

In memoria di mio padre.

A mia madre,

a tutti gli amici.

A tutti voi grazie.



Università di Pisa

Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

Sviluppo ed ottimizzazione delle logiche di gestione delle
ridondanze in un moderno Flight Control System Fly by Wire

Relatori:

Prof. Eugenio Denti

Prof. Roberto Galatolo

Laureando:

Stefano Orsucci

Corelatore:

Ing. Francesco Schettini

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

Indice

Elenco delle figure	IV
Elenco delle tabelle	VII
Nomenclatura.....	VIII
Elenco degli acronimi.....	IX
Sommario	10
Parte I Sistema implementato nel velivolo e costituente la versione di riferimento	12
Capitolo 1 Il sistema di controllo di tipo Fly-by-Wire.....	13
1. <i>Sottosistema Dati Aria (Air Data System).....</i>	<i>15</i>
1.1. Procedura di elaborazione DIA: algoritmo di calcolo.....	17
1.2. Algoritmo di gestione delle ridondanze.....	21
1.2.1. Algoritmo di monitoring angoli	23
1.2.2. Algoritmo di voting angoli.....	25
Capitolo 2 Risultati procedura di elaborazione DIA	27
Parte II Nuove metodologie per la gestione delle ridondanze	34
Capitolo 3 Procedura di gestione basata su logica di tipo tradizionale.....	35
1. <i>Procedura per la riduzione delle stime elaborate</i>	<i>35</i>
2. <i>Nuova procedura di gestione delle ridondanze</i>	<i>39</i>
2.1. Algoritmo di monitoring.....	40
2.2. Algoritmo di voting	41
2.3. Risultati.....	41

Capitolo 4 Procedura di gestione basata su reti neurali	45
1. <i>Le reti neurali</i>	45
2. <i>Problemi delle reti neurali</i>	46
2.1. Le basi dell'apprendimento	47
2.2. Il neurone formale.....	48
2.3. Reti multilivello.....	49
3. <i>Nuova procedura di gestione</i>	51
3.1. Algoritmo di voting	52
3.2. Risultati.....	55
Capitolo 5 Procedura di gestione basata su logica fuzzy.....	66
1. <i>Il principio fuzzy</i>	66
1.1. Il ragionamento incerto.....	68
1.2. Il ragionamento umano e quello fuzzy.....	69
1.3. Regole fuzzy	69
1.4. Logica fuzzy e paradossi	70
1.5. Logica fuzzy e probabilità	71
1.6. I sistemi fuzzy.....	73
1.7. I sistemi esperti e sistemi fuzzy	75
1.8. Modello neuro-fuzzy	77
2. <i>Nuova metodologia basata su logica fuzzy</i>	78
2.1. Descrizione della strategia di gestione.....	79
2.2. Implementazione della logica fuzzy	80
2.3. Risultati.....	84
Capitolo 6 Conclusioni.....	88
Appendice A Analisi componenti principali (PCA)	93
1. <i>Elementi d'analisi multivariata</i>	93
1.1. Funzioni di distribuzione e densità di probabilità	94
1.2. Valori attesi.....	96
2. <i>Analisi delle componenti principali (PCA)</i>	99
2.1. Derivazione matematica	100
2.2. Proprietà della PCA	105
2.3. Standardizzazione delle variabili	107
2.4. Il cerchio delle correlazioni	108

2.5. Interpretazione	108
Appendice B Confronto fra le procedure di consolidamento.....	110
Appendice C Supporto digitale contenente la parte software sviluppata.....	119
Bibliografia.....	120
Ringraziamenti	121

Elenco delle figure

<i>Figura 1: schema di un moderno FCS</i>	14
<i>Figura 2: velivolo di riferimento</i>	16
<i>Figura 3: (a) installazione delle sonde sulla fusoliera; (b) condizioni di flusso locale e misure delle sonde</i>	16
<i>Figura 4: dati di ingresso ed uscita della procedura</i>	17
<i>Figura 5: struttura della procedura di elaborazione DIA</i>	18
<i>Figura 6: struttura delle reti neurali per la ricostruzione del numero dei Mach (sopra) e della pressione statica (sotto)</i>	21
<i>Figura 7: relazioni tra modi operativi e possibili avarie</i>	23
<i>Figura 8: schema di monitoraggio con (destra) e senza (sinistra) la presenza di una failure</i>	24
<i>Figura 9: database utilizzato, (in nero) punti random all'interno del volume dell'involuppo, (in rosso) la griglia equispaziata che contiene anche il contorno</i>	27
<i>Figura 10: dispersione dell'errore considerando i sei segnali stimati</i>	28
<i>Figura 11: errore sugli angoli consolidati dalla procedura in assenza di failure</i>	29
<i>Figura 12: errore sugli angoli consolidati della procedura nel caso la sonda_1 sia in avaria</i>	30
<i>Figura 13: errore sugli angoli consolidati della procedura nel caso la sonda_2 sia in avaria</i>	31
<i>Figura 14: errore sugli angoli consolidati della procedura nel caso la sonda_3 sia in avaria</i>	31
<i>Figura 15: errore sugli angoli consolidati della procedura nel caso la sonda_4 sia in avaria</i>	32
<i>Figura 16: analisi dello stato del sistema in caso di avarie</i>	33
<i>Figura 17: procedura di pre-monitoring</i>	36
<i>Figura 18: identificazione dei blocchi del processo di riduzione delle stime</i>	37
<i>Figura 19: distribuzione dell'errore</i>	37
<i>Figura 20: distribuzione dell'errore sui dodici segnali con simulazione di una avaria alla sonda_1</i>	38
<i>Figura 21: distribuzione dell'errore sugli otto segnali con simulazione di una avaria alla sonda_1</i>	39
<i>Figura 22: schema generale della procedura</i>	40



Figura 23: nuovo schema di monitoraggio	40
Figura 24: errore su gli angoli votati dalla procedura senza la presenza di failure	42
Figura 25 errore su gli angoli votati dalla procedura con la presenza di una failure sulla sonda_1	42
Figura 26 errore su gli angoli votati dalla procedura con la presenza di una failure sulla sonda_2	43
Figura 27 errore su gli angoli votati dalla procedura con la presenza di una failure sulla sonda_3	43
Figura 28: errore su gli angoli votati dalla procedura con la presenza di una failure sulla sonda_4	44
Figura 29: modello di un neurone artificiale	49
Figura 30: schema generale di una rete neurale.....	49
Figura 31: le due fasi dell' algoritmo di Backpropagation.....	50
Figura 32: schema generale con una sola rete neurale	51
Figura 33: schema generale con due reti neurali	51
Figura 34: schema generale con una rete neurale per ogni condizione di avaria	52
Figura 35: struttura della rete#1.....	54
Figura 36: struttura delle rete#2.....	54
Figura 37: struttura della rete#3.....	55
Figura 38: errore sul TS della rete#1.....	56
Figura 39: errore sul TS della rete#2.....	56
Figura 40: errore sul TS dalle rete#3.....	57
Figura 41: errore della rete#1	57
Figura 42: errore della rete#2	58
Figura 43: errore della rete#3	58
Figura 44: errore sul TS delle rete#2 (architettura con due reti)	59
Figura 45: errore delle rete#2 (architettura con due reti).....	59
Figura 46: errore sul TS della rete#1 con avaria alla sonda_1	60
Figura 47: errore della rete#1 con avaria alla sonda_1.....	60
Figura 48: errore sul TS della rete#1 con avaria alla sonda_2.....	61
Figura 49: errore della rete#1 con avaria alla sonda_2	61
Figura 50: errore sul TS della rete#1 con avaria alla sonda_3.....	62
Figura 51: errore della rete#1 con avaria alla sonda_3.....	62
Figura 52: errore sul TS della rete#1 con avaria alla sonda_4.....	63
Figura 53: errore della rete#1 con avaria alla sonda_4.....	63
Figura 54: errore sul TS della rete#2 con avaria alla sonda_1	64
Figura 55: errore delle rete#2 con avaria alla sonda_1	64



<i>Figura 56: errore sul TS della rete#3 con avaria alla sonda_1</i>	<i>65</i>
<i>Figura 57: errore della rete#3 con avaria alla sonda_1</i>	<i>65</i>
<i>Figura 58: funzioni di membership scelte per l'input</i>	<i>81</i>
<i>Figura 59: funzioni di membership scelte per l'output</i>	<i>81</i>
<i>Figura 60: struttura del sistema fuzzy</i>	<i>82</i>
<i>Figura 61: errore della procedura fuzzy</i>	<i>85</i>
<i>Figura 62: errore della procedura fuzzy con la sonda_1 in avaria</i>	<i>85</i>
<i>Figura 63: errore delle procedura fuzzy con la sonda_2 in avaria.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 64: errore della procedura fuzzy con la sonda_3 in avaria</i>	<i>86</i>
<i>Figura 65: errore della procedura fuzzy con la sonda_4 in avaria</i>	<i>87</i>
<i>Figura 66: confronto della metodologie sviluppate in assenza di avaria</i>	<i>89</i>
<i>Figura 67: confronto tra i valori consolidati dalla procedura di elaborazione DIA in presenza di avarie.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 68: confronto tra i valori consolidati dalla procedura con riduzione delle stime in presenza di avarie.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 69: confronto tra i valori consolidati dalla procedura basata su logica fuzzy in presenza di avarie.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 70: andamento dei parametri di addestramento della rete#1 in assenza di avarie</i>	<i>114</i>
<i>Figura 71: andamento dei parametri di addestramento della rete#2 in assenza di avarie</i>	<i>114</i>
<i>Figura 72: andamento dei parametri di addestramento della rete#3 in assenza di avarie.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 73: andamento dei parametri di addestramento della rete#1 con avaria alla sonda_1 ...</i>	<i>115</i>
<i>Figura 74: andamento dei parametri di addestramento della rete#1 con avaria alla sonda_2 ...</i>	<i>116</i>
<i>Figura 75: andamento dei parametri di addestramento della rete#1 con avaria alla sonda_3 ...</i>	<i>116</i>
<i>Figura 76 andamento dei parametri di addestramento della rete#1 con avaria alla sonda_4</i>	<i>117</i>
<i>Figura 77: andamento dei parametri di addestramento della rete#2 con avaria alla sonda_1 ...</i>	<i>117</i>
<i>Figura 78: andamento dei parametri di addestramento della rete#3 con avaria alla sonda_1 ...</i>	<i>118</i>



Elenco delle tabelle

<i>Tabella 1: identificazione gruppi.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 2: inviluppo di volo del velivolo</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 3: identificazione blocchi</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 4: caratteristiche e parametri delle reti neurali.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 5: caratteristiche del sistema fuzzy.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabella 6: percentuali sulla disposizione dell'errore.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 7:percentuali sulla disposizione dell'errore delle procedura con riduzione delle stime con la presenza di una avaria</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 8:percentuali sulla disposizione dell'errore della metodologia basata sulla rete neurale #1 in presenza di avarie con l'architettura a 5 reti.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 9: percentuali sulla disposizione dell'errore della metodologia basata sulla rete neurale #2 e #3 in presenza di avaria alla sonda_1 con architettura a 5 reti.....</i>	<i>91</i>

Nomenclatura

P_{sa}	pressione statica ambiente
P_t	pressione totale
M_∞	numero di Mach di volo asintotico
α	angolo di incidenza
β	angolo di derapata
P_{Li}	pressione locale sulla sonda i-esima
M_{Li}	numero di Mach locale sulla sonda i-esima
$P_{front\ i}$	pressione frontale misurata dalla sonda i-esima
$P_{slot\ i}$	pressione laterale misurata dalla sonda i-esima
f_{Li}, g_{Li}	funzioni di legame tra i parametri ottenute mediante le prove in galleria
<i>Config</i>	parametro di configurazione del velivolo
f_{front}, f_{slot}	funzioni di legame tra i parametri della sonda isolata
γ	costante isoentropica del flusso
Cp_{front}, Cp_{slot}	coefficiente di pressione delle prese frontali e laterali
α_{vot}	angolo di incidenza consolidato
β_{vot}	angolo di derapata consolidato
δ_{LE}, δ_{TE}	funzioni di correzione per gli effetti della configurazione
$\underline{\Omega} = (P, Q, R)$	velocità angolare del velivolo



Elenco degli acronimi

FBW	Fly-By-Wire
FCS	Flight Control System
FCC	Flight Control Computer
ADS	Air Data System
DIA	Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale
NN	Neural Network
TS	Training Set
Cog	Center of Gravity
Mon	Medium of Maxima
FBF	Funzioni base fuzzy

Sommario

I sistemi di controllo (Flight Control System, FCS) completamente automatici di tipo Fly by Wire sono molto sofisticati in quanto i requisiti di sicurezza impongono l'adozione di architetture a molteplice ridondanza la cui gestione è complessa.

Un sottosistema del FCS è quello dei dati aria che permette di determinare i parametri di volo quali quota, numero di Mach di volo e angoli di assetto mediante l'uso di misure, di flusso locale, fornite da opportuni sensori.

Nella presente tesi, prendendo come riferimento il sistema dati aria, di un velivolo ad elevate prestazioni di nuova generazione, oggetto di studio, da alcuni anni, presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziali di Pisa, si illustrano i modelli e metodi sviluppati, atti all'individuazione di possibili avarie e al consolidamento delle variabili di uscita, nell'ambito della gestione dei dati sulla ricostruzione degli angoli di assetto. Per lo sviluppo di tali modelli sono state sviluppate architetture basate su logiche di tipo tradizionale, reti neurali e fuzzy logic.