

Table des matières

Avant-propos	iii
Notations	v
1 La robotique aérienne : un petit tour d’horizon	1
1.1 Introduction	1
1.2 Une brève histoire des drones	2
1.3 L’essor des drones dans le secteur civil	3
1.4 Les plateformes expérimentales	4
1.5 Les projets dits « open-source »	5
1.6 Les architectures d’estimation et de contrôle	7
2 Outils mathématiques	9
2.1 Introduction	9
2.2 Transformée de Laplace	10
2.2.1 Définition	10
2.2.2 Propriétés	12
2.2.3 Inversion	16
2.3 Systèmes non-linéaires	17
2.3.1 Forme de Brunovsky	17
2.3.2 Équations différentielles non-linéaires	19
2.3.3 Points d’équilibre, linéarisation	21
2.4 Systèmes linéaires et invariants	24
2.4.1 Représentation d’état	24
2.4.2 Intégration de l’équation d’état	27
2.4.3 Calcul de la matrice résolvante	27
2.4.4 Calcul de l’exponentielle d’une matrice	28
2.4.5 Fonction de transfert	32
2.4.6 Zéros de transmission	34
2.4.7 Commandabilité et observabilité, principe de dualité	36
2.5 Notions sur la réalisation des systèmes linéaires	38
2.5.1 Forme compagne de commande	38
2.5.2 Réalisation minimale, dimension d’un système	42
2.5.3 Méthode de Gilbert, réalisation sous forme modale	45

2.5.4	Schéma bloc de la forme modale et minimalité	48
2.6	Introduction à la mécanique analytique	50
2.6.1	Théorèmes de la quantité de mouvement et du moment cinétique	50
2.6.2	Relations cinématiques	50
2.6.3	Équations de Newton-Euler	52
2.6.4	Équations de Euler-Lagrange	53
2.6.5	Équations canoniques de Hamilton	54
2.7	Illustration : étude d'un bras simple de robot	55
2.7.1	Équations de Euler-Lagrange	55
2.7.2	Équations canoniques de Hamilton	57
2.7.3	Équations de la Mécanique classique	57
3	Application à la modélisation d'un mini-drone	59
3.1	Introduction	59
3.2	Relations cinématiques spécifiques aux mini-drones	59
3.2.1	Repère inertiel et repère local lié au mini-drone	59
3.2.2	Description de l'orientation du mini-drone	61
3.2.3	Quaternions	62
3.3	Obtention des équations du mouvement	65
3.3.1	Formalisme de Euler-Lagrange	65
3.3.2	Formalisme de Newton-Euler	68
3.3.3	Équivalence entre les deux formalismes	69
3.3.4	Prise en compte du vent	70
3.4	Forces généralisées : cas d'un drone avion	71
3.4.1	Commandes du drone avion	71
3.4.2	Trièdres avion et trièdre aérodynamique	72
3.4.3	Forces et moments	74
3.4.4	Dynamique de translation dans le trièdre aérodynamique	76
3.4.5	Vol à l'équilibre - trim	77
3.4.6	Découplage des équations du mouvement	78
3.5	Forces généralisées : cas d'un quadrirotor	80
3.5.1	Commandes du quadrirotor	80
3.5.2	Forces et moments	80
3.6	Modélisation des moteurs <i>brushless-DC</i>	85
4	Outils d'analyse d'un pilote automatique	87
4.1	Introduction	87
4.2	Analyse temporelle	88
4.2.1	Système du premier ordre	89
4.2.2	Système du second ordre	90
4.3	Analyse fréquentielle	90
4.3.1	Introduction	90
4.3.2	Lieu de Nyquist	91
4.3.3	Lieu de Bode	92
4.3.4	Le lieu de Black-Nichols	92

4.4	Stabilité des systèmes linéaires et invariants dans le temps (LTI)	92
4.4.1	Stabilité BIBO	93
4.4.2	Critère de Routh-Hurwitz	95
4.4.3	Stabilité interne	96
4.5	Analyse de la stabilité des systèmes bouclés	97
4.5.1	Intérêt du bouclage	97
4.5.2	Critère de Nyquist	99
4.5.3	Critère du revers	100
4.5.4	Marges de stabilité	101
4.5.5	Lieu des racines (lieu d'Evans)	103
5	Outils de conception d'un pilote automatique	111
5.1	Notions de loi de pilotage et de guidage	111
5.1.1	Notion de pôles dominants	111
5.1.2	Réduction de modèle	112
5.1.3	Liens entre réponse transitoire et pôles dominants	114
5.1.4	Critère <i>ITAE</i>	117
5.2	Correcteur PID	118
5.2.1	Présentation	118
5.2.2	Analyse qualitative	119
5.2.3	Synthèse à partir du lieu des racines	122
5.2.4	Intérêt de l'action intégrale	126
5.2.5	Structure <i>anti-windup</i>	128
5.3	Commande par retour d'état	131
5.3.1	Commande modale	132
5.3.2	Commande linéaire quadratique	136
5.3.3	Placement des pôles via le lieu des racines	137
5.3.4	Ajout d'un intégrateur	140
5.4	Précommande	142
5.4.1	Rôle	142
5.4.2	Cas où tous les zéros sont à partie réelle négative	143
5.4.3	Cas où au moins un zéro est à partie réelle positive	144
5.5	Démarche pour la synthèse	145
6	Exemples de mise en œuvre	149
6.1	Introduction	149
6.2	Application à un quadrirotor	149
6.2.1	Modèle de validation	149
6.2.2	Approximation aux petits angles	150
6.2.3	Modèle de synthèse	151
6.2.4	Hierarchie des boucles de contrôle	154
6.2.5	Spécifications des performances	154
6.2.6	Synthèse de régulateurs	155
6.2.7	Analyse des réglages	158
6.2.8	Synthèse avec intégrateur	159

6.2.9	Influence des retards de propagation	160
6.2.10	Introduction aux lois de navigation d'un mini-drone	162
6.2.11	Stratégie générale de contrôle d'un quadrirotor	165
6.3	Application à un drone planeur	166
6.3.1	Modèle de validation	166
6.3.2	Modèle de synthèse	167
6.3.3	Spécification des performances	167
6.3.4	Synthèse de régulateurs	167
6.3.5	Analyse des réglages	172
7	Identification et techniques de filtrage	175
7.1	Introduction	175
7.2	Mesures et filtrage fréquentiel	176
7.2.1	Introduction, la chaîne d'acquisition et de mesure	176
7.3	Identification paramétrique, la solution des moindres carrés	179
7.3.1	Exemple introductif	179
7.3.2	Solution de la régression par moindres carrés	180
7.3.3	Propriétés de l'estimateur des moindres carrés	182
7.3.4	Estimateur des moindres carrés, résumé	184
7.3.5	Valider le modèle obtenu	184
7.4	Identification de modèle dynamique	187
7.4.1	Collecte des mesures	188
7.4.2	Un modèle adapté au besoin	190
7.4.3	Un modèle en petites variations	191
7.4.4	Modèle dynamique discret	191
7.4.5	Modèle dynamique continu sous forme de régression linéaire	193
7.4.6	Identification de modèle continu par méthode <i>SVF</i>	195
7.4.7	Avantage des méthodes d'identification continue par rapport aux méthodes d'identification discrètes	200
7.5	Reconstitution d'état et fusion de données	201
7.5.1	Introduction à la fusion de données	201
7.5.2	Optique purement déterministe : les observateurs	201
7.5.3	Le contexte stochastique : quelques définitions	203
7.5.4	Le filtre de Kalman linéaire	207
7.5.5	Exemple illustratif	214
7.5.6	Pour aller plus loin : quelques critères d'optimisation	217
	Bibliographie	223
	Index	227