

Università degli studi di Padova

Facoltà di Scienze Statistiche
Corso di laurea in Scienze Statistiche e
Tecnologie Informatiche

TESI DI LAUREA TRIENNALE:

**GUIDA AUTOMATICA DI AEROMOBILI
A TERRA: ALCUNE CONSIDERAZIONI**

AUTOMATIC GUIDANCE OF AIRCRAFT ON AIRPORT
GROUNDSIDE: SOME CONSIDERATIONS

RELATORE:

Prof. Giovanni Andreatta

CORRELATORE:

Dott. Luigi De Giovanni

LAUREANDO:

Giorgio Salmaso

ANNO ACCADEMICO 2007 - 2008

*A mia madre:
mia guida e mio traguardo*

INDICE:

Introduzione.....pag. 7

Parte prima.....pag. 9

1. Che cos'è l'apron?.....pag. 10

2. Che attività vengono svolte nell'apron?.....pag. 12

3. Quali mezzi si muovono nell'apron?.....pag. 18

4. Chi comanda nelle apron?.....	pag. 28
Parte seconda.....	pag. 35
1. Vehicle Routing Problem.....	pag. 35
2. Instradamento dinamico di veicoli a guida automatica in tempo reale.....	pag. 38
3. Un caso particolare.....	pag. 45
4. Un esempio.....	pag. 55
Conclusione.....	pag. 60
Bibliografia.....	pag. 61
Riferimenti Web.....	pag. 61
Ringraziamenti.....	pag. 62

INTRODUZIONE

L'incremento esponenziale del traffico aereo degli ultimi decenni (e la costante crescita prevista per il futuro) e il conseguente aumento del traffico "di terra" nelle airside aeroportuali hanno persuaso i responsabili di tali strutture e delle compagnie aeree a porre sempre maggiore

attenzione, in termini di sicurezza e di prevenzione di incidenti, sullo spostamento di aeromobili e mezzi di rampa lungo le apron aeroportuali.

Da questa esigenza nasce questo lavoro, diviso in due parti: la prima, articolata in quattro paragrafi, darà una presentazione delle apron, più nello specifico il primo paragrafo spiegherà cos'è un apron, dove è localizzato e come è generalmente composto; il secondo paragrafo descriverà le handling, cioè tutte le attività di assistenza a terra, fornite ad aeromobili, passeggeri e merci; il terzo paragrafo proporrà una carrellata di tutti i principali mezzi che si muovono nell'apron con una breve descrizione per ognuno di essi; infine, il quarto paragrafo mostrerà alcune figure di riferimento per lo svolgimento dei principali servizi resi nelle apron.

La seconda parte di questo lavoro tratterà del problema relativo all'instradamento di aeromobili con trattori a guida automatica. Anche questa parte è divisa in quattro paragrafi: il primo introduce al problema generale descrivendo la categoria di quelli di cui esso stesso fa parte, il Vehicle Routing Problem; il secondo paragrafo riporterà una sintesi di un lavoro svolto nell'Ottobre del 2007 da quattro ricercatori dell'Università di Matematica di Berlino sul problema dell'istradamento di veicoli a guida automatica; il terzo paragrafo illustrerà un caso semplificato (puramente accademico) del problema in questione e presenterà un algoritmo efficace per la risoluzione del problema affrontato; il quarto paragrafo, infine, mostrerà un esempio dell'algoritmo presentato al paragrafo precedente.

PARTE PRIMA

Un **aeroporto** è una infrastruttura attrezzata per il decollo e l'atterraggio di aeromobili, per il transito dei relativi passeggeri e del loro bagaglio, per l'hangaraggio ed il rifornimento dei velivoli.¹

¹ *Definizione tratta da Wikipedia*

In un aeroporto si è soliti distinguere le operazioni e le strutture in due parti: lato aria (**airside**) e lato terra (**landside**).

Il lato aria comprende le attrezzature ed i servizi impiegati per la movimentazione degli aeromobili, le piste di atterraggio (runway), le bretelle di raccordo (taxiway), i parcheggi aerei, le piazzole di sosta (apron) e il sistema di controllo del traffico aereo. La parte di airside relativa al movimento a terra degli aeromobili è spesso definita **groundside**.

Il lato terra comprende, invece, tutte le attrezzature, le strutture e i servizi associati ai passeggeri (in partenza, in arrivo o in transito), il sistema di accesso all'aeroporto, il marciapiede del terminal (o l'interfaccia tra il sistema di accesso stradale ed il terminal) ed il parcheggio automobili.

Le uscite (gate) rappresentano il confine tra le due aree.

1. Che cos'è l'apron?

L'**apron** (o **piazzale aeromobili**) è un'area dell'aeroporto che svolge due funzioni principali: da un lato è una zona per il parcheggio degli aeromobili e dall'altro è un area per la fornitura di servizi (pulizia, rifornimento, carico e scarico di merci, bagagli e passeggeri, ecc) e per piccoli lavori di manutenzione agli aeromobili stessi.

Le dimensioni delle apron dipendono principalmente dal numero di parcheggi necessari, dalle loro dimensioni e dalla configurazione di parcheggi ritenuta migliore, dal numero e dalla composizione della flotta di aeromobili presente e prevista per il futuro, dallo spazio necessario ai vari mezzi prestatori di servizi per fare manovra senza invadere le piste di rullaggio, dal numero e dal tipo di servizi previsti per i vari aeromobili.

Solitamente l'apron è situata di fronte al terminal e nei pressi delle piste di decollo e atterraggio, anche se non sono rari i casi (dovuti a svariati motivi, quali ad esempio la ricerca di un ambiente più confortevole al terminal dei passeggeri o l'esigenza di maggior spazio per il movimento degli aeromobili di dimensioni maggiori) in cui l'apron viene costruita in zone più distanti e sono necessari mezzi ausiliari per il trasporto dei passeggeri o degli aeromobili.

Il piazzale può essere diviso nelle seguenti aree di movimento di aeromobili:

- **parcheggio aeromobili;**
- **piste di atterraggio:** che sono solamente una parte dell'intero sistema di piste dell'aeroporto;
- **piste di rullaggio verso i parcheggi degli aeromobili:** parte dell'apron designata al rullaggio alla quale possono accedere solo gli aeromobili;
- **strade di servizio:** percorsi per il movimento dei vari veicoli in servizio nell'apron;

2. Che attività vengono svolte nell'apron?

Nel piazzale aeromobili sono svolti i servizi che rientrano tra le cosiddette **“attività di assistenza a terra”** o **“handling”**², che

² Come precisa DOMINICI in *La gestione aeroportuale nel sistema del trasporto aereo*, Milano, 1982, 88, nota 22: “...il termine, che deriva dall'inglese *to handle*, significa maneggiare, manovrare, manipolare, nel campo aeronautico, però, ha assunto il significato di *gruppo di attività prestate nell'ambito aeroportuale all'aeromobile, ai passeggeri ed alle merci*. La terminologia internazionale dell'ICAO traduce il termine *handling* con il corrispettivo francese *acheminement* o

comprendono il complesso di prestazioni e servizi forniti all'aeromobile, ai passeggeri ed alle merci; tali servizi possono essere suddivisi in undici gruppi:

1. assistenza amministrativa a terra e supervisione,
2. passeggeri,
3. bagagli,
4. merci e posta,
5. operazioni in pista,
6. pulizia e servizi di scalo,
7. carburante e olio,
8. manutenzione dell'aereo,
9. operazioni aeree e gestione degli equipaggi,
10. trasporto a terra,
11. ristorazione "catering".

Ognuna di queste categorie racchiude una pluralità di attività:

1. L'assistenza amministrativa a terra e supervisione comprende:
 - i servizi di rappresentanza e di collegamento con le autorità locali o con altri soggetti, le spese effettuate per conto dell'utente e la fornitura di locali ai suoi rappresentanti;
 - il controllo del caricamento, dei messaggi e delle telecomunicazioni;
 - il trattamento, il magazzinaggio, la manutenzione e l'amministrazione delle unità di carico;
 - gli altri servizi di supervisione prima, durante e dopo il volo, nonché gli altri servizi amministrativi richiesti dall'utente.

2. L'assistenza passeggeri comprende qualsiasi forma di assistenza ai passeggeri in partenza, in arrivo, in transito o in coincidenza; in particolare il controllo dei biglietti, dei documenti di viaggio, la registrazione dei bagagli e il trasporto di questi ultimi fino ai sistemi di smistamento.
3. L'assistenza bagagli comprende il trattamento dei bagagli nel locale di smistamento, lo smistamento degli stessi, la loro preparazione in vista della partenza, il loro caricamento e scaricamento rispettivamente su e dai sistemi trasportatori da e per l'aereo, nonché il trasporto dei bagagli dal locale di smistamento alla sala di distribuzione.
4. L'assistenza merci e posta comprende:
 - per le merci esportate, importate o in transito, la movimentazione fisica delle merci, il trattamento dei relativi documenti, le formalità doganali e tutte le misure conservative convenute tra le parti o richieste dalle circostanze;
 - per la posta, in arrivo e in partenza, il trattamento fisico della corrispondenza, il trattamento dei relativi documenti e tutte le misure conservative convenute tra le parti o richieste dalle circostanze.
5. L'assistenza in pista comprende:
 - la guida dell'aereo all'arrivo e alla partenza;
 - l'assistenza al parcheggio dell'aereo e la fornitura dei mezzi appropriati;

- l'organizzazione delle comunicazioni tra l'aeromobile e il prestatore dei servizi lato pista;
 - il caricamento e lo scaricamento dell'aereo, compresa la fornitura e la messa in opera dei mezzi necessari, nonché il trasporto dell'equipaggio e dei passeggeri tra l'aereo e l'aerostazione e il trasporto dei bagagli tra l'aeromobile e l'aerostazione;
 - l'assistenza all'avviamento dell'aereo e la fornitura dei mezzi appropriati;
 - lo spostamento dell'aereo alla partenza e all'arrivo, la fornitura e la messa in opera dei mezzi necessari;
 - il trasporto, il caricamento sull'aereo dei cibi e delle bevande e il relativo scaricamento.
6. L'assistenza pulizia e servizi di scalo comprende:
- la pulizia esterna e interna dell'aereo, il servizio dei gabinetti e dell'acqua;
 - la climatizzazione e il riscaldamento della cabina, la rimozione della neve e del ghiaccio, lo sbrinamento dell'aereo;
 - la sistemazione della cabina mediante attrezzature di cabina, il magazzinaggio di queste attrezzature
7. L'assistenza carburante e olio comprende:
- l'organizzazione e l'esecuzione del rifornimento e del recupero carburante, compreso il magazzinaggio, il controllo della qualità e della quantità delle forniture;
 - il rifornimento di olio e di altre sostanze liquide.
8. L'assistenza manutenzione dell'aereo comprende:
- le operazioni ordinarie effettuate prima del volo;

- le operazioni particolari richieste dall'utente;
 - la fornitura e la gestione del materiale necessario per la manutenzione e dei pezzi di ricambio;
 - la richiesta o prenotazione di un'area di parcheggio e/o di un hangar per effettuare la manutenzione.
9. L'assistenza operazioni aeree e gestione degli equipaggi comprende:
- la preparazione del volo nell'aeroporto di partenza o altrove;
 - l'assistenza in volo, compreso, all'occorrenza, il cambio d'itinerario di volo;
 - i servizi dopo il volo;
 - la gestione degli equipaggi.
10. L'assistenza trasporto a terra comprende:
- l'organizzazione e l'effettuazione del trasporto dei passeggeri, dell'equipaggio, dei bagagli, delle merci e della posta tra diverse aerostazioni dello stesso aeroporto, ma escluso il trasporto tra l'aereo e qualsiasi altro punto all'interno del perimetro dello stesso aeroporto;
 - qualsiasi trasporto speciale richiesto dall'utente.
11. L'assistenza ristorazione "catering" comprende:
- il collegamento con i fornitori e la gestione amministrativa;
 - il magazzinaggio dei cibi, delle bevande e degli accessori necessari alla loro preparazione;
 - la pulizia degli accessori;
 - la preparazione e la consegna del materiale e delle provviste di cibi e bevande.

Nel piazzale aeromobili sono svolte tutte le *handling lato aria*, cioè tutte le attività sopraccitate che si compiono nell'airside. Le principali sono le seguenti:

1. guida dell'aereo all'arrivo o alla partenza negli spostamenti sull'apron;
2. assistenza al parcheggio del velivolo;
3. assistenza passeggeri in partenza, in arrivo o in transito;
4. assistenza bagagli, merci, posta, carico e scarico aereo;
5. trasporto dell'equipaggio;
6. pulizie di bordo;
7. climatizzazione della cabina;
8. rimozione neve o ghiaccio e sbrinamento del velivolo;
9. assistenza all'avviamento del velivolo;
10. rifornimento del velivolo di carburante e acqua potabile;
11. servizi di catering;
12. eventuale manutenzione del velivolo.

Generalmente queste attività sono distinte in tre gruppi a seconda che siano svolte su un aeromobile in arrivo, in sosta, o in partenza.

Spesso alcune attività son realizzate da società esterne all'aeroporto, cioè da vettori specializzati nella fornitura di handling e sotto il controllo del gestore aeroportuale, entità responsabile di tutte le attività di terra.

Di seguito (vedi figura 1) è riportato un esempio di una classica sequenza di operazioni compiute su un aeromobile dal momento in cui atterra fino al momento in cui riparte con i relativi intervalli temporali tipicamente necessari per ogni operazione. Come si può notare sovente alcune attività vengono svolte in contemporanea per ridurre i tempi necessari ad un turn around³ completo.

³ *Insieme di handling svolte su un aeromobile dal momento in cui atterra al momento in cui riparte*

I **“follow me”** sono mezzi che si occupano di accompagnare l’aeromobile dall’area di manovra alla piazzola di sosta cui è assegnato e viceversa.

Prendono in consegna dalla torre di controllo (dal controllore ENAV, in Italia) l’aereo, in corrispondenza del termine dell’area di manovra, e lo guidano lungo il piazzale di parcheggio precedendolo.

Sono i soli mezzi ad avere precedenza assoluta ed a non dover obbligatoriamente rispettare la segnaletica orizzontale del piazzale, se ciò garantisce il mantenimento del livello di sicurezza delle operazioni a terra.



I **trattori di traino aerei** o **“push back”** sono trattori di traino pesanti utilizzati per spostare un aereo in fase di decollo, quando questo deve lasciare la piazzola, dove si trova in stallo, per recarsi nell’area di manovra e decollare, senza effettuare tale operazione in self manoeuvring.



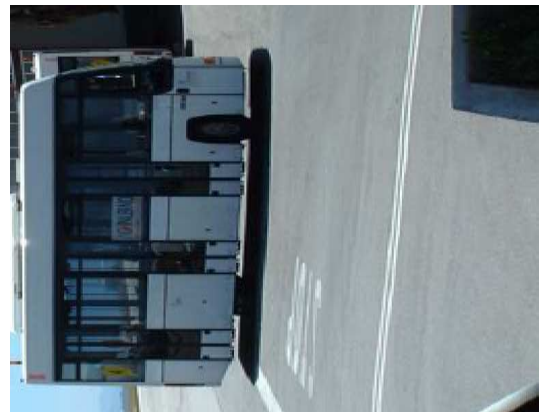
Hanno una capacità di traino e spinta tale da riuscire a far muovere un aereo wide body, come un boeing 747, per decine di metri.

Sono di due tipi:

- il Tipo 1 necessita di sbarre rimorchiatrici: sono generalmente utilizzati per piccoli aeromobili e necessitano dell’intervento di due operatori;
- il Tipo 2 aggancia le ruote sotto il muso dell’aeromobile.

Entrambi i tipi di rimorchiatori sono in grado di trasportare tutti i tipi di aeromobili per lunghe distanze ad una velocità ragionevole, anche se il secondo tipo generalmente può raggiungere velocità maggiori.

Gli “*interpista*” sono autobus di diverse grandezze, utilizzati per il trasporto di passeggeri e di equipaggi, tra terminal ed aeromobili, qualora il layout aeroportuale non garantisca la presenza dei *loading bridge*, atti a tale funzione.



Sono dotati di ampie porte scorrevoli, laterali e posteriori, e di sospensioni pneumatiche, che permettono di variare l’assetto verticale del mezzo, consentendo un incarozzamento veloce dei passeggeri.

Gli interpista hanno una capacità che varia da 80 a 140 passeggeri a seconda delle versioni.

Data la loro larghezza (> 2,50 metri, limite di larghezza per la circolazione su strada), costituiscono trasporti speciali, quando utilizzati al di fuori della viabilità interna aeroportuale.

I “*loading bridge*” sono ponti mobili di carico su ruote o binari.

Possono variare il proprio assetto sia orizzontalmente che verticalmente, tramite sospensioni pneumatiche, per raggiungere tutte le altezze alle quali si trovano i portelli di carico degli aeromobili, raggiunti tramite una pedana telescopica di estremità.



Fanno parte delle strutture centralizzate, sotto il diretto controllo del Gestore aeroportuale. Provvedono alla sostituzione dei servizi GPU⁴ e alle operazioni di condizionamento della cabina, di rifornimento di acqua potabile e di carburante.

Le *scale passeggeri* sono scale, semoventi (autoscale) o non, che consentono a passeggeri ed equipaggio di scendere o salire su aeromobili in scalo, qualora siano ospitati in piazzole remote (non raggiunte da loading bridge).



Vengono utilizzate sia per aerei di tipo narrow body che per aerei di tipo wide body.

Le rampe di scale ad innalzamento pneumatico hanno una larghezza di circa 1.5 metri e possono raggiungere il range di altezze comprese tra i 2.45 metri e i 5.75 metri, in funzione della posizione dei portelli d'imbarco dell'aereo assistito.

Gli *elevatori per passeggeri disabili* sono mezzi semoventi utilizzati per consentire l'imbarco o lo sbarco di passeggeri portatori di handicap, a cui sia impedita la normale deambulazione.

La procedura vigente in materia impone che i disabili siano imbarcati



⁴ Ground Power Unit, si veda pag. 24

prima degli altri passeggeri e sbarcati dopo che gli altri hanno già lasciato il velivolo.

Tali veicoli hanno mediamente una capacità di carico di 1500 kg e possono trasportare contemporaneamente sino ad otto passeggeri disabili; tramite un sistema pneumatico di innalzamento della cabina, giungono all'altezza consentita per collegarsi al portellone dell'aereo, mediante rampa telescopica.

I “*baggage dolly*” sono carrelli da traino adoperati per il trasporto dei bagagli e/o merci sia in arrivo che in partenza.



La piattaforma utilizzabile per il carico dei bagagli è larga 1.4 metri, lunga 2.5 metri ed ha una capacità di carico di 2500 Kg.

Le industrie, che costruiscono i baggage dolly, indicano che la velocità massima di traino è di 30 km/h.

Possono appartenere a due tipologie, coperti e scoperti: i primi possono essere utilizzati con ogni condizione climatica, onde garantire un trasporto sicuro di bagagli e merci.

I *trattori leggeri* sono piccoli e maneggevoli trattori utilizzati per la movimentazione dei convogli di baggage dolly, di container e cargo dolly sulla superficie dell'apron.



Sono dotati di motori diesel o elettrici a batterie ricaricabili, di quattro ruote

motrici e sospensioni indipendenti. In tal modo possono essere efficienti in qualsiasi condizione climatica.

Hanno mediamente capacità di traino massima di 80 tonnellate.

Quando siano presenti trattori elettrici, bisogna provvedere i parcheggi di stazioni di ricarica per le batterie.

I “*conveyor belt loader*” sono nastri trasportatori utilizzati dagli operatori di rampa per velocizzare il processo di carico e scarico bagagli e merci dai velivoli.

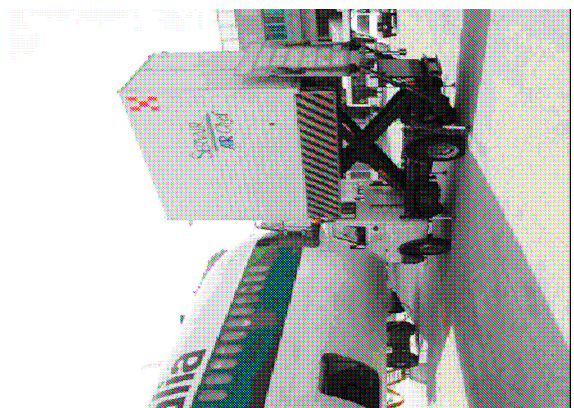


Vista la possibilità di cambiare l'angolo di inclinazione rispetto al

suolo del nastro trasportatore, tramite un sistema pneumatico, è possibile raggiungere la stiva di qualsiasi tipologia di velivolo. Precisamente il conveyor è in grado di raggiungere un range di altezze comprese tra il metro e i 2.8 metri.

Solitamente hanno una capacità di carico di 120 kg/metro di nastro.

Gli *elevatori per servizio di catering* sono mezzi utilizzati per il trasporto e lo stivaggio di cibo e bevande a bordo dei velivoli, in funzione delle richieste del vettore.



Come altri tipi di elevatore, sono in grado di connettersi direttamente alla cabina

dell'aeromobile tramite un sistema d'innalzamento pneumatico del cassone posteriore ed una rampa telescopica, quindi possono raggiungere un vario range di altezze.

I “*cargo loader*” sono utilizzati per le operazioni di carico e scarico di velivoli che trasportano merce. Hanno una capacità di carico di circa 7300 kg ed una velocità massima di 10 Km/h.

Le dimensioni della piattaforma di carico sono standardizzate in funzione del numero e del tipo di unità di carico (igloo, pallet o container aeronautici) da spostare.

Le unità di carico adibite al trasporto merci hanno dimensioni specifiche prestabilite dalla IATA⁵ e identificate tramite un codice alfanumerico.



I “*cargo dolly*” sono piattaforme di carico container, aventi capacità di carico di 7.300 kg, trainate a rimorchio da trattori leggeri.



I *GPU (Ground Power Unit)* sono unità generatrici di potenza utilizzate da velivoli sprovvisti di APU (Auxiliary Power Unit).

L'APU è un motore turbofan del tutto analogo ai motori del velivolo, ma di minore dimensione che, in assenza di potenza derivante dal funzionamento dei motori principali, genera energia sia elettrica che sotto



⁵ *International Air Transport Association*

forma di aria compressa, utilizzate entrambe per l'alimentazione degli impianti elettrici e dei sistemi pneumatici di bordo.

I GPU possono anche supplire al fabbisogno di energia elettrica del velivolo a motori spenti, quando staziona sull'apron per lunghi periodi di tempo.

Gli **ASU (Aircraft Starter Unit)** sono veicoli, semoventi o a rimorchio, utilizzati per agevolare l'accensione dei motori turbofan di un velivolo in partenza.

Inviano aria, ad una determinata pressione (sino ad 8 atmosfere), al sistema pneumatico dei compressori dei turboreattori, in modo da richiedere una minore potenza alle turbine degli stessi in fase di avviamento. In conseguenza di ciò si ottengono minori emissioni di inquinanti e minori consumi di carburante.



I **veicoli per il rifornimento del carburante** sono autobotti utilizzate per il rifornimento sotto bordo dei velivoli.

Sono equipaggiate con una piccola scala a rimorchio, utilizzata dagli operatori per raggiungere i bocchettoni posti sotto le ali del velivolo.



Visti i rischi di elevata infiammabilità del combustibile (cherosene) usato dai velivoli, le operazioni di rifornimento sotto bordo devono sempre avvenire nel massimo rispetto dei regolamenti vigenti in materia di sicurezza aeroportuale.

Ogni piazzola che ospiti un velivolo è sempre comunque dotata di particolari tipi di estintori ad utilizzo immediato, quando possano verificarsi condizioni di rischio.

I veicoli più grandi possono pompare fino a circa 4000 litri al minuto.

I ***veicoli di servizio toilette*** sono mezzi che, a richiesta, durante lo stazionamento dei velivoli, sono dotati di una piccola cisterna per effettuare il servizio di evacuazione delle toilette di bordo.



I ***veicoli di rifornimento dell'acqua potabile*** sono piccole autobotti che permettono il rifornimento dei serbatoi idrici dei velivoli rimasti sprovvisti di acqua potabile, durante lo stazionamento.



Le procedure impongono che, ogni qualvolta sia effettuato il rifornimento di un velivolo, l'intera cisterna debba essere scaricata e rifornita nuovamente.

Le *piattaforme idrauliche* sono utilizzate per fornire servizi di pulizia delle parti inaccessibili dei velivoli, come ad esempio il parabrezza.

La gabbia si muove prima verso il basso e poi sale fino ad un massimo di 10 metri di altezza.

I controlli sono realizzati in modo da non poter essere azionati accidentalmente.



Le *piattaforme ad aria* facilitano le operazioni di manutenzione del velivolo.



La matrice seguente (Figura 2) riassume le principali attività svolte in un turn around e i mezzi impiegati per il compimento di ciascuna di esse.

OPERAZIONI	trattori leggeri	dolly	Scale mobili	Push back	cannon acqua	deminerizzata	acqua	catcing	pulizie	interpista	ASU	lance	riscaldamento	unita	Follow me	Spazzaneve	piattaforma idraulica	piattaforme ad aria	mulieto	loading bridge	elevatore disabili	loader	conveyor belt	unita GPU	cargo loader	servizio toilette
Taxing - follow me				x											x											
Spegnimento motori																										
Avvicinamento scala			x																							
Scarico bagagli																				x	x				x	
Trasporto passeggeri											x															
Trasporto bagagli	x	x																								
Pulizia cabina									x																	
Rifornimento carburante												x									x					
Rifornimento acqua					x	x															x					
climatizzazione													x								x					
catering								x																		
servizio toilette																										x
Smistamento bagagli																										
Trasporto bagagli	x	x																								
Carico bagagli																				x	x		x		x	
Trasporto passeggeri											x															
imbarco			x																							
Rimozione scala			x																							
Push-back				x																						
Avviamento motori											x														x	
Taxing-follow me				x											x											
Rimozione ghiaccio / neve													x													
lavaggio aereo													x													
rimozione neve																x										
manutenzione velivolo																	x	x								

Figura 2. Matrice mezzo-servizio per un generico turn-around

4. Chi comanda nelle apron?

Non esiste il “Capo” dell’aeroporto, nessuno è univocamente responsabile del fatto che un aereo parta puntuale, caricando i passeggeri, i bagagli e la merce corretti, tutto in condizioni di assoluta sicurezza.

E’ in fase di approvazione la nuova normativa che prevede una parziale revisione della ripartizione delle responsabilità secondo il seguente schema:

- ENAC⁶: direttive e vigilanza
- Gestore Aeroportuale: operazioni a terra
- ENAV⁷: controllo del traffico aereo

Come per l’aeroporto, anche per il gestore aeroportuale non esiste un unico responsabile per tutti i servizi di terra, ed inoltre non esiste una divisione delle responsabilità delle handling ben definita, essa infatti varia da aeroporto ad aeroporto.

La Tabella 1 mostra la suddivisione delle responsabilità per le attività di assistenza a terra per alcuni aeroporti mondiali.

Tabella 1. Suddivisione delle responsabilità per le attività di assistenza a terra in alcuni aeroporti mondiali.

(Tratta da: Airport Operations, pag. 168)

⁶ Ente Nazionale per l’Aviazione Civile

⁷ Ente Nazionale di Assistenza al Volo

	Lisbona, Portogallo	Amsterdam, Olanda	Houston, USA	Birmingham, Regno Unito	Oslo, Norvegia	Dubino, Eire	Francoforte, Germania	Johannesburg, Sud Africa	Kingston, Giamaica	Londra/Gatwick, Unito Regno	Londra/Heathrow, Unito Regno	Los Angeles, USA	Manchester, Regno Unito	Copenaghen, Danimarca	Vienna, Austria	Monaco, Germania	Parigi, Francia	Toronto, Canada	Rio de Janeiro, Brasile	Hong Kong	Singapore	Melbourne, Australia	Indianapolis, USA	Kansas City, USA	Dallas, USA	Vancouver, Canada	Tampa, USA	Durban, Sud Africa
Check-in terminal bagagli	B	B D	B	B C	B	B	B	A B	B D	B D	B	B	C D	B D	B	A	A B	B	B	B	B D	B	B D	B	B	B	B	B
Carico/scarico bagagli	B	D	B	A B	B	B	A	B	B D	B D	B	B	A	B D	A	A	A B	B	D	C	B D	B	B D	B	B	B	B D	B
Reclamo bagagli	B	D	B	A B	B	B	A	A B	A B D	A	A	B	A	B D	A	A	A	A	B	B	B D	B	B	B	B	B	B D	B
Check-in passeggeri	B	B D	B	B C	B	B	A B	B	B D	B D	B	B	C D	B D	B	B	A B	B	B	B	B D	B	B	B	B	B	B	B
Transito passeggeri	B	D	-	B C	B	B	B	B	B D	B D	B	B	C D	B D	B	B	A B	B	B	B	B D	B	B	B	A	B	-	B
Passeggeri anziani e disabili	A	D	B	A B	B	B	A B	B	B D	A	A	B	A	B D	A B	A	A B	B	B	B	B D	B	B D	B	B	B	B D	B
Sistema informazioni voli	A	A	B	A	B	A	A	A	A B D	A	B	A B	A	A B	A	A	A	A	A	A	A	A B	A	B	B	B	B	A
Sistema Informazioni trasporti a terra	A	A	A	-	B	A	A	A	A	A	A	A B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A D	A	A B	A	A	A	B
Sicurezza se assente polizia (P)	A	P	D	A	B	A	A	A	A B	A	A	A	A	A	A	P	A	B	A	A	A B D	A B	A B D	A B	A B	C D	A	A
Supervisione servizi di rampa	A	A	B	B	B	B	A	B	A B D	B D	B	B	A	B	A	A	A	B	A	A	A B D	B	B	B	B	A B	B	B
Marshaling	A	A	B	A	B	B	A	A	A B D	A	A	B	A	A	A	A	A B	B	A	A	A B D	A B	B	B	B	B	A D	A
Start-up	A	D	B	B	B	B	B	B	B D	B	B	B	C D	B	A	B	A B	B	A	B	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Controllo sicurezza rampe	A	A	B	A	B	A	A	B	A B D	A	B	A B	A	B	A	A	A	A	A	A	A B	A B D	A	B	B	A B	A B	A
Riparazioni aeromobili in pista	B	D	B	B	B	B	B	B	B D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	B D	B	B	B	B	B	B
Rifornimento	C	B D	B	C	B	B	C	B	A	C	C	B C	C D	D	D	D	C	D	D	D	D	D	D	B D	D	D	D	B
Controllo Pneumatici	B	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C D	B	B	B	B	B	B	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Rifornimento Energia	B	D	B	A B	B	A	A B	B	B D	D	A	B C	C D	B D	A	A	A B	B	B	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Sbrinamento aeromobile	-	D	B	B	B	B	A B	B	-	B D	B C	-	B D	D	A	B	A B	B	-	D	B D	B	B D	B	B	B	-	B
Climatizzazione	B	D	B	B	B	B	A	B	B D	A	A	B	A C D	D	A	B	A B	B	-	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Servizi di toilette	D	D	B	B	B	B	A	B	B D	A C	A C	B C	C D	D	A	A	A	B	D	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Acqua potabile	B	D	B	B	B	A	A	B	B D	A C	A C	B D	A	D	A	A	A	B	D	D	A B D	B	B	B	B	B	A D	B
Acqua demineralizzata	B	D	B	B	B	B	A	B	B D	B D	B C	B	C D	D	A	D	A	B	D	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Manutenzione aeromobili di routine	B	B D	B	B	B	B	B	B	B D	B D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	B D	B	B	B	B	B	A D	B
Manutenzione aeromobile straordinaria	B	B D	B	B	B	B	B	B	B D	B D	B	B	B D	B	B	B	B	B	B	D	B D	B	B	B	B	B	A	B
Pulizia esterna	B	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	D	A	-	B	B	B	D	B	B	B	B	B	B	A	B

aeromobile			D						D										D	D							
Servizi a bordo	D	D	B	B	B	B	C	B	B	D	D	D	D	A	C	A	B	B	D	D	B	B	B	B	B	A	B
Catering	D	D	B	C	B	B	B	B	C	D	D	D	A	D	A	D	B	B	D	D	B	D	B	D	B	B	
Intrattenimento in volo	D	B	B	B	B	B	B	B	B	D	D	B	B	D	B	D	B	D	B	B	B	D	B	B	B	A	B
Servizi minori alla cabina	B	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	B	B	B	B	B	B	A	B
Variazione configurazione posti	B	D	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	B	B	B	B	B	B	A	B
Carico catering	D	D	D	C	B	B	B	B	B	D	D	B	A	B	A	D	B	B	D	D	D	B	D	B	D	A	B
Carico merce	B	D	B	A	B	B	A	B	B	D	B	B	A	B	A	B	A	B	C	D	B	B	B	B	B	A	B
Carico posta	B	D	B	A	B	B	A	B	B	D	B	B	A	B	A	B	A	B	D	C	D	B	B	B	B	A	B
Imbarco equipaggio	B	D	B	C	B	B	A	B	B	B	B	B	A	B	A	B	A	B	C	D	B	B	B	B	B	A	B
Interpista	B	A	-	-	-	B	A	B	-	C	A	-	A	A	A	B	B	D	C	D	B	-	B	A	D	-	B

Legenda: A = responsabilità dell'aeroporto;
 B = responsabilità della compagnia aerea
 C = responsabilità della compagnia di servizi dipendente dall'aeroporto
 D = responsabilità della compagnia di servizi dipendente dalla compagnia aerea

Esistono comunque delle figure standard in ogni apron che si assumono la responsabilità per determinati settori di attività; di seguito sono riportate quelle principali:

Addetto al carico e allo scarico dei bagagli.

È il lavoro forse più faticoso in aeroporto e richiede una certa tecnica. Le stive degli aerei sono tutte diverse e bisogna saper caricare di tutto in spazi spesso angusti: gabbie con animali, pesci, materie preziose o pericolose, bare, frutta, pulcini, tutto viene trasportato in aereo. Col tempo l'addetto si può specializzare diventando conduttore di loader o push-back, un lavoro molto delicato perché un minimo errore può danneggiare l'aereo. La formazione è fornita dalle compagnie.

Addetto alla Rampa.

Coordina il turn-around del velivolo, ovvero verifica che catering, loaders, addetti alle pulizie, refueller etc, siano presenti alla piazzola

prima dell'arrivo dell'aereo, che tutti lavorino efficacemente, cercando di minimizzare il tempo di sosta dell'apparecchio. Inoltre porta nel cockpit (la cabina dell'aeromobile) il file per l'equipaggio con il meteo e il piano di volo.

Ha un compito molto delicato: in collaborazione col weight and balance e il check-in verifica che i bagagli, la posta e le merci siano caricati correttamente come stabilito dal Load Plan e che i passeggeri si siedano dove stabilito. Prima della partenza porta al Comandante la Load Sheet dove prende la responsabilità del corretto carico dell'aereo. Per dare un'idea della difficoltà di questo lavoro, un turn-around di un B737 può essere di 30 minuti, dunque bisogna che tutto sia organizzato alla perfezione.

La formazione può essere fatta dalla compagnia, ma sempre più spesso si trovano istituti specializzati per questo tipo di lavoro.

Addetto al Weight and Balance.

Effettua il bilanciamento dei velivoli. In accordo col piano di volo, controlla che le limitazioni strutturali o operative siano rispettate e decide come far caricare le stive e come far sedere i passeggeri in cabina per la sicurezza del volo. Sembra evidente che se l'aereo è troppo sbilanciato all'indietro al momento del decollo la coda del velivolo rischia di toccare la pista, viceversa se è troppo sbilanciato verso l'avanti, lo stabilizzatore non riuscirà mai a compensare il peso e l'aereo non potrà decollare. È un lavoro molto delicato, un errore può creare un incidente o un importante ritardo. Spesso l'addetto al W&B è un ex rampista, visto che bisogna conoscere gli aerei nei minimi dettagli.

Flight Dispatcher.

Si occupa di tracciare le rotte, cercando di sfruttare al massimo i venti in altitudine, evitando le zone di turbolenza, i cumulonembi e i cicloni. Calcola il carico che è possibile trasportare in funzione della rotta e del tipo di apparecchio. Prepara il piano di volo per l'equipaggio e il piano di volo per l'ATC⁸, il controllo aereo. Segue in tempo reale l'attività dei velivoli, gli slots, e propone delle soluzioni in caso di problema, come un forte ritardo o la chiusura di un aeroporto. La formazione è fornita da istituti specializzati.

In line engineer.

È il meccanico che verifica il velivolo durante il turn-around, spesso autorizza il refueller a fare il pieno, controlla i pneumatici ed il livello dell'olio nei motori ed effettua un controllo visuale dell'apparecchio. La sua formazione è fornita da istituti specializzati.

Tutto lo staff è sotto gli ordini del **Capo Scalo**, è lui che decide la politica da attuare, se bisogna assumere personale o no, in rapporto al budget calcolato dalla compagnia.

Di seguito (vedi Figura 3 e Figura 4) sono riportati due esempi di turn-around per rendere chiara la complessità e il vasto numero di operazioni che vengono svolte. Risulta quindi evidente la vitale importanza di compire ogni attività in totale sicurezza e nel pieno adempimento delle norme IATA.

Figura 3. Esempio di turn-around per un 737 – 200

(Tratta da: <http://www.aero.polimi.it/~picardi/bacheca/casarotto/04.ppt>)

⁸ *Air Traffic Control*

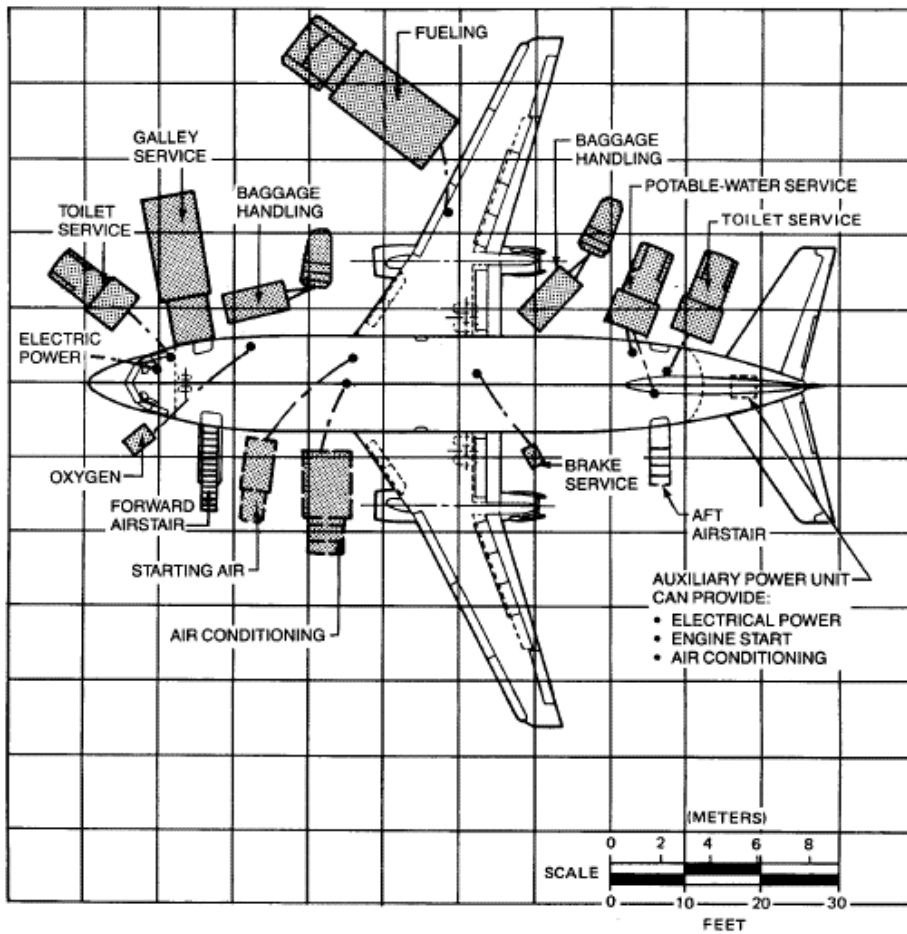
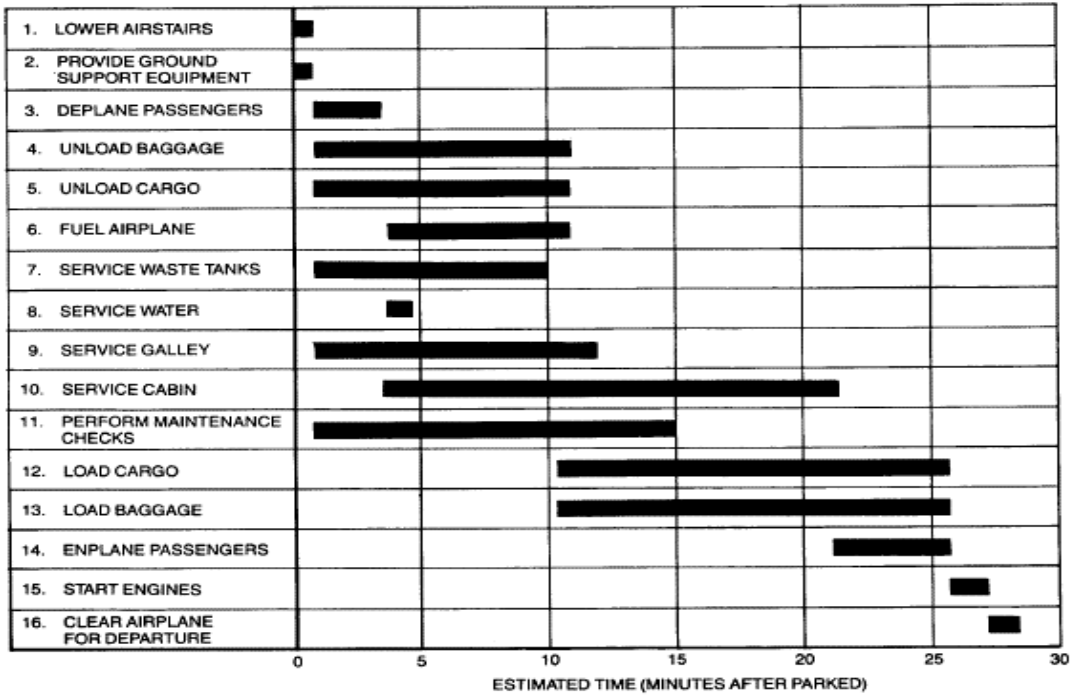


Figura 4. Esempio di turn-around per un 777 – 200

PARTE SECONDA

1. Vehicle Routing Problem

L'obiettivo di questo lavoro è trovare un algoritmo per instradare simultaneamente più aeromobili mediante trattori a guida automatica.

Questo tipo di problema rientra tra i cosiddetti **problemi di istradamento** o *Vehicle Routing Problem* (VRP).

In letteratura VRP è il nome generico con cui ci si riferisce ad un'intera classe di problemi di ricerca operativa dalle numerose implicazioni pratiche diffuse in tutti i settori concernenti il trasporto di merci, come ad esempio:

- raccolta di posta nelle cassette postali;
- servizio scuolabus;
- visite mediche a domicilio;
- visite di manutenzione preventiva;
- raccolta rifiuti.

La distribuzione di merce riguarda il servizio di un insieme di *clienti*, attuato mediante una flotta di *veicoli*, localizzati in uno o più *depositi* e affidati ad *autisti*, che si muovono su di una *rete stradale*. La soluzione di un VRP consiste nella determinazione di un insieme di cammini (*route*), ognuno percorso da un singolo veicolo che parte e arriva ad un deposito (non necessariamente lo stesso), tali da soddisfare i requisiti di clientela e distributore e, contemporaneamente, da minimizzare il costo globale del trasporto.

La rete stradale è generalmente descritta da un grafo, orientato o meno; i suoi vertici rappresentano la posizione dei clienti e dei depositi, mentre gli archi modellano i collegamenti stradali. Si tratta inoltre di un grafo pesato, ovvero ad ogni arco è associato un costo, che generalmente simboleggia la lunghezza del collegamento, o il tempo di percorrenza.

A seconda del problema clienti, veicoli, depositi, autisti e cammini possono avere caratteristiche e vincoli diversi, come ad esempio capacità massima, finestre temporali utili per il servizio, penalità, priorità, etc.

Gli obiettivi che si possono cercare di conseguire con il calcolo di una soluzione ad un problema di vehicle routing sono molteplici e, non di rado, contrastanti. Tipici obiettivi sono:

- minimizzazione del costo globale di trasporto, dipendente dalla distanza totale percorsa, dal tempo totale impiegato e dai costi fissi di veicoli e autisti;
- minimizzazione del numero di veicoli e di autisti necessari per servire tutti i clienti;
- bilanciamento dei route in termini di tempi di percorrenza e/o carico dei veicoli;
- minimizzazione delle penali associate al parziale servizio fornito ai clienti.

Nel problema affrontato in questo lavoro il cliente è l'aeroporto e i suoi depositi sono tutti i gate presenti nell'airside; i depositi del fornitore sono le piste in cui atterrano gli aeromobili e la rete stradale è composta dall'insieme di piste di rullaggio; gli autisti non sono previsti in quanto, come già anticipato, si desidera sfruttare trattori a guida automatica.

Il problema dell'instradamento di veicoli a guida automatica è già stato affrontato in diversi lavori tra cui: "Developing Conflict-Free Routes for Automated Guided Vehicles" di N. Krishnamurthy, R. Batta e M. Karwan e "Comparison of dynamic routing techniques for automated guided vehicle system" di F. Taghaboni-Butta e J. Tanchoco.

Uno dei lavori più recenti (dell'ottobre del 2007) è quello effettuato da: Ewgenij Gawrilow, Rolf H. Möhring, Ekkehard Köhler e Björn Stenzel, quattro ricercatori tedeschi dell'Università di Matematica di Berlino.

Nel prossimo paragrafo è riportato una sintesi di tale lavoro; la versione completa è reperibile all'indirizzo internet:

<ftp://ftp.math.tu-berlin.de/pub/Preprints/combi/Report-039-2007.pdf>

2. Instradamento dinamico di veicoli a guida automatica in tempo reale

I veicoli a guida automatica (AGV) vengono sfruttati in una vasta gamma di aree applicative e sono utilizzati spesso per compiti di trasporto, per migliorare i sistemi di produzione su larga scala.

Vengono utilizzati in special modo i cosiddetti AGV a instradamento libero in quanto essi aggiungono una maggiore flessibilità al sistema. Risulta quindi evidente che il controllo di questi AGV è la chiave per ottenere un efficiente sistema di trasporto che miri a massimizzare i volumi di produzione.

Da queste riflessioni nasce questo lavoro che si focalizzerà sulla ricerca di un algoritmo per ottenere un buon instradamento privo di collisioni tra i veicoli.

2. IL MODELLO:

Il sistema di trasporto automatizzato sarà modellato con un grafo G orientato, rappresentante le possibili corsie del sistema, avente circa 10.000 archi. Ogni arco a avrà un fissato tempo di transito $\tau(a)$ fissato.

Le richieste di trasporto arrivano sequenzialmente e saranno modellate da una sequenza $\sigma = r_1, \dots, r_n$ di richieste. Ogni richiesta $r_j = (s_j, t_j, \theta_j)$ consiste di un nodo sorgente s_j , un nodo destinazione t_j , e un tempo di partenza desiderato θ_j . Lo scopo è minimizzare il tempo di transito totale dato dalla somma dei tempi di transito di tutte le richieste.

L'approccio utilizzato per cercare di raggiungere l'obiettivo sarà di calcolare iterativamente il cammino minimo per ogni richiesta.

Le proprietà fisiche degli AGV impongono alcune caratteristiche particolari al modello. Anche se ogni percorso di un AGV può essere rappresentato nel grafo, non ogni possibile cammino nel grafo può essere

realmente ricondotto ad un AGV. La ragione di questa difficoltà risiede nel complicato comportamento di svolta, che rende necessario cominciare a girare le ruote ben prima che una particolare intersezione sia raggiunta. Di conseguenza, un AGV necessita, nel suo cammino, di un rettilineo sufficientemente lungo tra due curve consecutive. Per risolvere questo problema nell'algoritmo verrà introdotto, in un passo pre-processamento, un insieme di *archi artificiali* alla rete, ognuno rappresentante una possibile svolta. Inoltre, per ogni nodo del grafo saranno introdotte regole di svolta per definire quali archi "uscenti" da un nodo possano essere utilizzati da un particolare arco "entrante". Come risultato si avrà una rete più grande (circa 45.000 archi) che catturerà tutti i possibili movimenti di un AGV.

Un'altra proprietà che crea complicazioni è quella delle dimensioni degli AGV. Se un AGV attraversa o sosta in un arco a , esso occupa una porzione di rete superiore rispetto al singolo arco a , che sarà di conseguenza bloccata per gli altri AGV.

2.1 Instradamento statico e suoi limiti

Un approccio standard per l'instradamento degli AGV è il cosiddetto instradamento statico. In questo caso si calcolano semplicemente percorsi statici nella rete, ignorando la loro natura dipendente dal tempo. Più precisamente, si calcolano dei cammini minimi standard, per esempio utilizzando l'algoritmo di Dijkstra, rispetto i costi degli archi, consistenti nel tempo di transito $\tau(a)$, più un costo aggiuntivo che è funzione del numero di percorsi che hanno già utilizzato quell'arco. Ovviamente questi percorsi non son privi di conflitti. Risulta quindi necessario un sistema aggiuntivo di soluzione dei conflitti che, al tempo di esecuzione dei cammini, garantisca che non ci siano collisioni. Un

modo per fare questo è quello di allocare iterativamente a un AGV la successiva parte del percorso e bloccarla per tutti gli altri AGV.

I vantaggi dell'instradamento statico sono chiari: esso è di facile implementazione e consente un veloce calcolo dei percorsi, tuttavia vari svantaggi derivano dal sistema di soluzione di conflitti. In particolare, si possono generare deadlock (un deadlock si ha se uno o più AGV vorrebbero occupare un' area che è già occupata da un altro AGV: nessuno di loro è in grado di continuare il proprio cammino e così il sistema è bloccato).

Oltre ai deadlock ci sono altri limiti, come le eventuali deviazioni o problemi di congestione del traffico, oltre al fatto che non viene considerata la natura dipendente dal tempo. Tutto questo si riflette sui tempi di transito che possono risultare ben distanti dai minimi tempi di transito possibili. Inoltre i tempi d'arrivo degli AGV alle proprie destinazioni non possono essere previsti nel momento del calcolo dei percorsi e questo risulta essere il maggior limite per successivi passi di programmazione nella catena logistica che dipendono dalla conoscenza dei tempi d'arrivo.

2.2 Instradamento dinamico

Per risolvere i problemi emersi nel sopraccitato modello verrà seguito un approccio completamente diverso che calcola cammini minimi e contemporaneamente liberi da conflitti.

Ci sono due ingredienti chiave che devono essere considerati in questo modello.

Bisogna tener conto sia delle dimensioni fisiche degli AGV (come già accennato) sia dell'approccio che deve essere dipendente dal tempo (dinamico).

Ogni arco può essere visto come un insieme di intervalli temporali, ognuno rappresentante un diverso AGV, che è instradato su quell'arco o che blocca quell'arco durante alcuni intervalli temporali. Si noti che questi intervalli devono essere a due a due disgiunti, infatti una sovrapposizione significherebbe che i corrispondenti AGV incidono nello stesso arco al tempo della sovrapposizione. Infatti, in questo algoritmo, non verrà mantenuto l'insieme di intervalli in cui un arco è bloccato, ma l'insieme complementare di intervalli temporali liberi (*finestre temporali*).

Per risolvere il problema delle dimensioni degli AGV verrà usato un poligono $P(a)$ per ogni arco a , che descrive le aree bloccate quando un AGV (il suo centro) è collocato nell'arco a . Perciò è proibito utilizzare due archi nello stesso istante se i corrispondenti poligoni si intersecano. Per ogni arco a , questo porta a un insieme $confl(a)$ di cosiddetti archi dipendenti geograficamente, che non possono essere usati contemporaneamente. Se un AGV viaggia lungo un arco a nell'intervallo $[\theta_1, \theta_2]$, tutti gli archi dipendenti geograficamente sono bloccati da θ_1 a θ_2 .

Dopo aver instradato una richiesta, si devono riaggiustare le finestre temporali in accordo con l'utilizzo degli archi del nuovo cammino trovato e dei suoi archi dipendenti geograficamente.

3. L'ALGORITMO

L'algoritmo consta di due parti. La prima è un passo pre-processamento; la seconda prevede che tutte le richieste siano instradate iterativamente in tempo reale col calcolo dei percorsi e per ogni cammino calcolato sono corrette le finestre temporali degli archi coinvolti.

3.1 Passo pre-processamento

Il pre-processamento determina gli insiemi dei conflitti e le regole di svolta per ogni arco a .

Per prima cosa tutti i poligoni $P(a)$ sono confrontati a due a due. Se i poligoni $P(a)$ e $P(b)$ si intersecano l'arco a viene inserito in $confl(b)$ e l'arco b in $confl(a)$.

Poi, per ogni arco a si crea una lista di archi $OUT(a)$, contenente quegli archi che possono essere usati dopo a in un possibile percorso che rispetti le proprietà degli AGV.

Questo passo viene fatto solo una volta.

3.2 Calcolo dei percorsi: problema dei cammini più rapidi con finestre temporali.

Il problema che dobbiamo considerare può essere riassunto come segue: dato un grafo G , un nodo sorgente s , un nodo destinazione t , un istante di partenza θ , tempi di transito $\tau(a)$, costi $c(a)$ e un insieme di finestre temporali $F(a)$ per ogni arco a , calcolare un cammino minimo (relativamente ai costi) che rispetti le finestre temporali date (cioè un AGV può attraversare o sostare su un arco solo durante una delle sue finestre temporali “libere”, dati da $F(a)$).

L'algoritmo utilizzato è un algoritmo basato sull'etichettatura degli archi, simile all'algoritmo di Dijkstra.

Un etichetta $L = (a_L, c_L, I_L, pred_L)$ di un arco a_L consta di un costo c_L , un predecessore $pred_L$ e un intervallo temporale I_L .

Ogni etichetta L rappresenta un cammino dal nodo sorgente s alla coda di a_L , mentre c_L contiene il costo del cammino dall'inizio fino alla coda di a_L ; l'intervallo $I_L = (A_L, B_L)$ rappresenta un intervallo di possibili

tempi d'arrivo all'arco a_L (alla coda di a_L); $pred_L$ è il predecessore di a_L nel cammino.

Si definisce un ordine per queste etichette. Un' etichetta L *domina* una etichetta L_I se e solo se:

$$c_L \leq c_{L_I} \text{ e } I_L \text{ contiene } I_{L_I}$$

le etichette vengono inserite in una pila prioritaria H .

L'algoritmo funziona come segue:

- **Inizializzazione.**

Creare un' etichetta $L = (a, 0, (\theta, \infty), nil)$ per tutti gli archi a uscenti da s e aggiungerli alla pila H

- **Ciclo**

Prendere l'etichetta L col minor costo c_L in H . Se non ci son etichette rimanenti nella pila, ritornare l'informazione che non ci son cammini possibili da s a t . Se t è la coda di a_L ritornare il cammino corrispondente.

Per ogni finestra temporale nell'arco a_L :

- **❖ Espansione dell'etichetta.**

Provare a espandere l'intervallo d'etichetta lungo a_L tramite le finestre temporali dell'arco a_L (i nuovi intervalli d'etichetta dovrebbero essere più larghi possibile), aggiungere i costi $c(a_L)$ al costo c_L e determinare il nuovo predecessore. Se non ci sono possibili espansioni, considerare il tempo finestra successivo per l'arco a_L .

❖ **Test di dominio**

Per ogni arco uscente a in $OUT(a_L)$, aggiungere la nuova etichetta alla pila se non è dominata da nessun'altra etichetta in a . Cancellare le etichette nella pila che sono dominate dalla nuova etichetta.

Nell'instradamento degli AGV, il costo di un cammino è la somma dei tempi di transito degli archi che compongono il cammino più i tempi d'attesa sugli archi, elemento cruciale che rende il problema polinomiale.

Il problema risultante sarà chiamato Problema del cammino più rapido con finestre temporali.(QPPTW Quickest Path Problem with Time-Window)

TEOREMA: l'algoritmo descritto sopra risolve il QPPTW in tempo polinomiale.

3. Un caso particolare

Nelle righe seguenti viene affrontato un caso particolare, di natura puramente accademica, del problema dell'instradamento di veicoli a guida automatica. In particolare è stato elaborato un algoritmo per l'instradamento di aeromobili mediante trattori a guida automatica sotto le seguenti condizioni (vedi Figura 5):

- la rete stradale è una griglia (gli aeromobili possono quindi muoversi solamente in orizzontale o in verticale);
- ogni corsia orizzontale è a senso unico di marcia e i sensi unici sono alternati (due corsie orizzontali consecutive avranno sensi di marcia differenti);
- tutti gli aeromobili partono contemporaneamente;
- tutti gli aeromobili partono allineati sullo stesso livello,
- a due o più aeromobili non può essere stato assegnato lo stesso gate;
- ogni movimento sulla griglia, orizzontale o verticale, impiega un tempo unitario;
- non sono previste soste o fermate per gli aeromobili finché non raggiungono il gate assegnato loro (l'algoritmo deve essere conflict free).

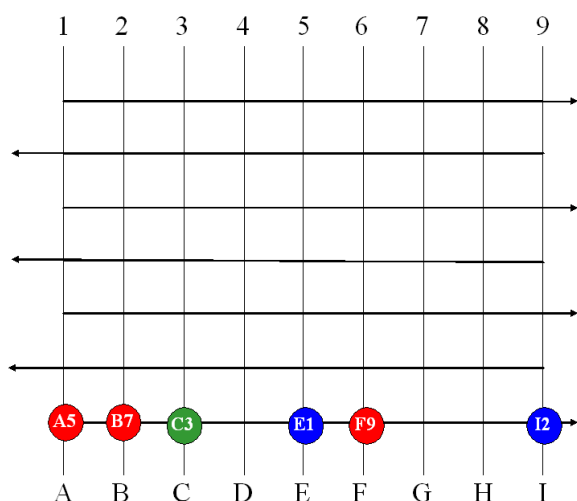


Figura 5. Esempio di problema affrontato dall'algoritmo.

Ogni aeromobile è rappresentato da un cerchio e identificato da una lettera, indicante la posizione di partenza, e da un numero, indicante il gate di destinazione.

Ogni cerchio sarà colorato di rosso se l'aeromobile è concorde, di blu se è discorde o di verde se è in linea col gate assegnatogli.

Le direzioni di marcia dei vari livelli sono rappresentate tramite frecce uscenti dalla griglia.

Per snellire il lessico nelle prossime pagine e per facilitarne la comprensione, è stato approntato un piccolo glossario.

GLOSSARIO

sfasatura: distanza iniziale dell'aeromobile dalla proiezione verticale del gate assegnatogli

distanza orizzontale: distanza corrente dell'aeromobile dalla proiezione verticale del gate assegnatogli

aeromobile concorde: aeromobile che si vuole spostare lateralmente in direzione concorde al senso di marcia del livello in cui si trova.

aeromobile discorde: aeromobile che si vuole spostare lateralmente in direzione discorde al senso di marcia del livello in cui si trova.

livello: corsia orizzontale, individuata anche da un numero intero che indica la distanza dalla corsia orizzontale di partenza (livello 0).

DEFINIZIONI

Siano:

$S(Q)$ la sfasatura dell'aeromobile Q ,

$D_i(Q)$ la distanza orizzontale dell'aeromobile Q all'iterazione i ,

$L_i(Q)$ il livello di Q all'iterazione i

K_l il massimo tra i discordi al livello l

ALGORITMO

PASSO 0: attribuire ad ogni livello un senso unico di marcia alternandoli (ad es. per le corsie pari movimento verso sinistra e per le dispari verso destra).

Calcolare per ogni aeromobile la sua sfasatura.

Inizializzare la distanza orizzonte di ogni aeromobile Q :

$$D_0(Q) = S(Q);$$

porre $i = 0$ (contatore del numero di iterazioni).

PASSO 1: Verificare la direzione di marcia (orizzontale) desiderata per ogni aeromobile escludendo dalla verifica gli eventuali aeromobili già in linea col proprio gate. Se le direzioni sono tutte concordi al senso di marcia andare al PASSO 3, altrimenti andare al PASSO 2;

PASSO 2: muovere ogni aeromobile sui livelli inferiori a quello massimo lateralmente, se concorde con distanza orizzontale maggiore di zero, altrimenti verso l'alto.

Sia M il livello massimo occupato da almeno un aeromobile e K_m la distanza orizzontale massima tra tutti gli aeromobili discordi del livello massimo.

Al livello massimo muovere lateralmente tutti gli aeromobili concordi a distanza maggiore o uguale a K_m e tutti gli altri verso l'alto.

Aggiornare la distanza orizzontale di tutti gli aeromobili Q che si son mossi lateralmente: $D_i(Q) = D_{i-1}(Q) - 1$ andare al PASSO 5.

PASSO 3: Controllo. Se tutte le distanze orizzontali sono uguali a zero, andare al PASSO 4, altrimenti:

- muovere tutti gli aeromobili Q a distanza orizzontale maggiore di zero lungo la direzione di marcia consentita, aggiornando la distanza orizzontale $D_i(Q) = D_{i-1}(Q) - 1$;
- muovere tutti gli altri (già allineati) verso l'alto.

PASSO 4: Verificare se tutti gli aeromobili son arrivati a destinazione e in tal caso l'algoritmo termina, altrimenti muovere gli aeromobili non ancora giunti a destinazione verso l'alto e ripetere il PASSO 4.

PASSO 5: Porre $i = i + 1$ (contatore del numero di iterazioni) e tornare al PASSO 1.

Dimostriamo ora che l'algoritmo proposto è corretto e non genera conflitti.

LEMMA 1 Appena un aeromobile comincia a muoversi orizzontalmente continuerà a farlo finché non sarà in linea col gate assegnatogli (esiste cioè una "precedenza" allo spostamento laterale).

Dimostrazione. Un aeromobile compie il primo spostamento laterale solo se è sul livello massimo ed è concorde con distanza maggiore o uguale al massimo tra i discordi (se non esistono aeromobili discordi, si assuma tale distanza uguale a zero).

Appena il velivolo farà il primo spostamento laterale si troverà ad un livello inferiore rispetto a tutti gli aeromobili discordi, essendosi

quest'ultimi mosse verso l'alto, (o al livello massimo se non esistono aeromobili discordi) e quindi, vista la precedenza al passo orizzontale nei PASSI 2 e 3, continuerà a muoversi lateralmente, nelle iterazioni successive, finché non sarà in linea col proprio gate. \square

NOTA

I conflitti possono essere del tipo:

$$1) A \rightarrow \leftarrow B$$

$$2) A \uparrow \leftarrow B \text{ oppure } B \rightarrow \uparrow A$$

Dove A e B sono due aeromobili qualsiasi.

I conflitti di tipo 1 non sono possibili avendo ogni livello un'unica direzione di marcia, quindi uno dei due movimenti è vietato. Per questo motivo d'ora in poi ci concentreremo esclusivamente sul conflitto di tipo 2.

LEMMA 2 Se $L_j(A) = L_j(B)$ per ogni iterazione $j: 0 \leq j \leq i$ e $L_{i+1}(A) < L_{i+1}(B)$, allora se si verifica un conflitto di tipo 2 all'iterazione $t > i$ deve necessariamente essere: $D_t(A) = 0$ e $D_t(B) > 0$.

Dimostrazione. Per l'ipotesi, $L_j(A) = L_j(B)$ per ogni $0 \leq j \leq i$ e visto che ad ogni iterazione tutti gli aeromobili si muovono, si ha che i due aeromobili per tutte le prime i iterazioni fanno lo stesso tipo di movimento (o entrambi in orizzontale o entrambi in verticale). Se si muovono in orizzontale, per la precedenza dello spostamento laterale (vedi LEMMA 1), continueranno a farlo finché almeno uno dei due non sia in linea col proprio gate e dall'iterazione successiva tale velivolo comincerà a muoversi verso l'alto fino a raggiungere il gate assegnatogli. L'altro velivolo si muoverà in orizzontale per almeno

un'altra iterazione, rimanendo sempre ad un livello inferiore. È evidente che in tale situazione non è possibile che i due aeromobili generino un conflitto.

Quindi, sotto l'ipotesi di conflitto all'iterazione t , per le prime i iterazioni i due aeromobili dovranno muoversi entrambi verso l'alto, perciò sarà $D_i(A) = S(A)$ e $D_i(B) = S(B)$.

Se $L_i(A) = L_i(B)$ e $L_{i+1}(A) < L_{i+1}(B)$ vuol dire che all'iterazione $i + 1$ il velivolo A si è mosso in orizzontale mentre B si è mosso verso l'alto. Risulta quindi evidente che $L_{i+1}(A) = L_{i+1}(B) - 1$, $D_{i+1}(A) = S(A) - 1$ e $D_{i+1}(B) = S(B)$. Dopo le i iterazioni, per le successive $S(A)$ iterazioni, l'aeromobile A si muoverà lateralmente finché sarà $D_w(A) = 0$ (per il LEMMA 1), dove $w = i + S(A)$. Dalla $w+1$ -esima iterazione A si muoverà verso l'alto fino a raggiungere il proprio gate, quindi sarà $D_t(A) = 0$ per ogni $t \geq w$.

Ovviamente, poiché A si muove lateralmente, sarà $L_x(A) < L_x(B)$ per ogni $i+1 \leq x \leq w$ e non sarà quindi possibile un conflitto in queste iterazioni essendo i due aeromobili su due livelli diversi.

Sia $t \geq w+1$ l'iterazione a cui si verifica il conflitto tra i due aeromobili, poiché, per il tipo di conflitto, lo spostamento di B deve essere orizzontale, dovrà per forza essere $D_t(B) > 0$. Quindi se si verifica un conflitto di tipo 2 si ha $D_t(A) = 0$ e $D_t(B) > 0$ con $t \geq w$. \square

PROPRIETA': l'algorithmo non genera conflitti.

DIMOSTRAZIONE

Inizialmente gli aeromobili sono allineati sul primo livello della griglia. Consideriamo una qualsiasi coppia di aeromobili A e B. Le possibili combinazioni di movimenti tra i due aeromobili sono tre:

1. entrambi si muovono lateralmente;
2. A si muove lateralmente e B verso l'alto.
3. entrambi si muovono verso l'alto;

Se siamo nel caso 1 vuol dire che i due aeromobili sono concordi ed entrambi con distanza maggiore o uguale al massimo delle distanze degli aeromobili discordi. Vista la precedenza del movimento laterale (LEMMA 1), entrambi gli aeromobili si muoveranno orizzontalmente finché non saranno in linea col proprio gate e poi verso l'alto fino a destinazione. È immediato verificare che in questa situazione non si può verificare un conflitto.

Se siamo nel caso 2, vogliamo innanzitutto dimostrare che $S(A) \geq S(B)$, per fare questo suddividiamo il problema in due sottocasi a seconda che gli aeromobili siano concordi o discordi tra loro.

Se sono concordi, poiché A si muove lateralmente $D_0(A) \geq K_0$ mentre, poiché B si muove verso l'alto, $D_0(B) < K_0$. Ma allora

$$D_0(A) = S(A) > D_0(B) = S(B).$$

Se gli aeromobili sono discordi tra loro, $D_0(A) \geq K_0 \geq D_0(B)$, la prima disequazione è dovuta al movimento orizzontale di A e la seconda al fatto che K_0 è la distanza orizzontale massima tra tutti i discordi, di cui fa parte B, ma allora $D_0(A) = S(A) \geq D_0(B) = S(B)$.

Possiamo perciò concludere che $S(A) \geq S(B)$ in ogni caso.

Supponiamo ora che si generi un conflitto all'iterazione i e sia h il livello a cui si verifica.

Per giungere nella posizione dove si verifica il conflitto, poiché l'algoritmo non prevede soste per i velivoli, l'aeromobile A dovrà fare h movimenti verso l'alto e $S(A)$ movimenti laterali (consecutivi), dovendo essere $D(A) = 0$ (si veda LEMMA 2). Poiché i due aeromobili partono allineati e devono arrivare nella stessa posizione perché si verifichi un conflitto, anche B dovrà fare h movimenti verso l'alto e di conseguenza, dovendo fare un movimento ad ogni iterazione, $S(A)$ movimenti lateralmente. Ma abbiamo detto, sempre nel LEMMA 2 che, perché si verifichi un conflitto, deve essere $D(B) > 0$, quindi gli $S(A)$ spostamenti laterali di B non sono sufficienti per portarlo in linea col proprio gate, cioè deve essere $S(B) > S(A)$. Abbiamo visto però poche righe sopra che è sempre $S(A) \geq S(B)$, e la contraddizione dimostra che non è quindi possibile che si verifichi un conflitto.

Infine, se siamo nel caso 3 i due aeromobili, ad ogni iterazione, continuano a rimanere allineati e le loro distanze orizzontali non cambiano, l'unica cosa che cambia è il livello a cui si trovano. Quindi finché entrambi continuano a muoversi verso l'alto non si può generare conflitto e non cambiano le distanze orizzontali dei due aeromobili. Quindi, o i due aeromobili sono entrambi partiti già in linea col gate loro assegnato (e quindi banalmente non possono generare conflitto), oppure ad una certa iterazione almeno uno dei due aeromobili si muoverà lateralmente e possiamo ricondurci ad uno dei due casi precedenti (considerando il livello massimo raggiunto come il livello iniziale). \square

DIMOSTRAZIONE DELLA CONVERGENZA DELL'ALGORITMO:

Inizialmente tutti gli aeromobili sono allo stesso livello. Sia K_0 la distanza massima tra gli aeromobili discordi. Con la prima iterazione si muoveranno lateralmente tutti gli aeromobili concordi con distanza orizzontale maggiore o uguale a K_0 e verso l'alto tutti gli aeromobili discordi o concordi ma con distanza orizzontale minore di K_0 . All'iterazione successiva al livello massimo, il senso di marcia è opposto rispetto all'iterazione precedente, quindi gli aeromobili che erano discordi diventano concordi mentre gli aeromobili concordi che si sono mossi verso l'alto (quelli a distanza orizzontale minore di K_0) diventano discordi. Se chiamiamo K_1 il massimo tra i discordi (nel livello massimo che ora è 1) sarà ovviamente $K_1 < K_0$ (perché tutti i discordi hanno distanza orizzontale minore a K_0 , visti i movimenti nell'iterazione precedente). All'iterazione successiva, con lo stesso ragionamento, si potrà calcolare un $K_2 < K_1 < K_0$ (sotto l'ipotesi che esistano ancora aeromobili discordi) e tale ragionamento si potrà ripetere finché esistono aeromobili discordi e porterà a ridurre ad ogni iterazione il massimo, fino a raggiungere 0 (quando non saranno più presenti aeromobili discordi).

Si noti che alla prima iterazione dell'algoritmo potrebbe accadere che le distanze orizzontali di tutti gli aeromobili concordi siano minori di K_0 , ciò implica che tutti gli aeromobili si spostano verso l'alto. Alla iterazione successiva però, essendo cambiato il senso di marcia, esisterà sicuramente almeno un aeromobile concorde con distanza orizzontale maggiore o uguale al massimo dei discordi, sarà quindi possibile cominciare il procedimento descritto sopra, con l'unica condizione di aver "perso" un livello.

Dai ragionamenti descritti, risulta quindi evidente che per il buon esito dell'algoritmo sono sicuramente sufficienti $K_0 + 2$ livelli, K_0 perché ad ogni iterazione è sempre possibile ridurre (almeno di uno) la distanza orizzontale del massimo tra i discordi, mentre il 2 è dovuto a due diversi motivi: il primo è la possibile "perdita" di un livello se inizialmente tutti gli aeromobili concordi hanno distanza orizzontale minore della massima distanza orizzontale dei discordi; il secondo è dovuto al fatto che è necessario un livello in più a fine griglia per dare la possibilità ad un aeromobile che arrivi allineato con un gate diverso da quello che gli è stato assegnato, di spostarsi orizzontalmente fino al vero gate di destinazione. □

4. Un esempio

Per facilitare la comprensione dell'esempio sono state fissate alcune convenzioni iniziali: ogni aeromobile sarà rappresentato da un cerchio e sarà identificato da una lettera, indicante la posizione di partenza, e da un numero, indicante il gate di destinazione, così se un aeromobile posizionato inizialmente in A fosse stato assegnato al gate 3, esso verrà individuato con la sigla A3. Inoltre ogni cerchio sarà colorato di rosso per indicare che l'aeromobile è concorde, di blu per indicare che è discorde o di verde se è in linea col gate assegnatogli.

Le direzioni di marcia dei vari livelli sono rappresentate tramite frecce uscenti dalla griglia.

In questo esempio verrà presa in considerazione una griglia 9 x 9 con sei aeromobili.

Inizialmente gli aeromobili si trovano nelle posizioni illustrate in fig.1.

Ci sono solo due aeromobili discordi, E1 ed I2. Il primo ha distanza 4 e il secondo ha distanza 7, sarà quindi $K_0 = 7$. Gli aeromobili concordi sono 4: A5, B7, C4 ed F9, con distanze rispettivamente: 4, 5, 1, 3, tutte strettamente minori di K_0 , ciò implica che alla prima iterazione tutti gli aeromobili si muoveranno verso l'alto, come mostrato in fig.2.

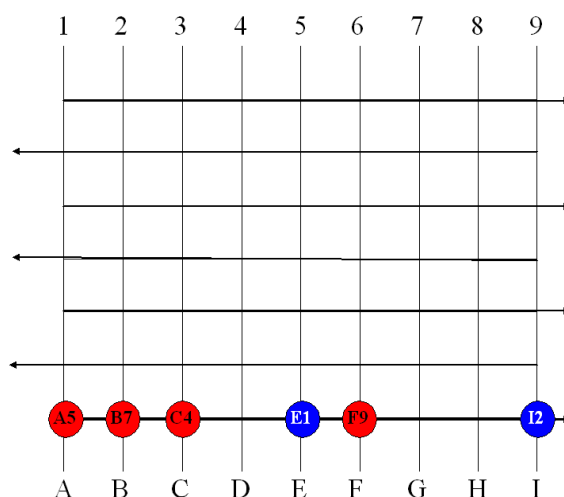


Fig. 1

Salendo di un livello gli aeromobili concordi sono diventati discordi e viceversa. Ora quindi gli aeromobili discordi sono 4 e, poiché le distanze sono rimaste inalterate, $K_1 = 5$. Tra i due aeromobili concordi si ha che E1

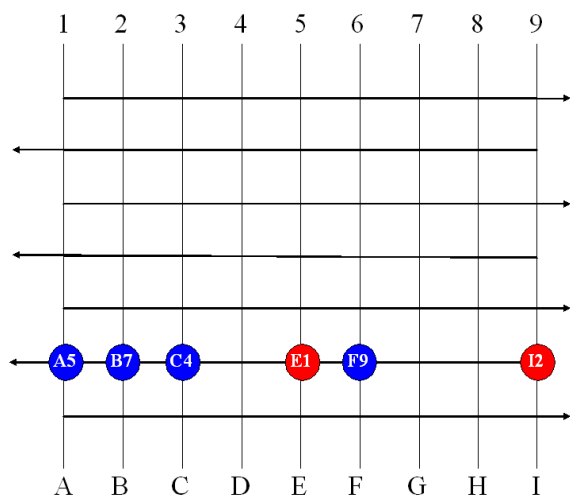


Fig. 2

ha distanza 4, inferiore a K_1 e quindi si muoverà verso l'alto e I2 ha distanza 7, maggiore di K_1 , che quindi si sposterà lateralmente. Le nuove posizioni sono illustrate nella fig. 3.

A livello massimo c'è solo un aeromobile discorde, E1, con distanza 4, quindi sarà: $K_2 = 4$. Gli aeromobili concordi sono 4: A5, B7, C4 ed F9, con distanze rispettivamente: 4, 5, 1, 3; quindi i primi due si sposteranno lateralmente mentre i rimanenti due si muoveranno verso l'alto.

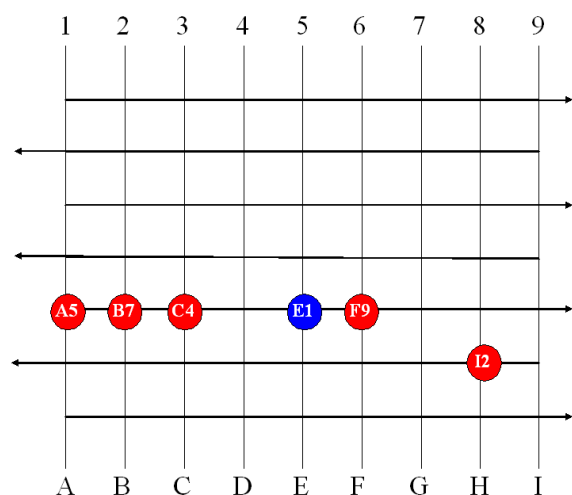


Fig. 3

Infine a livelli sottostanti rispetto al massimo si trova I2, che non essendo in linea col proprio gate si sposterà lateralmente.

Le nuove posizioni sono visibili in fig. 4

Al livello massimo si trovano due aeromobili discordi e quello con distanza massima è F9, a distanza 3, quindi $K_3 = 3$. l'unico aeromobile concorde è E1 che ha distanza 4, e quindi si sposterà lateralmente. Sui livelli inferiori nessun velivolo è in linea col proprio gate e quindi tutti si muoveranno orizzontalmente.

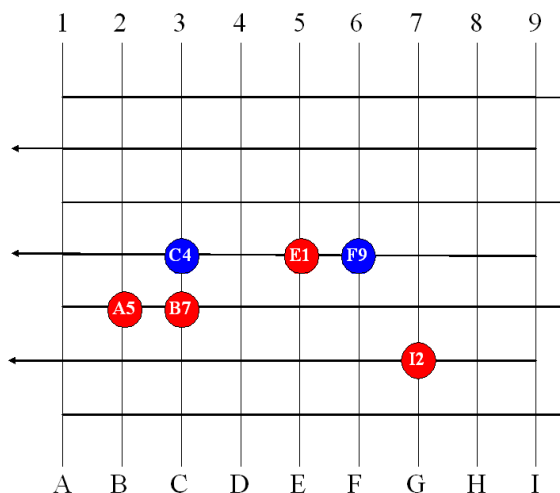


Fig. 4

Le nuove posizioni sono mostrate in fig. 5

Tutti gli aeromobili sono concordi quindi $K_4 = 0$, di conseguenza tutti gli aeromobili, non essendo in linea col gate assegnato loro, si muoveranno lateralmente e continueranno a farlo fino a al raggiungimento di tale posizione, per poi spostarsi verso l'alto. Questi movimenti sono illustrati nelle figure successive.

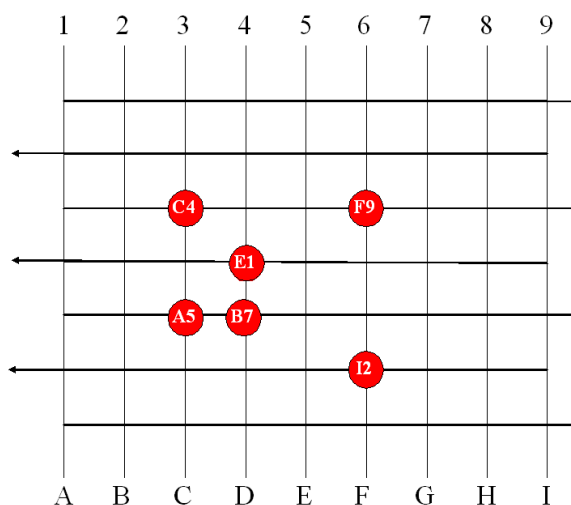


Fig. 5

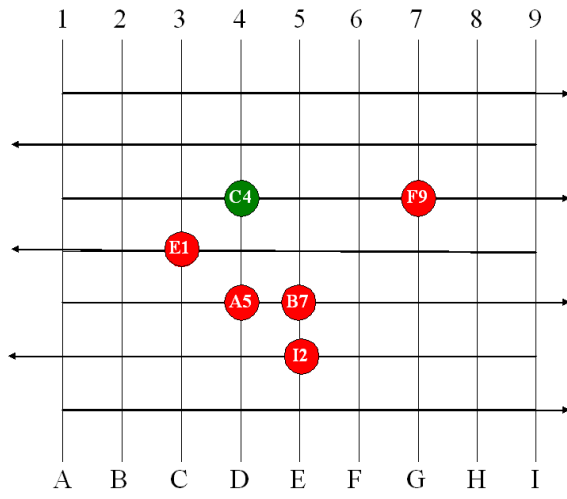


Fig. 6

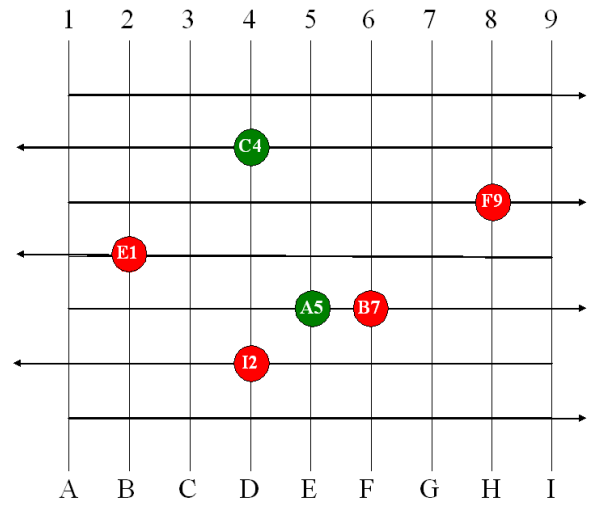


Fig. 7

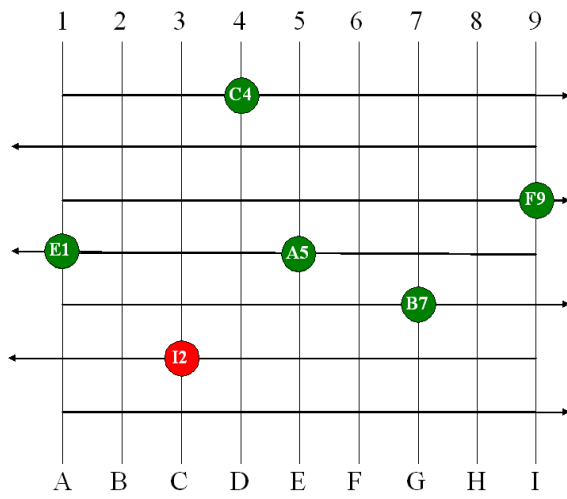


Fig. 8

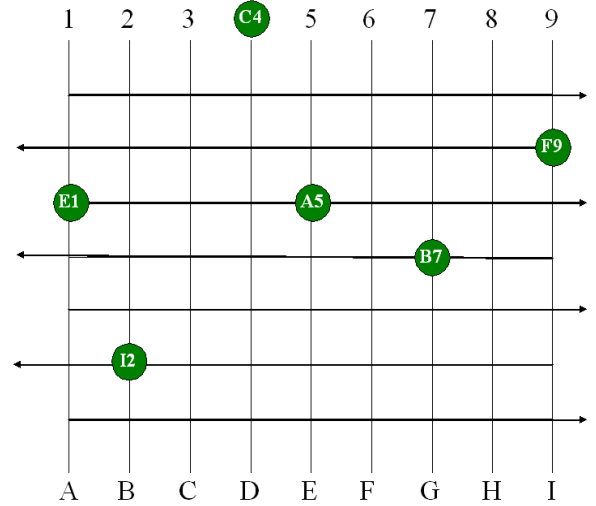


Fig. 9

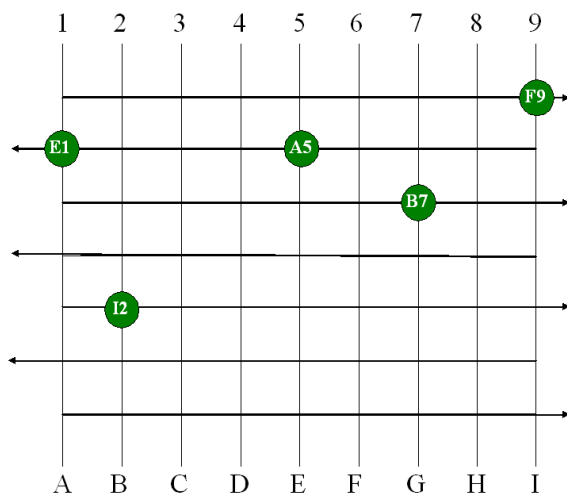


Fig. 10

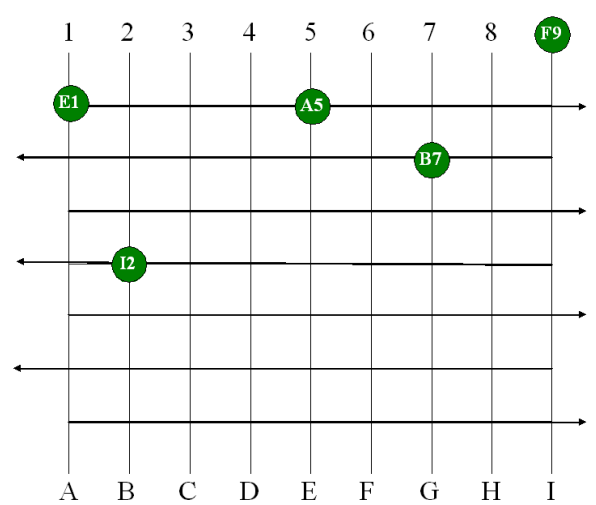


Fig. 11

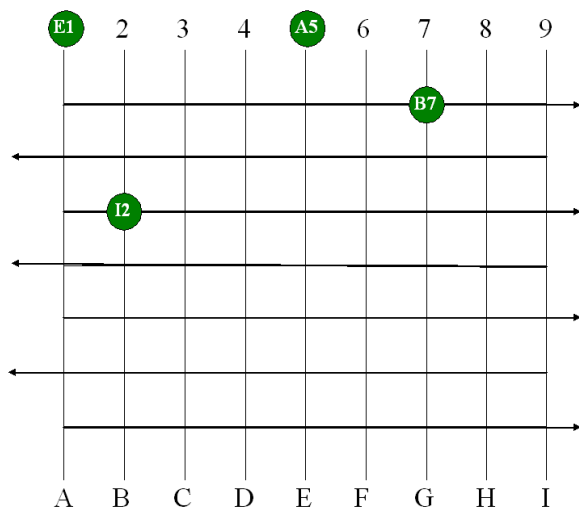


Fig. 12

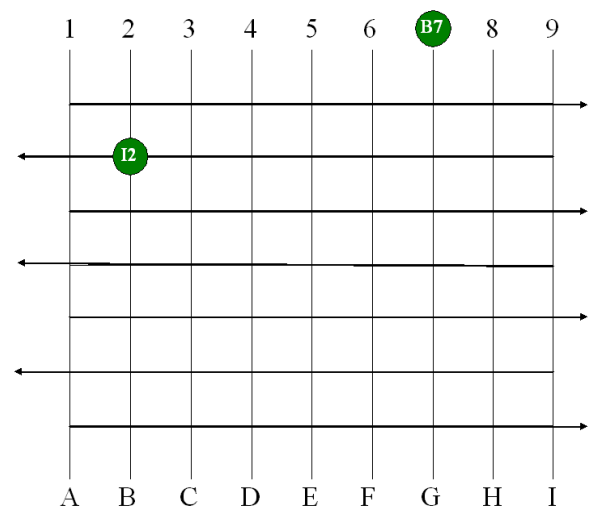


Fig. 13

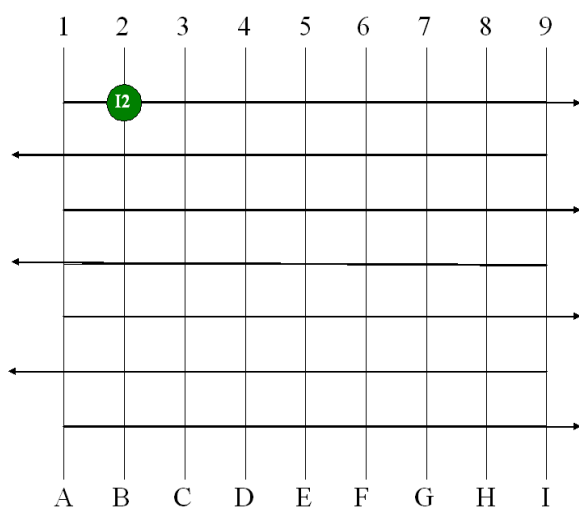


Fig. 14

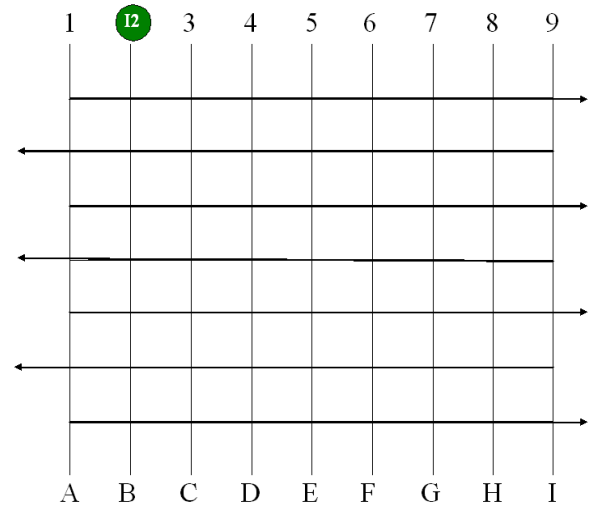


Fig. 15

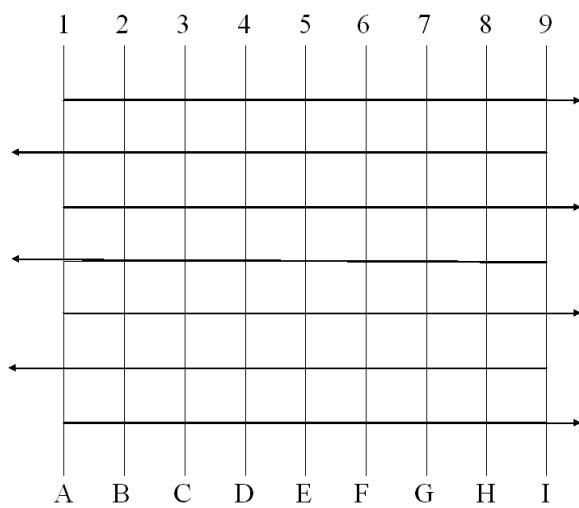


Fig. 16

CONCLUSIONE:

In questo lavoro si è affrontato il problema dell'instradamento di aeromobili a terra tramite trattori a guida automatica.

Nella prima parte si è presentato l'apron, cioè l'ambiente in cui questi trattori si muovono, descrivendone attori, entità e servizi.

Nella seconda parte si è entrati nel cuore del problema presentando un lavoro di quattro ricercatori dell'Università di Matematica di Berlino, ma soprattutto elaborando un nuovo algoritmo per affrontare un caso semplificato del problema in questione.

Il numero e il tipo di vincoli assunti nella costruzione dell'algoritmo lo rendono di difficile applicabilità ai casi reali ma credo possa essere una base solida per eventuali sviluppi maggiormente aderenti al problema reale (ad esempio eliminando il vincolo per cui tutti gli aeromobili devono partire contemporaneamente e dallo stesso livello).

Spero che questo lavoro risulti abbastanza chiaro ed esauritivo anche a chi, non avendo mai affrontato prima questo tipo di problemi, è privo di solide basi sull'apron aeroportuale o sul Vehicle Routing Problem.

BIBLIOGRAFIA:

- Norman Ashford, H. P. Martin Stanton, Clifton A. Moore “Airport Operations” Pitman Publishing (London), 1984
- IATA⁹, “Airport Development Reference Manual”, 2004
- Alexander T. Wells, “Airport Planning & Management”

RIFERIMENTI WEB:

- <http://www.ditra.unipa.it/Didattica/Materiale%20didattico/Trasporti%20Aerei/A.A.%202006-2007/6.INFRASTRUTTURE%20AEROPORTUALI/Gestione%20aeroportuale%20e%20mezzi%20di%20terra.pdf>
- http://www.uniroma2.it/didattica/te_ec_tra/deposito/05_aeroporti.pdf
- http://www.aero.polimi.it/IT/index.php?module=pagemaster&PAGE_user_op=view_page&PAGE_id=17&MMN_position=66:66
- <ftp://ftp.math.tu-berlin.de/pub/Preprints/combi/Report-039-2007.pdf>

⁹ International Air Transport Association

RINGRAZIAMENTI:

Il Prof. Giovanni Andreatta per il tempo e le energie dedicatemi nello sviluppo di questo lavoro e per i caffè che mi ha offerto;

il Dott. Luigi De Giovanni per il tempo e le energie dedicatemi nello sviluppo di questo lavoro e per le correzioni all'elaborato finale;

la Prof. Biancamaria Faggian per le correzioni grammaticali a questo elaborato;

la Fam. Schiavon per avermi prestato il loro portatile;

la mia famiglia per il sostegno che mi ha offerto durante tutta la mia carriera universitaria;

i mie amici per essere miei amici.