

In memoria di mio padre Dino

In memoria dei miei nonni

A chi mi vuole bene

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

Progetto SCAUT
Messa a punto del Flight Management
System



Relatori:
Prof. Carlo Casarosa

Laureando:
Francesco PAVONE

Prof. Giovanni Mengali

Prof. Roberto Galatolo

Ing. Renzo D'Amato

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

Sommario

La presente tesi si inserisce nell'attività di ricerca denominata "Progetto SCAUT" (*Sistema di Controllo AUTomatico del Territorio*) che il DIA (*Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale*) dell'Università degli Studi di Pisa ha intrapreso allo scopo di valutare la fattibilità di un sistema di controllo automatico del territorio atto ad operare in scenari civili e basato sull'impiego di velivoli non abitati UAV (*Uninhabited Aerial Vehicle*).

In particolar modo la tesi si occupa dello sviluppo e messa a punto del FMS (*Flight Management System*) del modello in scala del UAV-SCAUT sito presso il Laboratorio di Meccanica del Volo del DIA: si espongono l'analisi e la sintesi del sistema di autopilotaggio e se ne verifica la risposta in ciclo chiuso sulle periferiche del banco prova utilizzato per la simulazione del volo in tempo reale.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. C. Casarosa per l'aiuto e la disponibilità mostrata durante tutto il mio periodo di permanenza presso il Laboratorio di Meccanica del Volo.

Inoltre il Prof. G. Mengali ed il Prof. R. Galatolo, sempre preziosi nei suggerimenti e gentili nei miei confronti.

Un pensiero speciale va all'Ing. R. D'Amato col quale ho condiviso non solo innumerevoli ore di simulazione ma anche piacevolissime conversazioni, più o meno lunghe pause e più o meno frugali pasti; non posso che augurargli di portare a termine il lavoro che lo attende e sono certo che a breve otterrà i risultati che tutti auspichiamo: gli sono debitore per ciò che ha fatto per me. Poi gli altri membri del Laboratorio, l'oramai "rampante" Alessio e gli "ignari" Marco, Antonio e Matteo cui ora spetta il compito di proseguire lo sviluppo: un caloroso "in bocca al lupo".

Ricordo gli innumerevoli compagni di studi, tra i quali in particolare Giangi, Marco ed Enrico coi quali ho condiviso attese frenetiche e gioie liberatorie.

Un grazie di cuore va ai miei amici di sempre: Alessandro (2), Michele, Paolo, Riccardo, Roberto e Simone che mi sopportano da tempo immemore e che ora, venendo alla mia laurea, penseranno si tratti di uno scherzo.

Ringrazio chi mi ha capito in questi anni e anche coloro che per tanti motivi non hanno potuto comprendermi: so di averli fatti soffrire a causa delle mie decisioni in apparenza difficili da spiegare.

A volte vorrei poter tornare indietro ed aggiustare le cose.

Infine, i miei genitori e la mia famiglia: mi sono stati sempre vicini e questo non lo dimenticherò mai.

Non so se nel corso della vita potrò restituire loro ciò che mi hanno dato.

Indice

Sommario	I
Ringraziamenti	II
Elenco dei simboli	VI
I Il Banco Prova	1
1 Introduzione	2
1.1 Possibili campi di impiego dell'UAV	2
1.2 Il Progetto SCAUT	2
1.3 I contributi di questo lavoro	3
1.4 Organizzazione della tesi	4
2 Architettura del banco prova	5
2.1 Generalità	5
2.2 Struttura del banco prova	6
2.3 La simulazione in tempo reale	12
3 Il Simulatore	13
3.1 Generalità	13
3.2 Modifiche apportate al Simulatore	14
3.2.1 Distinzione tra il Simulatore del <i>rack</i> ed il Simulatore <i>Stand Alone</i>	14
3.2.2 Modifica del Blocco C.1: simulazione dell'apparato pro- pulsivo	18

3.2.3	Modifica del Blocco Aero.1: simulazione dell'aerodinamica longitudinale	24
3.2.4	Modifica del Blocco C.4.4: forze aerodinamiche in assi corpo	26
II	Autopiloti	27
4	Sintesi degli autopiloti	28
4.1	Aspetti generali	28
4.2	Autopiloti del piano longitudinale	30
4.2.1	Pitch Damper	31
4.2.2	Autothrottle	34
4.2.3	Analisi e sintesi dell'autopilota della IAS (<i>Indicated Air Speed</i>)	38
4.2.4	Analisi e sintesi dell'autopilota della velocità verticale V_z	51
4.2.5	Analisi e sintesi dell'autopilota della quota H	66
4.3	Autopiloti del piano latero-direzionale	79
4.3.1	Yaw Damper	80
4.3.2	Analisi e sintesi dell'autopilota dell'angolo di prua Ψ (<i>Heading</i>)	83
4.3.3	Analisi e sintesi dell'autopilota dell'angolo di rotta η (<i>Course</i>)	97
4.3.4	Analisi e sintesi dell'autopilota del <i>Circling</i>	111
4.3.5	Analisi e sintesi dell'autopilota di navigazione verso un WP (<i>WayPoint</i>)	131
4.3.6	Analisi e sintesi dell'autopilota di navigazione VOR (<i>VHF Omnidirectional Range</i>)	150
5	Il FMS (<i>Flight Management System</i>)	159
5.1	Generalità	159
5.2	Modifiche apportate al FMS	163
5.2.1	Sottosistema Air Data System	163
5.2.2	Sottosistema Navigazione	164
5.2.3	Sottosistema Autopilota	165

6	Verifica dei risultati sul banco prova	204
6.1	Introduzione	204
6.2	Salita in quota	205
6.3	Navigazione per <i>waypoints</i>	208
6.4	Manovra di <i>circling</i>	211
6.5	Navigazione VOR	215
6.6	Prova autopilota IAS	218
6.7	Prova autopiloti <i>heading</i> e <i>course</i>	220
7	Conclusioni e sviluppi futuri	227
7.1	Conclusioni	227
7.2	Sviluppi futuri	229
III	Appendici	231
A	Manuale di utilizzo	232
A.1	Autopilota della quota	232
A.2	Autopilota di navigazione WP	232
A.3	Autopilota di navigazione VOR	233
A.4	Autopilota della IAS	234
A.5	Autopilota del <i>circling</i>	235
A.6	Autopiloti <i>heading</i> e <i>course</i>	235
B	Blocchi Simulink	237
	Bibliografia	246
	Elenco delle figure	248
	Elenco delle tabelle	257
	Elenco degli acronimi	258

Elenco dei Simboli

T	Trazione dell'elica
C_T	Coefficiente di trazione
C_{T_0}	Coefficiente di trazione a punto fisso
P	Potenza dell'elica
P_{max}	Potenza massima del motore
C_P	Coefficiente di potenza
C_{P_0}	Coefficiente di potenza a punto fisso
Q	Coppia dell'elica
C_Q	Coefficiente di coppia
ρ	Densità dell'aria
D	Diametro dell'elica
η	Rendimento dell'elica (Cap. 3)
J	Advance Ratio
V	Velocità di volo
RPM_{max}	Numero di giri al minuto massimo
RPM_{min}	Numero di giri al minuto minimo
δ_{th}	Posizione manetta

δ_e	Angolo di equilibratore
δ_a	Angolo di alettone
δ_r	Angolo di timone
<i>potquota</i>	Potenza in quota
<i>VARM</i>	Variazione di massa
α_{geom}	Angolo di incidenza geometrica
α_{geom_0}	Angolo di incidenza geometrica iniziale
$\Delta\alpha_{geom}$	Variazione angolo di incidenza geometrica
α_{aer}	Angolo di incidenza aerodinamica
α_{aer_0}	Angolo di incidenza aerodinamica iniziale
α_{wb}	Angolo di incidenza aerodinamica sistema ala - corpo
α_0	Angolo di portanza nulla del profilo alare
C_{L_α}	Pendenza curva di portanza
a_t	Pendenza curva di portanza coda
S	Superficie alare
S_t	Superficie piano di coda orizzontale
i_t	Angolo di calettamento coda orizzontale
ϵ_0	Angolo di downwash a portanza nulla
C_{m_α}	Rigidezza in beccheggio
C_{m_0}	Coefficiente di momento ad incidenza nulla
C_m	Coefficiente di momento
$C_{L_{trim_0}}$	Coefficiente di portanza di trim iniziale
$C_{L_{\delta_e}}$	Coefficiente aerodinamico di portanza da comando di equilibratore

$C_{m\delta_e}$	Coefficiente aerodinamico di momento da comando di equilibratore
\bar{c}	Corda media aerodinamica
h	Posizione del baricentro in percentuale di \bar{c}
h_n	Posizione del punto neutro in percentuale di \bar{c}
H	Quota di volo
α	Angolo di incidenza
γ	Angolo di pendenza della traiettoria
θ	Angolo di assetto
$\dot{\theta}$	Variazione temporale angolo di assetto
β	Angolo di derapata
ψ	Angolo di imbardata
η	Angolo di rotta
ϕ	Angolo di rollio
W	Peso del velivolo
CV	Condizione di volo
DP	Pressione dinamica
u	Velocità lungo l'asse longitudinale
q	Velocità angolare di beccheggio
p	Velocità angolare di rollio
r	Velocità angolare di imbardata
ω_{SP}	Pulsazione poli di corto periodo
ξ_{SP}	Smorzamento poli di corto periodo
ω_P	Pulsazione poli di lungo periodo

ξ_P	Smorzamento poli di lungo periodo
$1/T_{\theta_1}, 1/T_{\theta_2}$	Zeri della <i>f.d.t</i> q/δ_e
$1/T_{h_1}, 1/T_{h_2}, 1/T_{h_3}$	Zeri della <i>f.d.t</i> h/δ_e
ω_E	Pulsazione zeri complessi della rete di compensazione
$1/T_{E_1}, 1/T_{E_2}$	Zeri della rete di compensazione
$1/T_{E_3}$	Polo della rete di compensazione
$1/T_E$	Zero del controllore PD o PI
$1/T_{WO}$	Polo del <i>wash out</i>
N'_β	Rigidità in imbardata con apice
N'_r	Derivata aerodinamica con apice di momento di imbardata a seguito del disturbo r
Y_v	Derivata aerodinamica di forza laterale a seguito del disturbo v
K_q	Guadagno del <i>pitch damper</i>
K_r	Guadagno dello <i>yaw damper</i>
K_u	Guadagno dell' <i>autothrottle</i>
K_{IAS}	Guadagno dell'autopilota della IAS
K_{V_z}	Guadagno dell'autopilota della V_z
K_H	Guadagno dell'autopilota della H
K_ψ	Guadagno dell'autopilota della ψ
K_{η/δ_r}	Guadagno dell'autopilota della η
K_ϕ	Guadagno dell'autopilota del <i>circling</i>
K_{η/δ_a}	Guadagno degli autopiloti della navigazione
PM	Margine di fase
GM	Margine di guadagno

C_{D_0} Coefficiente di resistenza a portanza nulla

K Coefficiente di resistenza indotta

V_{MAX} Velocità massima

$V_{E_{max}}$ Velocità di efficienza massima

V_z Velocità verticale

$V_{z_{ref}}$ Velocità verticale di riferimento dell'autopilota

ϕ_{ref} Angolo di rollio di riferimento dell'autopilota

LAT Latitudine

LON Longitudine

α_{RILPO} Angolo di rilevamento polare AB

α_{RILPO_0} Angolo di rilevamento polare AB iniziale

γ_{RILPO} Angolo di rilevamento polare AC

γ_{RILPO_0} Angolo di rilevamento polare AC iniziale

δ Angolo di rilevamento polare della radiale

K_{corr} Coefficiente di correzione