta troppo breve per permettere che le stesse informazioni possano essere correttamente ed efficacemente utilizzate. Nasce in tal modo, una "insufficiente" capacità del sistema, con possibili dirette conseguenze anche sulla regolarità e sicurezza dei voli.

La funzione di controllo del traffico aereo implica la necessità di una pianificazione, in tempo reale, dei flussi di traffico in modo sia di assicurare il razionale uso degli spazi aerei, che di prevenire i rischi di collisione tra aerei in volo e tra aerei ed eventuali ostacoli. Ci si avvale, a tale scopo, di opportuni "Sistemi" di controllo, ciascuno dei quali utilizza appositi mezzi, tecniche e norme. Attualmente i Sistemi usati nei centri ATC sono il "***Procedurale-Radar***" ed il sistema "Automatico". Con il sistema "Procedurale-Radar" il controllore riceve i dati, riguardanti il traffico aereo, a mezzo dei piani di volo, dei collegamenti t/b/t con i piloti e delle informazioni radar. Confrontando le informazioni ricevute e memorizzando tutti i dati relativi alla situazione da controllare, egli elabora, in tempo reale, le istruzioni necessarie a garantire uno spedito e sicuro flusso di traffico. Ma quando tale traffico supera una certa intensità, lo sforzo di memorizzarne i dati significativi e la rapidità richiesta nella soluzione dei vari problemi, aumentano il carico di lavoro del controllore al punto che, in alcuni casi, esso raggiunge i limiti delle capacità umane. Si rende quindi necessario suddividere il lavoro tra più controllori. Va però osservato che i vantaggi ottenuti con tale suddivisione, quando essa

superi un certo limite (limite di massima efficienza), sono annullati dall'aumento del lavoro collettivo. Infatti, frazionando i problemi di controllo, si ha una notevole dispersione dei dati necessari alla loro soluzione e quindi un progressivo aumento del volume dei coordinamenti. Si giunge cosi ad una saturazione del "Sistema", quale risultato di una drastica riduzione dei tempi concessi all'elaborazione dei dati, in conseguenza del dilatarsi dei tempi necessari al loro reperimento. Una soluzione a tale problema, sia pure nei limiti appresso descritti, va ricercata nell'uso dei computer, che, elaborando un numero notevole di dati in tempi brevi, può sopperire alla lentezza della elaborazione umana. In particolare la computerizzazione di un sistema di controllo dovrebbe permettere:

**a)** riduzione dei carichi di lavoro mediante l'esecuzione di operazioni attualmente eseguite dai controllori o dai loro assistenti;

**b)** eliminazione degli errori umani;

**c)** esecuzione di operazioni che superino le capacità dei controllori, sottoposti alla pressione di un'alta densità di traffico.

# Capitolo 2

# Contestualizzazione del problema

## 2.1 Incremento del traffico aereo

La gestione efficiente, sicura ed affidabile del sempre crescente traffico aereo è oggi una delle sfide fondamentali di fronte all'industria aerospaziale. In una giornata tipica, più di 40.000 voli commerciali operano all'interno dello spazio aereo degli Stati Uniti, e la programmazione permette pochissimo spazio per ospitare le deviazioni dal comportamento atteso del sistema. Di conseguenza, il sistema risponde in maniera lenta al cambiamento delle condizioni meteorologiche o delle condizioni dell'aeroporto, portando un ritardo locale minore a trasformarsi, in cascata, in grandi congestioni regionali.
I dati del Federal Aviation Administration (FAA) mostrano che il meteo, le decisioni di routing e le condizioni aeroporto hanno causato 1.682.700 ore di ritardi nel 2007. Tali ritardi costano 41 miliardi di dollari (in termini di costi operativi delle compagnie aeree e costo per i passeggeri / imprese), e portato a 740 milioni di litri di carburante sprecato.
L'attuale gestione del traffico aereo si basa su un sistema centralizzato, strategia di routing gerarchico in grado di eseguire proiezioni di flussi che vanno da 1 a 6 ora. Pertanto, il sistema non solo è lento a rispondere ai cambiamenti, ma è anche al limite della sua capacità. Risulta difficile capire come i sistemi attuali e algoritmi possano ospitare il triplice aumento di traffico aereo atteso, previsto nei prossimi due decenni. A differenza di molti altri problemi di flusso nel quale il traffico in aumento è in parte assorbito dal miglioramento dell'hardware (per esempio, più server con memorie più grandi e CPU più veloci per internet routing), il dominio del traffico aereo necessita di trovare soprattutto soluzioni algoritmiche di maggior impatto sul problema del flus-

so rispetto a soluzioni infrastrutturali (ad esempio, il numero di aeroporti). Vi è quindi un forte bisogno di esplorare nuove soluzioni, distribuite e di adattative al problema di controllo del flusso aereo.

## 2.2 Approcci tradizionali alla gestione del traffico aereo

Il problema della gestione del flusso di traffico aereo è stato affrontato da numerosi principi primi di modellazione prospettici. Questi metodi tendono ad essere divisi in modelli Lagrangiani in cui si prendono in considerazione le dinamiche del singolo aeromobile e modelli euleriani (con aggregato) in cui sono modellati solo i pattern di flusso aggregato. In entrambi i casi la creazione del modello di ottimizzazione è un processo complesso e sono necessari numerosi passi di riduzione della complessità.

I modelli Lagrangiani per la gestione del flusso del traffico aereo comportano il calcolo delle traiettorie dei singoli aeromobili. Questi modelli possono essere utilizzati per una serie di problemi, dall'evitare le collisioni al ridurre la congestione. Sempre per il problema del collision avoidance vengono utilizzati modelli di traiettoria e euristiche di evasione su basi geometriche. La chiave del progresso in questo settore è stato il miglioramento dei modelli differenziali del flusso di traffico aereo, il miglioramento della stima di stato ibrido e la creazione di algoritmi specifici con tempo polinomiale di applicazione che possono essere utilizzati in sostituzione alla programmazione intera. Invece di prevedere il percorso di ogni singolo aeromobile, i modelli euleriano e di flusso aggregato prevedono pattern di flusso nello spazio aereo. Sebbene questi modelli perdono un po' di granularità fine dell'approccio Lagrangiano, conducono ad una semplificazione dello spazio aereo per consentire a più tecniche di ottimizzazione di essere applicate. Aggregando più settori, è emerso che la programmazione lineare potrebbe essere utilizzata per trovare soluzioni integrali per l'ottimizzazione del flusso aereo.
Oltre ad essere applicati al modello attuale di spazio aereo, i metodi di ottimizzazione tradizionali sono stati applicati a paradigmi "free flight", dove gli aerei possono migliorare l'efficienza mediante percorsi personalizzati. La quasi-linearizzazione si è dimostrata efficace nei problemi di volo libero in condizioni di traffico denso, mentre per la creazione delle loro rotte wind-optimal si sono mostrati efficaci i metodi di programmazione dinamica. Inoltre sono stati usati sistemi basati su regole per gestire i conflitti nei sistemi di volo libero.
Anche se questi approcci tradizionali sono ben noti ed efficaci in molti sce-

nari, sono difficili da applicare a situazioni in cui le condizioni cambiano localmente o l'automazione lavora fianco a fianco con i controllori umani. In primo luogo, tali algoritmi centralizzati sono lenti ad incorporare cambiamenti di condizioni in cui richiedono il ricalcolo di una simulazione completa per ogni serie di nuovi parametri. In secondo luogo, forniscono una soluzione monolitica nella quale è difficile, per i controllori del traffico aereo, distribuiti su tutto il sistema, fornire i dati o ricevere suggerimenti, quando necessario. In terzo luogo, esse sono difficili da interpretare da un controllore umano e, quindi, è estremamente difficile per un controllore del traffico aereo eseguire un "***sanity checks***" per vedere se la soluzione proposta ha un senso nell'ambiente locale del controllore.
Poiché non forniscono soluzioni adattative, decentrate e comprensibili, si può comprendere perché tali metodi non hanno guadagnato la fiducia di amministratori e controllori del traffico aereo. Al contrario, un approccio adattivo ad agenti è potenzialmente in grado di affrontare tutte e tre le questioni e fornire soluzioni adattive locali, sia indipendenti dal tipo di controllo utilizzato in altre parti dello spazio aereo, e facilmente analizzabili dal responsabile locale del traffico aereo.

## 2.3 Controllo del traffico Aereo basato sugli agenti

Negli ultimi anni si è fatto un largo utilizzo di agenti nella ricerca per cercare soluzioni per automatizzare gli attuali sistemi di traffico aereo. Queste soluzioni tipicamente coinvolgono un insieme di agenti autonomi che cercano di ottimizzare alcuni goal generali attraverso l'apprendimento o la negoziazione (si noti che questi "learning agents" non sono strettamente correlati agli "agenti" nei settori che tentano di modellare il comportamento umano). Le interazioni degli agenti, ispirate da principi economici, sono state utilizzate per ottenere equità nella gestione del traffico aereo attraverso un sistema artificiale monetario che permette ritorsione contro gli agenti avidi. Inoltre per i sistemi di traffico aereo sono stati usati anche learning agents. Anche se uno dei problemi chiave che deve essere affrontato con i learning agents è il modo di ricavare le funzioni ricompensa per ogni agente in modo che gli agenti non imparino ad ostacolarsi l'un l'altro. In altri contesti questo è stato affrontato mediante una ricompensa "soddisfacente" che incoraggi la cooperazione e penalizzi in particolare il comportamento anti-cooperativo, e le differenze di premi laddove le azioni degli agenti mirano a migliorare il

sistema a livello di performance.
Ad oggi, il più completo pianificatore di routing, controllo e collision avoidance basato sulle tecnologie ad agenti è AgentFly che ottiene un controllo del flusso del traffico aereo affidabile senza pianificazione centralizzata.
I metodi ad agenti possono coinvolgere anche leggi di controllo distribuite e scheduling distribuito, che cercano di ridurre in modo implicito il conflitto di traffico: per le distanze di atterraggio sicuro, gli agenti operanti sulle leggi di controllo distribuito riducono effettivamente il conflitto. Nel contesto del volo libero, gli agenti, utilizzando una combinazione di leggi e teoremi di dinamica degli aerei sono stati anche in grado di produrre soluzioni per ridurre il conflitto. Oltre un certo numero di metodi in cui il modello degli agenti delle leggi di controllo aereo è stato provato con successo.

Di seguito, verranno mostrati alcuni approcci multi-agenti al problema della gestione del controllo del traffico aereo. In particolare, un approccio sviluppato dall'università della California, Santa Cruz in collaborazione con la FAA e la NASA, che si serve di algoritmi di apprendimento basati sui premi, un approccio sviluppato dal Department of Computer and Digital Systems Engineering, Polytechnic School, University of São Paulo che sfrutta il modello BDI per modellare il comportamento di aerei ed aeroporti. In ultimo, viene illustrato un software ad agenti sviluppato dalla Czech Technical University di pianificazione, controllo e simulazione di volo libero(aerei la cui traiettoria di volo non è pianificata a priori).

# Capitolo 3

# Primo approcio

## 3.1 Gestione del flusso di traffico aereo

Con oltre 40.000 voli che operano all'interno dello spazio aereo degli Stati Uniti in un giorno medio, la gestione del flusso di traffico è un problema complesso ed esigente. Non solo ci sono preoccupazioni per l'efficienza del sistema, ma anche per la correttezza (ad esempio, le compagnie aeree diverse), adattabilità (per esempio, lo sviluppo di modelli climatici), affidabilità e sicurezza (ad esempio, di gestione aeroportuale). Per affrontare tali questioni, la gestione di questo flusso di traffico avviene su quattro livelli gerarchici:

1. Separazione affidabilità (2.30 min decisioni);
2. Flusso regionale (da 20min a 2 ore);
3. Flusso Nazionale (da1 a 8 ore), e
4. Configurazione dinamica dello spazio aereo (6 ore a 1 anno).

L'approccio si concentra sul flusso regionale e nazionale, nel quale gli agenti osservano un orizzonte temporale compreso tra 20 minuti e 8 ore. La soluzione quindi non è direttamente influenzata da tutte le problematiche legate alla gestione a lungo termine. L'approccio è stato sviluppato su Facet (Future ATM Concepts Evaluation Tool), un modello basato sulla fisica dello spazio aereo USA. Facet è uno strumento affidabile per la simulazione del traffico aereo ed è ampiamente usato dalla FAA, dalla NASA e dall'industria (più di 40 organizzazioni e 5.000 utenti).

## 3.2 Configurazione dello spazio aereo

Lo spazio aereo USA è costituito da 20 centri regionali (che gestiscono da 200 a 300 voli in un determinato giorno) e 830 settori (che gestiscono dai 10 ai 40 voli). Il problema di controllo del flusso deve affrontare l'integrazione delle politiche in questi settori e centri, per conto della complessità del sistema (per esempio, più di 5200 aeroporti di uso pubblico e 16.000 controllori del traffico aereo) e di gestione dei cambiamenti alle politiche causati dalle condizioni meteorologiche. Due dei problemi fondamentali per affrontare il problema di flusso sono: (i) la modellazione e la simulazione di un grande sistema complesso (fedeltà e affidabilità dei risultati), e (ii) la stabilizzazione del metodo con cui viene valutata la gestione del flusso, come la riduzione diretta del ritardo totale può portare ad ingiustizie verso particolari regioni o enti commerciali.

## 3.3 FACET

FACET (Future ATM Concepts Evaluation Tool), un modello basato sulla fisica dello spazio aereo degli Stati Uniti sviluppato per modellare con precisione il complesso problema del traffico del flusso aereo. Si basa sulla moltiplicazione delle traiettorie dei voli proposti in avanti nel tempo. FACET può essere utilizzato sia per simulare e visualizzare il traffico aereo (impiega 15 min a simulare uno scorcio di 24 h con 60.000 voli su un computer a 3GHz e 1GB RAM) o fornire statistiche rapide sui dati registrati (traiettorie 4D per 10.000 voli incluse statistiche di settori, aeroporti, e fix in 10 s sullo stesso computer).
FACET simula il traffico aereo sulla base di piani di volo e attraverso una interfaccia grafica utente consente di analizzare i pattern di congestione dei vari settori e centri (Fig. 3.1). FACET consente inoltre all'utente di modificare i modelli di flusso del velivolo attraverso una serie di meccanismi, tra cui misurazione aeromobile attraverso i fix. L'utente può quindi osservare gli effetti di questi cambiamenti sulla congestione. FACET è stato utilizzato per il calcolo delle rotte degli aerei dopo che l'agente applica una azione di controllo. Gli agenti quindi possono produrre i loro premi in base al feedback ricevuto da FACET circa l'impatto di questi controlli.

## 3.4 Evoluzione del sistema

La funzione di valutazione delle prestazioni del sistema, si concentra su ritardi e la congestione, ma non tiene conto dell'impatto di equità (correttezza) su

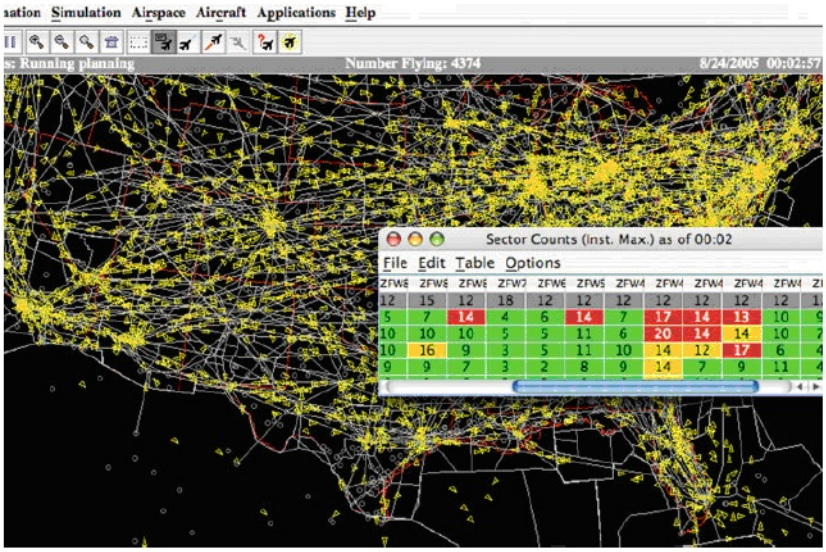



Figura 3.1: screenshot FACET che visualizza il traffico di rotte e le statistiche del flusso aereo

differenti entità commerciali. Invece si concentra sul livello di congestione in un settore particolare e sulla quantità di ritardo misurata del traffico aereo. La combinazione lineare di questi due termini dà la piena funzione di valutazione di sistema, $G(z)$ in funzione dello stato del sistema completo $z$. Più precisamente, si ha:

$$G(z) = -(B(z) + \alpha C(z)), \tag{1}$$

dove $B(z)$ è la penalità di ritardo totale per tutti gli aerei nel sistema, e $C(z)$ è la penalità totale di congestione. L'importanza relativa di queste due penalità è determinata dal valore di $\alpha$, un costo di congestione. Per esempio fissarlo a 5 significa che un settore oltre la capacità di un aeromobile per un lasso di tempo ha lo stesso costo di 5 min di ritardo. Con questa interpretazione la valutazione dell'intero sistema, $G(z)$, può essere visto come costo totale in termini di minuti di ritardo equivalenti. Il ritardo totale, $B$, è una somma di ritardi sull'insieme di aeromobili $A$ ed è data da:

$$B(z) = \sum_{a \in A} B_a(z) \tag{2}$$

dove $B_a(z)$ è il ritardo di ogni aereo causato dai controlli degli agenti. Per i controlli che ritardano l'aeromobile, il $B_a(z)$ è semplicemente la quantità di ritardo applicata a tale aeromobile. Per i controlli che comportano rerouting, il ritardo è la quantità di tempo supplementare che impiega un aereo per andare nel suo nuovo percorso, invece del suo percorso pianificato. La penalità di congestione totale è una somma delle penalità di congestione sopra i settori di osservazione, S:

$$C(z) = \sum_{s \in S} C_s(z)| \tag{3}$$

dove

$$C_s(z) = \sum_{t} \Theta(k_{s,t} - c_s)(k_{s,t} - c_s)^2, \tag{4}$$

dove $C_s$ è la capacità del settore s come definito dalla FAA e $\Theta(\cdot)$ è la funzione step che è uguale a 1 quando il suo argomento è maggiore o uguale a zero, e ha un valore pari a zero altrimenti.
Intuitivamente, $C_s$ penalizza uno stato del sistema in cui il numero di aerei in un settore supera la capacità ufficiale di settore FAA. Ogni capacità di settore è calcolato utilizzando parametri diversi, che includono il numero di controllori del traffico aereo disponibile. La penalità quadratica è destinata a fornire un feedback forte per restituire il numero di aeromobili in un settore al di sotto delle capacità FAA mandata.

## 3.5 Flusso del traffico aereo basato su agenti

Questo approccio multi agente alla gestione del flusso di traffico aereo si basa su agenti adattivi che intraprendono azioni indipendenti che massimizzano la funzione di valutazione del sistema di cui sopra. In questo modello, ogni agente sceglie per primo un'azione. I risultati di tutte le azioni degli agenti vengono poi simulati in FACET. Dalla simulazione vengono osservati tutti i valori di congestione e ritardi, viene calcolata una ricompensa di sistema e gli agenti calcolano le loro rispettive ricompense. Questi premi sono poi utilizzati per modificare le politiche di controllo degli agenti, che vengono poi utilizzati per scegliere l'azione successiva. Perché il sistema di gestione del traffico aereo basato sugli agenti abbia successo, occorrono quattro decisioni critiche: definire gli agenti, definire lo spazio di azione degli agen-

ti, selezionare gli algoritmi di apprendimento degli agenti, e selezionare la struttura di ricompensa degli agenti; di seguito verrà discusso ogni passo.

## 3.6 Definizione degli agenti

Forse la scelta più ovvia per un agente è l'aereo. Con questo approccio, le azioni dell'agente possono essere intuitive (per esempio, cambiare un piano di volo o incrementare o decrementare velocità e altitudine) e offre un alto livello di granularità, in quanto ciascun agente può avere la sua politica. Tuttavia, questo approccio ha due svantaggi principali.
Primo, in un dato giorno, ci sono più di 40.000 aerei nello spazio aereo USA, che porterebbero a un sistema multiagente massicciamente grande. Secondo, dal momento che gli agenti non sarebbero in grado di campionare il loro spazio di stato sufficiente, l'apprendimento risulterebbe lentissimo. Invece, si assegnano gli agenti ai **fix** - posizioni individuali a terra per tutto lo spazio aereo. Ogni agente è quindi responsabile di tutti gli aerei che passano attraverso il suo fix (vedi Figura 3.2). I fix offrono quattro vantaggi principali:

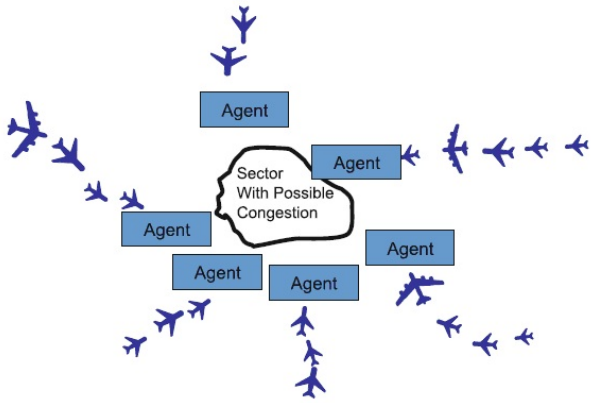



Figura 3.2: Schema di architettura agente. Gli agenti corrispondenti ai fix che circondano un eventuale congestione diventano "live" e iniziano ad impostare i nuovi tempi di separazione

Primo, il loro numero può variare a seconda delle necessità. Il sistema può avere tanti agenti quanti richiesti per una data situazione (per esempio, gli agenti vengono a concentrarsi intorno ad una zona in cui le condizioni meteorologiche sono in sviluppo).
Secondo, poiché i fix sono stazionari, gli agenti possono raccogliere dati e riscontrano prontamente il comportamento da premiare.
Terzo, poiché i piani di volo di un aereo sono composti da fix, gli agenti

possono influenzare i pattern di flusso di traffico.
Infine, i fix possono essere impiegati all'interno delle attuali procedure di routing di traffico aereo e possono servire come strumenti per aiutare i controllori del traffico aereo, piuttosto che competere con loro o sostituirli.

## 3.7 Definizione delle azioni degli agenti

Per controllare il flusso, un agente assegnato ad un fix può effettuare tre tipi di azioni.

Primo, può settare le **miles in trail (MIT)** - la distanza che il velivolo deve tenere da ogni altro mentre si avvicina al fix. Con un MIT più alto, meno aerei saranno in grado di passare attraverso quel fix durante i periodi di congestione poiché saranno rallentati per mantenere le loro distanze. Quindi, l'agente può settare un valore alto di MIT per ridurre la congestione del traffico a valle del suo fix.

Secondo, un agente può ordinare **ritardo a terra (ground delay)**, obbligando l'aereo diretto al suo fix di aspettare a terra. Di conseguenza, l'aereo arriverà più tardi al fix. Se alcuni agenti scelgono questa azione e altri no, la congestione decrementerà perchè verrà sparsa. Tuttavia, se tutti gli agenti scelgono lo stesso ritardo a terra, la congestione sarà semplicemente posticipata.

Terzo, un agente può **riindirizzare (rerouting)** gli aerei che attraversano il suo fix. Deviando alcuni aeromobili lontano da particolari regioni, questa azione può prevenire i casi specifici di congestione e quindi ridurre la congestione totale.

## 3.8 Selezione degli algoritmi di apprendimento degli agenti

In un approccio adattativo multi agente, ogni agente mira a conoscere le azioni che garantiscono il miglior rendimento del sistema G. Ogni agente avrà la propria funzione ricompensa e avranno lo scopo di massimizzare la ricompensa utilizzando un algoritmo di ***reinforcement learning*** (anche se sono efficaci anche alternative come l'evoluzione di neuro-controllori).

Ad ogni passo temporale, un agente compie un'azione e riceve una ricompensa valutando tale azione. L'agente userà poi tale ricompensa per aggiornare le sue politiche di azione in modo tale da cercare di intraprendere azioni che portino ad aumentare il premio. I semplici reinforcement learners sono equivalenti all'$\epsilon$-greedy learners con un tasso di sconto di zero. Dopo

aver eseguito un'azione e ricevuto una ricompensa R, un agente aggiorna il suo valore per l'azione a, $V(a)$ (che è la stima del valore per prendere tale azione) come segue:

$$V(a) \leftarrow (1-\lambda)V(a) + (\lambda)R, \tag{5}$$

dove $\lambda$ è il tasso di apprendimento. Per promuovere l'esplorazione di nuove azioni, ad ogni passo temporale l'agente sceglie l'azione con il più alto valore di tabella con probabilità $1-\epsilon$ e sceglieremo un'azione casuale con probabilità $\epsilon$.

## 3.9 Selezione della struttura ricompensa dell'agente

L'approccio più diretto è quello di lasciare che ogni agente riceva le prestazioni del sistema come sua ricompensa. Anche se questa forma di compenso ha avuto successo per i piccoli problemi di reinforcement learning multiagente, non scala bene perché le azioni di un agente hanno un impatto relativamente modesto sul sistema di ricompensa.

Per alleviare questo problema, è stata sviluppata una ricompensa aggiuntiva il cui scopo è quello di essere sensibile ad una azione di un agente e allineata con il sistema di ricompensa complessivo.

### 3.9.1 Differenza di ricompensa

Si consideri difference rewards della forma:

$$D_i \equiv G(z) - G(z - z_i + c_i), \tag{6}$$

dove $z_i$ è l'azione dell'agente i. Tutte le componenti di $z$ che sono affette dall'agente i vengono rimpiazzate con la costante fissa $c_i$. In molte situazioni è possibile utilizzare un $c_i$ che equivale a prendere l'agente i fuori dal sistema. Intuitivamente questo fa sì che il secondo termine della differenza di ricompense valuti le prestazioni del sistema senza i e quindi D valuta il contributo dell'agente per le prestazioni del sistema. Ci sono due vantaggi nell'uso di D: Primo, perché il secondo termine rimuove una parte significativa degli effetti di altri agenti del sistema, fornisce un agente con un segnale "più pulito" di G. Secondo, perché il secondo termine non dipende dalle azioni dell'agente i, ciascuna azione dell'agente i che incrementa D, incrementa anche G.

### 3.9.2 Stima del difference reward

Pur fornendo un buon compromesso, una questione che può affliggere D è il costo computazionale. Poiché si basa sul calcolo del termine controfattuale $G(z-z_i+c_i)$ (cioè le prestazioni del sistema senza agenti i) può essere difficile o impossibile da calcolare, in particolare quando la forma esatta matematica di G non è conosciuta. Concentriamoci sulla funzione G nella forma seguente:

$$G(z) = G_f(f(z)), \tag{7}$$

dove $G_f()$ è non lineare con una forma funzionale conosciuta e,

$$f(z) = \sum_i f_i(z_i), \tag{8}$$

dove ogni $f_i$ è una funzione non lineare sconosciuta. Partiamo dal presupposto che siamo in grado di campionare valori da $f(z)$, che ci permette di calcolare G, ma che non possiamo campionare da ciascun $f_i(z_i)$. Inoltre, si assume che $G_f$ è molto più facile da calcolare che $f(z)$, o anche che potremmo non essere in grado di calcolare direttamente $f(z)$ e dovremmo campionarlo da una "scatola nera" di calcolo. Questa forma di G corrisponde alla nostra valutazione del sistema nel dominio del traffico aereo. Quando si organizzano gli agenti in modo che ogni aeromobile è in genere influenzato solo da un singolo agente, ogni impatto dell'agente sul conto del numero di aeromobili in un settore, $k_{t,s}$, sarà per lo più indipendente degli altri agenti. Questi valori di $k_{t,s}$ sono le "$f(z)$" nella nostra formulazione e la forma "$G_f$" di funzioni di penalizzazione. Si noti che dato il conto degli aeromobili, le funzioni di penalità ($G_f$) possono essere facilmente calcolate in microsecondi, mentre la conta degli aeromobili (f) può essere calcolata eseguendo FACET. Per computare la nostra controfattuale $G(z - z_i + c_i)$, è necessario computare:

$$G_f(f(z - z_i + c_i)) = G_f\left(\sum_{j\neq i} f_j(z_j) + f_i(c_i)\right) \tag{9}$$

$$= G_f\left(f(z) - f_i(z_i) + f_i(c_i)\right). \tag{10}$$

I valori di $f_i(z_i)$ sono sconosciuti e non calcolabili direttamente. Tuttavia, se gli agenti intraprendono azioni in modo indipendente (senza osservare come

agiscono gli altri agenti prima di eseguire la propria azione), siamo in grado di sfruttare la forma lineare di $f(z)$ in $f_i$ con la seguente uguaglianza:

$$E(f_{-i}(z_{-i})|z_i) = E(f_{-i}(z_{-i})|c_i) \tag{11}$$

dove $E(f_{-i}(z_{-i})|z_i)$ è il valore atteso di tutti gli $f$ diversi da $f_i$ dato il valore di $z_i$ e $E(f_{-i}(z_{-i})|c_i)$ è il valore atteso di tutti gli f diversi da $f_i$ dato il valore di $z_i$ cambiato a $c_i$. Viene poi stimato $f(z-z_i+c_i)$. Quindi è possibile valutare $Di = G(z) - G(z - z_i + c_i)$ come:

$$D_i^{\text{expected}} = G_f(f(z)) - G_f(f(z) - E(f(z)|z_i) + E(f(z)|c_i)), \tag{12}$$

Per migliorare le stime, si può impostare $c_i = E(z)$ e facendo l'approssimazione media quadratica di $f(E(z)) \approx E(f(z))$ allora si può stimare $G(z) - G(z - z_i + c_i)$ come:

$$D_i^{\text{est}} = G_f(f(z)) - G_f(f(z) - E(f(z)|z_i) + E(f(z))). \tag{13}$$

Questa formulazione ha il vantaggio di avere a disposizione più campioni per stimare $E(f(z))$ che per stimare $E(f(z)|c_i)$.

### 3.9.3 Difference rewards precalcolato

Oltre alle stime per i premi differenza, è possibile pre-calcolare alcuni valori che possono essere poi utilizzati dagli agenti. In particolare, $-E(f(z)|z_i) + E(f(z)|c_i)$ può essere calcolato esattamente se la funzione $f$ può essere interrogata per certi valori di $z$:

$$\begin{aligned} &- E(f(z)|z_i) + E(f(z)|c_i) \\ &= -f(k_{-i} + z_i + f(k_{-i} + c_i) \end{aligned}$$

dove $k_{-i}$ è un insieme costante di azioni per tutti gli agenti diversi da i e $f_{-i}$ è uguale a $\Sigma_{j \neq i} f_j(z_j)$. Poi dal precalcolo di $f(k_{-i} + z_i)$ per ogni azione per ogni agente, il valore di D può essere calcolato esattamente. Con n agenti e m possibili azioni questo richiede $N_{pre} = 1 + m\mathbf{x}n$ computazioni di f.

# Capitolo 4

# Un ulteriore approccio ad agenti al controllo del traffico aereo

## 4.1 Considerazioni per approccio ad agenti

Il Sistema di Gestione del traffico aereo è altamente distribuito. Ogni velivolo moderno è di per se un sistema di sistemi semi-indipendenti che interagiscono l'un l'altro, e la stessa cosa può essere detta per ciascun aeroporto e linea aerea. Tuttavia, è necessario un più alto livello di astrazione per comprendere e simulare le interazioni di gestione del traffico aereo. Le decisioni di gestione del traffico aereo generalmente non richiedono informazioni riguardo le interazioni tra sottosistemi interni ad un aereo, oppure quali sono i fattori che influenzano una decisione della compagnia aerea che richiede nuovi voli o li cancella. Assumendo che ciascuna linea aerea ha beliefs, desires e intents relative all'ambiente del traffico aereo, ed una strategia opportuna per raggiungere i propri goal, risulta una buona soluzione trattarli come Agenti nell'ambiente di gestione del traffico aereo. Un ragionamento simile può essere applicato ad un aeromobile il quale, nonostante sia attivato e regolato da una strategia della linea aerea, ha un alto grado di autonomia quando ci sono da prendere decisioni riguardo la sicurezza del volo. In aggiunta, ciascun aeroporto è visto come un entità autonoma la quale deve controllare l'uso sicuro delle sue risorse, come piste, zone di rullaggio e cancelli d'imbarco. A causa di questi motivi, in questo approccio, è stato deciso di modellare tre distinte classi di agenti: linea aerea, velivolo e aeroporto. Il passeggero viene visto come un elemento passivo poiché è considerato che le decisioni in tempo reale di un volo non sono fatte dai passeggeri.

Per la definizione dei requisiti delle applicazioni, gli agenti vengono visti come gli attori dell'applicazione nel senso dell'ingegneria del software tradizionale. Per poter comprendere le operazioni eseguite dagli agenti, si osservi la Figure 4.1. In questa figura, abbiamo gli agenti ATM principali, Airline, Aircraft

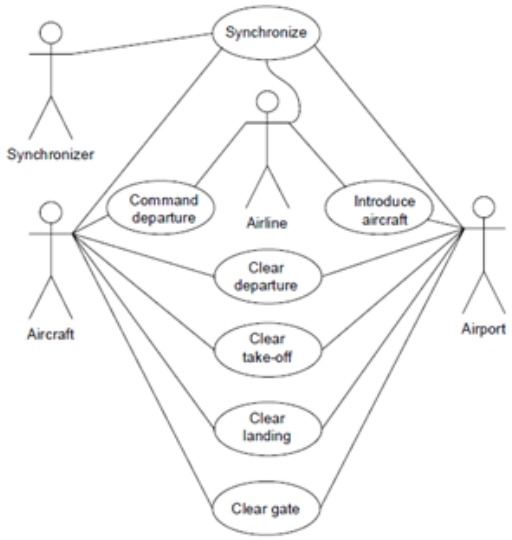



Figura 4.1: Use-case Diagram

e Airport, e un agente che esiste solo per scopi di simulazione, chiamato Synchronizer. Questo agente abilita gli altri a mostrare un comportamento temporale realistico nella simulazione. I casi d'uso in figura sono spiegati di seguito:

***Synchronize:*** consiste in un agente di sincronizzazione che manda periodicamente un messaggio di aggiornamento di tempo ad ogni agente, e aspetta che ciascuno di essi esegua il proprio task di tempo critico, prima di inviare un messaggio di aggiornamento di tempo.

***Introduce Aircraft:*** l'agente Airline chiede il permesso di attivare un velivolo all'interno di un aeroporto. Nell'ambiente simulato, la conseguenza è che viene creato un nuovo agente Aircraft.

***Command departure:*** la Airline comanda (ordina) ad un velivolo subordinato di iniziare il suo processo di partenza dall'Airport corrente.

***Clear departure:*** un Aircraft richiede un'autorizzazione di decollo al suo Airport corrente. L'Airport può concedere immediatamente l'autorizzazione o ritardarla, in base alle condizioni di traffico, e c'è una coda FIFO per questo. La partenza è uno step precedente al decollo.

***Clear take-off:*** un Aircraft richiede un'autorizzazione a partire al suo Airport corrente. L'Airport può concedere immediatamente l'autorizzazione o

ritardarla, in base alle condizioni di traffico, e c'è una coda FIFO per questo.
***Clear landing:*** un Aircraft richiede un'autorizzazione di atterraggio quando è vicino all'aeroporto di destinazione. L'Airport può concedere immediatamente l'autorizzazione o ritardarla, in base alle condizioni di traffico, e c'è una coda per questo.
***Clear gate:*** un Aircraft richiede un'autorizzazione per fermarsi in un gate passeggeri, solo dopo l'atterraggio. L'Airport può concedere immediatamente l'autorizzazione o ritardarla, in base alle condizioni di occupamento. C'è una coda FIFO per questo.

## 4.2 Infrastruttura del software

Viene utilizzata un'infrastruttura software distribuita e multi-livello, come mostra la figura 4.2. Ci sono 3 livelli principali: **SisBDPar**, un sistema di database parallelo distribuito; **JADE** (Java Agent DEvelopment framework), che fornisce un infrastruttura ad agenti; e la **Graphical ATM User Interface**, la quale può essere accesa o spenta, in base agli scopi della simulazione. All'interno di JADE, vengono sviluppati due distinti gruppi di agenti: ***Agenti ATM***, che è l'implementazione del modello astratto di agente descritto in precedenza, e ***DASE*** (Distributed data Agent Service Environment).
Di seguito verranno spiegati con maggior dettaglio gli elementi d'infrastruttura.

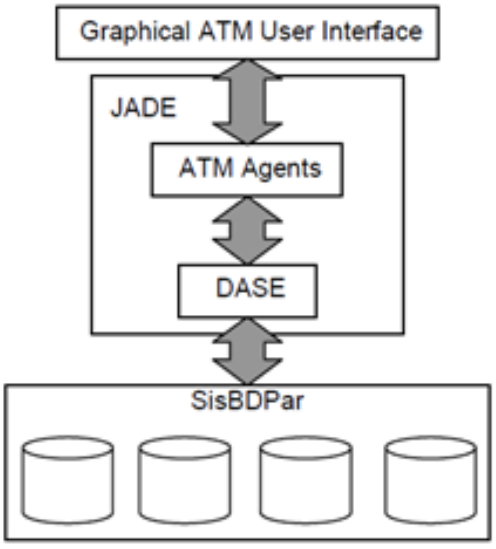



Figura 4.2: Struttura del software di simulazione

### 4.2.1 SisBDPar

SisBDPar è un sistema di gestione di database parallelo e distribuito, che conserva le tabelle distribuite tra diversi file attraverso la rete, e distribuisce le query e sub-query di processamento, incrementando le performance del database. Le query possono essere separate e distribuite su diverse CPU. Di conseguenza, si ottiene una considerevole scalabilità poiché la capacità di salvataggio può incrementare arbitrariamente. L'architettura SisBDPar è basata sul paradigma client server. La distribuzione di responsabilità tra client e server è definita in un modo fortemente accoppiato. Il client ha accesso al database attraverso un application programming interface (API), le cui funzioni possono essere usate dal client per eseguire query, come se fosse un linguaggio SQL.
Durante il processamento di query, eseguito nel client, l'informazione salvata nel catalogo è verificata, così è possibile decidere quale server locale verrà usato. I server locali sono considerati server dati, e sono responsabili nella gestione di processamento di query parallele. I client possono accedere alle informazioni salvate da ciascun nodo, e i server dati locali iniziano in ciascun nodo del SisBDPar.

### 4.2.2 JADE

JADE è una piattaforma di esecuzione agente, totalmente sviluppata in Java e compatibile con le specifiche FIPA2000 (Foundation for Intelligent Physical Agents). Fornisce il controllo del ciclo di vita dell'agente, l'infrastruttura di comunicazione e i servizi ad agente di identificazione pubblicazione e ricerca. Per quest'ultimo compito, ci sono gli **Agent Management System** - servizio AMS - e un **Directory Facilitator** - DF -, il quale rappresenta rispettivamente le pagine bianche e gialle dei servizi, in accordo con lo standard FIPA. Oltre ad essere un ambiente di esecuzione, ha anche strumenti di controllo, test e monitoraggio agenti.

### 4.2.3 DASE

Il Distributed data Agent Service Environment - DASE, è sviluppato in Java è fornisce un grappolo di servizi dati i quali si integrano armonicamente con la piattaforma multi-agente JADE. Così come, DASE è parte di un ambiente multi-agente, ed è composto da agenti. I suoi servizi sono legati all'accesso ben definito e trasparente ai dati distribuiti, con efficienza e indipendenza dall'implementazione della piattaforma multi agente. I due obiettivi principali di DASE sono:

1. Fornire agli agenti un semplice accesso ai dati distribuiti;

2. Offrire risorse aggiuntive correlate all'accesso dati, come la garanzia di consistenza dei dati attraverso il controllo di concorrenza distribuito.

Il codice degli agenti DASE è scritto in Java, per essere pienamente integrato nella piattaforma JADE. Le connessioni tra gli agenti DASE e qualsiasi sistema di gestione database, sono gestite dai driver JDBC, più un driver specifico JDBC sviluppato appositamente per l'accesso ai dati in SisBDPar. Alcune altre caratteristiche interessanti DASE sono il bilanciamento di carico query e il supporto a sistemi database simultaneo distinti.
Tutta la funzionalità DASE è eseguita dagli agenti, i quali permettono un processamento altamente distribuito. La maggior parte dei compiti degli agenti DASE vengono attivate dagli agenti client, al di fuori di DASE, e, rappresentati dagli agenti ATM. Ci sono tre gruppi principali di agenti funzionali: Kernel, Data Access and Concurrency Control.
***DASE Kernel Agents***: Gli agenti Kernel sono responsabili dell'avvio, lo spegnimento, il controllo e il monitoraggio del sistema DASE.
***DASE Data Access Agents***: Questo gruppo ha gli agenti che trattano con i clienti per le operazioni più frequenti di accesso ai dati (dati ambiente, database).
***DASE Concurrency Control Agents***: Gli agenti in questo gruppo garantiscono la coerenza dei dati in condizioni di concorrenza.

# Capitolo 5

# Terzo approccio: AgentFly

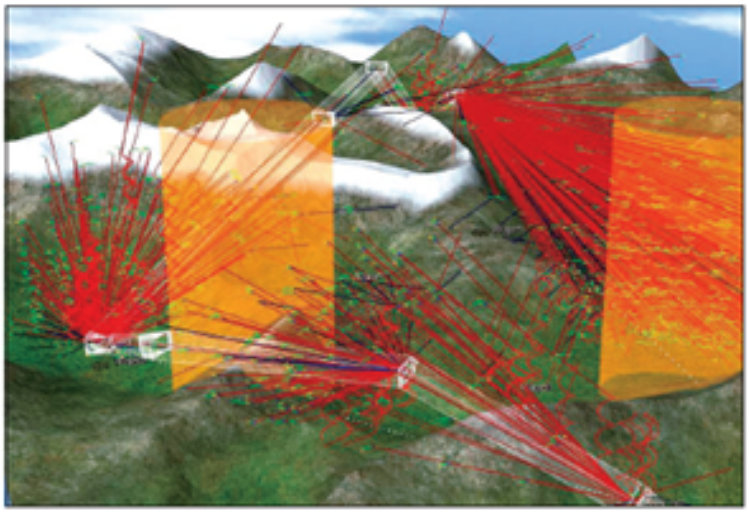
## 5.1 AgentFly, software per simulazione, pianificazione e Collision Avoidance

In cooperazione con l'US Air Force, i ricercatori all'Agent Technology Center all'Università tecnica Cieca hanno sviluppato AgentFly - una tecnologia scalabile basata sugli agenti per la simulazione del volo libero, pianificazione e CA. In AgentFly, ogni attività di volo rappresenta uno specifico contenitore software che ospita agenti software intelligenti multipli. Ciascun agente, o modella una funzionalità hardware specifica come la capacità sensoriale, controllo di volo dinamico, o comunicazione, o incapsula un'intelligenza in grado di prendere decisioni che supporti pianificazione o CA. AgentFly ha un'architettura che supporta tre principali casi d'uso:

- modellazione multi agente e simulazione di volo libero
- piattaforme di controllo di volo libero senza equipaggio aereo, e
- Approcci alternativi alla pianificazione, che supporti il traffico aereo civile

È possibile utilizzare operazioni di simulazione multi-agente di volo libero per analizzare empiricamente varie pianificazioni di algoritmi CA prima di svilupparli fisicamente. Se la simulazione e abbastanza realistica (AgentFly può fornire tutti gli strumenti e tecnologie necessarie), un'analisi empirica dei risultati potrebbe fornire preziose informazioni sulle proprietà del volo libero in varie circostanze (come monitoraggio di sorveglianza, peggioramento delle condizioni meteo, traffico civile denso, o situazioni di emergenza).
AgentFly è progettato in maniera tale che non siano necessarie componenti centralizzate; tutti i piani e CA sono basati sulle capacità sensoriali di azioni

di volo e capacità decisionali distribuite (p2p). È possibile impiegare agenti di pianificazione e CA direttamente sulle piattaforme hardware e quindi supportare esercizi reali di volo libero senza equipaggio. Il sistema AgentFly è basato sulla tecnologia multi-agente **Aglobe**, la quale fornisce una migrazione senza soluzione di continuità dalla simulazione computazionale all'impiego di hardware. La direzione più promettente per l'applicazione di AgentFly è l'area di pianificazione del traffico aereo. La Federal Aviation Authority (FAA) ha mostrato interesse per AgentFly per poter valutare gli effetti di un elevato sovraccarico del traffico aereo civile nello spazio aereo dell'intera nazione. L'idea è quella di rilassare il problema di pianificazione ed eseguire le simulazioni di volo multi agente. Invece di pianificare un'operazione anticollisione per numerosi aerei, viene costruito un piano di volo per ogni velivolo senza considerare possibili collisioni. Successivamente, viene simulata tale operazione nell'ambiente AgentFly, che identifica possibili collisioni, e le risolve o attraverso ripianificazione individuale o negoziazione peer-to-peer.



## 5.2 Pianificazione

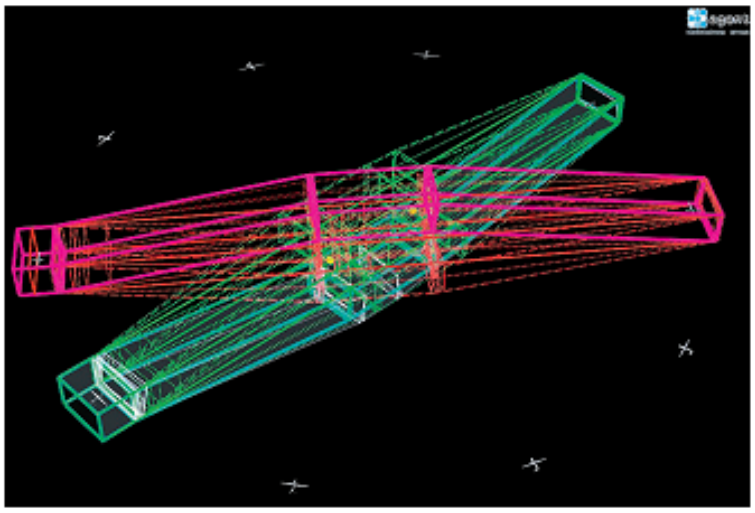
Ciascun agente ospita il proprio pianificatore di percorso che fornisce una traiettoria del piano di volo regolare, che rispetta tutti i vincoli e goal (la sua missione) del modello dell'aereo. Ciascun pianificatore trasforma questi goal e chiede per le manovre CA in una sequenza di waypoints, ciascuna con restrizioni di tempo e velocità di crociera specificati. Il pianificatore prepara

descrizioni dettagliate del singolo corridoio di volo - una definizione geografica e di variazioni di velocità di crociera nel tempo. La traiettoria di volo data può essere eseguita imprecisamente dall'integrazione dello standard Required Navigation Performance (RNP) in un processo di pianificazione, specificando in tal modo deviazioni ammissibili delle posizioni orizzontale e verticale dell'aereo all'interno del proprio corridoio. Quando un livello RNP non è più raggiungibile, il pianificatore cerca un altro piano.
Internamente, il processo di pianificazione del percorso esegue due fasi accoppiate: pianificazione spaziale e temporale. Durante la prima fase, il pianificatore prepara la parte spaziale del piano di volo, rispettando le restrizioni di traiettoria specificate per mezzo dell'algoritmo Accelerated A* (AA*). Questo algoritmo è opportuno per la rapida pianificazione in grandi ambienti con numerose restrizioni operazionali (come le zone dinamiche non volanti, livelli minimi di volo). Definito lo spazio aereo, viene conservato in una struttura ad albero, nel quale ciascun nodo interno è un operatore di composizione o trasformazione e ogni foglia mantiene una definizione di zona con una descrizione geometrica, una mappa di altitudine, e una rappresentazione ad albero. Usando tali composizioni di albero, può essere modellato un complesso spazio aereo.
Nella seconda fase, il pianificatore pianifica i cambiamenti di velocità di crociera, mappandoli sulle parti di traiettorie spaziali preparate. Il goal qui è adattare tutte le restrizioni di tempo e velocità di crociera date. Le fasi spaziale e temporale sono connesse in un loop così che il sistema possa manipolare casi estremi - per esempio, se un aereo deve volare molto più lentamente della sua velocità di crociera minima, il suo piano spaziale deve essere allungato.

## 5.3 Collision Avoidance

AgentFly ha il suo punto di forza, sia per il contributo di ricerca che per lo sfruttamento commerciale, nella sua capacità di evitare collisioni autonomamente. AgentFly dispone di quattro classi di meccanismi di CA.
Primo, l'algoritmo di **Rule-Based CA (RBCA)** è un algoritmo dominio-dipendente basato sul FAA's Visual Flight Rules (VFRs). Avendo individuato un pericolo di collisione, l'agente determina il tipo di collisione sulla base dell'angolo tra i vettori direzione degli aerei coinvolti. Ogni tipo di collisione è una manovra fissa predefinita, che l'agente applica per la ripianificazione.
Ogni attività esegue in maniera indipendente le modifiche VFR-based per i piani di volo, basandosi sulla rilevazione delle attività di contropartita e evitando la collisione stessa dal suo punto di vista, utilizzando lo stesso al-

goritmo. Questa RBCA è implementata in AgentFly come meccanismo di riferimento per verificare l'efficienza dei seguenti tre algoritmi di CA.



L'algoritmo **Iterative Peer-to-Peer Collision Avoidance (IPPCA)** impiega negoziazioni multiagente volte a trovare la manovra CA pareto-ottimale. Gli agenti software ospitati da ciascuna attività generano un insieme di manovre vitali CA (mediante il meccanismo di programmazione descritti in precedenza) e calcolano i costi associati a ogni manovra (sulla base, ad esempio, della lunghezza totale del piano di volo, deviazioni per la missione waypoint, le variazioni di altitudine, curvatura, la priorità di volo, stato di carburante, eventuali danni, e il tipo di carico). La Figura sopra mostra un esempio di un paio di negoziazioni che ricercano una combinazione di manovre che minimizzerà i loro costi associate evitando collisioni.
L'algoritmo **Multi-Party Collision Avoidance (MPCA)** estende i primi due algoritmi permettendo diverse attività per negoziare le loro manovre collettive CA. L'ordine in cui le minacce di collisione si verificano e vengono risolti incide fortemente sulla qualità del progetto complessivo fornito da IPPCA. L'algoritmo MPCA è progettato per minimizzare la capacità manovre CA che causano conflitti tra le traiettorie future. Questa strategia richiede sostanzialmente maggiori risorse computazionali e di comunicazione per la soluzione di un unico incontro, ma offre traiettorie di volo libero più efficienti senza collisioni nel lungo periodo.
L'algoritmo **Noncooperative Collision Avoidance (NCCA)** supporta CA quando la comunicazione tra attività è impossibile. Questa situazione può verificarsi, ad esempio, quando i dispositivi di comunicazione a bordo sono temporaneamente non disponibili o quando l'attività evita un oggetto

volante ostile.
Anche se AgentFly può confrontare l'efficacia di diversi metodi di CA in diversi scenari, gli ambienti dinamici di volo libero sono raramente adatti per l'utilizzo di un unico algoritmo di CA in ogni momento. Così, AgentFly dispone di un'efficiente architettura multistrato di CA che fornisce sofisticati meccanismi per la scelta flessibile di un algoritmo appropriato CA in varie situazioni.
Questa architettura dispone di un processo di metaragionamento che analizza il tempo alla collisione e i requisiti di tempo stimato per ogni metodo di CA per quanto riguarda l'efficienza del processo necessario. Il modulo multistrato lavora in maniera completamente decentrata e non usa alcun pianificatore centrale. La sua architettura è indipendente dal dominio e quindi pronto per la distribuzione in veicoli autonomi, come gli aerei, ma anche robot, auto, e sottomarini.

# Capitolo 6

# Conclusioni

Nel corso di questo elaborato sono stati illustrati diversi approcci al problema dell'incremento del traffico aereo, e dei più comuni problemi legati alla gestione del traffico aereo (congestione, ritardi, collision avoidance, free flight). La gestione efficiente, sicura ed affidabile del flusso del traffico aereo è un problema complesso, che richiede soluzioni che integrano le politiche di controllo con orizzonti temporali che vanno da pochi minuti fino ad un anno.
Il primo approccio analizza un algoritmo adattativo multi agente a premi, nel quale le azioni degli agenti comportano un cambiamento delle condizioni di congestione e di ritardo. Viene calcolata una ricompensa di sistema da cui gli agenti ottengono le rispettive ricompense, che gli agenti utilizzeranno per modificare le proprie politiche e rispettive azioni future.
I risultati delle simulazioni si sono dimostrati essere significativi per quanto riguarda gli approcci basati su agenti. In particolare, l'utilizzo della differenza di ricompensa produce buoni risultati, ma la differenza di ricompensa stimata ottiene risultati migliori rispetto all'uso diretto della ricompensa di sistema. Inoltre, tutti gli agenti basati sull'apprendimento superano i risultati ottenuti dall'approccio Monte Carlo. L'assegnazione di un agente per ogni fix e le relative funzioni di ricompensa locale, sicuramente sono i primi passi per colmare il divario tecnologico tra l'attuale processo di gestione del traffico aereo e il processo necessario per gestire il traffico aereo futuro.
Il secondo approccio sfrutta i concetti del modello BDI incentrando l'attenzione sul concetto che Linee aeree, Aerei e Aeroporti hanno ciascuno compiti da assolvere, e sono quindi da considerare gli attori che operano nell'ambiente.
L'obiettivo principale ATM per questo software era quello di ottimizzare il processo decisionale per le distanze di atterraggio, con l'obiettivo di ridurre al minimo i ritardi dei voli. Il software multi-agente finora sviluppato è in fase di test, e tuttavia permette un gran numero di combinazioni di atti-

vazione. Negli sviluppi futuri sono previsti scenari in cui ciascun agente sarà fisicamente distribuito, e il numero di velivoli utilizzati nella simulazione sarà sull'ordine di grandezza realistica.
Il terzo approccio, è in realtà un software i cui algoritmi interni hanno il compito di eseguire delle pianificazioni, una volta che hanno i piani di volo di ogni singolo aereo.
La verifica sperimentale dell'efficienza dei negoziati per attività autonome altamente distribuite, ha mostrato una chiara convergenza di tutti gli algoritmi proposti. Questo approccio è intrinsecamente meno vincolato, e può consentire il verificarsi di imprevisti comportamenti emergenti, concentrando l'attenzione sulla prova empirica. Tuttavia, dimostra e documenta ampiamente di essere robusto ed efficiente, e sicuramente degno di continuo sviluppo.
L'utilizzo di sistemi multi agenti rappresenta sicuramente una buona base per lo sviluppo di algoritmi di facile implementazione e il cui utilizzo si affianchi alle attuali procedure, senza la necessità di modifiche radicali.

# Bibliografia


1. A MultiAgent approach to managing Air Traffic Flow. Adrian K. Agogino - Kagan Tumer

2. Evaluating Evolution and Monte Carlo for Controlling Air Traffic Flow - Adrian Agogino UCSC, NASA Ames Research Center

3. Multi-Agent Tools for Air Traffic Management - The 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering

4. Agent-Based Approach to Free-Flight Planning, Control, and Simulation - Michal Pechoucek and David Sislak, Czech Technical University

5. AGENTFLY: Towards Multi-Agent Technology in Free Flight Air Traffic Control - David Šišlák, Michal Pěchouček, Přemysl Volf, Dušan Pavlícek, Jiří Samek, Vladimír Mařík e Paul Losiewicz

6. http://www.springerlink.com

7. JADE: a FIPA2000 compliant agent development environment - F.Bellifemine, A.Poggi, G.Rimassa