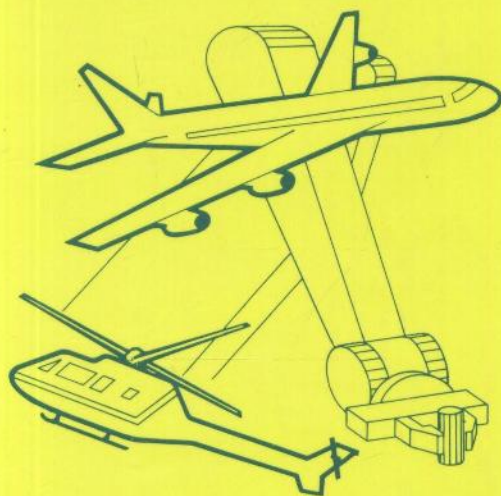


commande numérique des systèmes

applications aux engins mobiles et aux robots

Ouvrage collectif
publié sous la direction
de C. FARGEON



MASSON

Ouvrage publié sous l'égide de la D.R.E.T.
Direction des Recherches Études et Techniques
de la Délégation Générale pour l'Armement.

COMMANDE NUMÉRIQUE DES SYSTÈMES

*applications aux engins mobiles
et aux robots*

Ouvrage collectif publié sous la direction de C. FARGEON

Auteurs : C. CASTEL, J.-P. CHRÉTIEN, G. FAVIER, M. FLIESS,
A.J. FOSSARD, M. GAUVRIT, B. GIMONET, M. LABARRÈRE,
A. LIEGEOIS, J.-F. MAGNI, A. PIQUEREAU, C. REBOULET,
S. STEER, J.-L. TESTUD.

M030 1
1



MASSON

Paris New York Barcelone Milan Mexico São Paulo

1986

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	5
----------------------	---

PREMIÈRE PARTIE : COMMANDE NUMÉRIQUE DES SYSTÈMES LINÉAIRES MULTIVARIABLES

INTRODUCTION A LA COMMANDE (M. GAUVRIT)	19
--	----

CHAPITRE 1. — Représentation des signaux et systèmes (J.F. Magni)

1.1 — Introduction	26
1.2 — Représentation des signaux déterministes	26
1.2.1 — Rappels sur les signaux continus	28
1.2.2 — Rappels sur les signaux discrets	30
1.3 — Représentation des systèmes linéaires déterministes	40
1.3.1 — Représentation des systèmes sous forme continue ...	41
1.3.2 — Représentation des systèmes discrets	43
1.4 — Passage des signaux aléatoires dans les systèmes linéaires ...	49
1.4.1 — Signaux aléatoires continus	50
1.4.2 — Signaux aléatoires discrets	53
1.4.3 — Approximation d'un signal aléatoire continu par un signal aléatoire discret	54
1.5 — Conclusion	56
Bibliographie	57

CHAPITRE 2. — De la commande continue à la commande discrète

2.1 — Synthèse des lois continues	58
2.1.1 — Méthodes modales (J.-F. Magni)	59
2.1.2 — Méthodes optimales linéaires quadratiques (S. Steer)	68
2.1.3 — Commande des systèmes possédant des retards purs (G. Favier)	73
2.2 — Discrétisation des lois continues (J.-P. Chrétien)	78
2.2.1 — Équivalent discret d'un correcteur continu	79
2.2.2 — Les techniques de discrétisation	80
2.2.3 — Analyse en boucle fermée	85
2.3 — Conclusion	91
Bibliographie	91

CHAPITRE 3. — Correcteurs numériques des systèmes déterministes Approche polynomiale

3.1 — Introduction (C. Reboulet 3.1, 3.2 et 3.3)	93
3.2 — Correcteurs pour un critère à temps minimum	94
3.2.1 — Correcteurs stabilisants	94
3.2.2 — Synthèse des correcteurs discrets minimisant le temps de réponse	96
3.2.3 — Synthèse des correcteurs discrets minimisant un critère quadratique	108
3.2.4 — Synthèse des correcteurs pour les systèmes multivariables	109
3.3 — Correcteurs à placement de poles	112
3.3.1 — Problème d'asservissement sans perturbation	113
3.3.2 — Cas particulier où le correcteur compense tous les zéros du processus	118
3.4 — Lois de commande fondées sur la minimisation d'un critère quadratique à un pas (G. Favier)	119
3.4.1 — Prédicteur optimal à k pas	120
3.4.2 — Loi de commande à variance de sortie minimale	122
3.4.3 — Loi de commande à variance de sortie généralisée minimale	125
3.4.4 — Application numérique	130
3.5 — Conclusion	133
Bibliographie	133

CHAPITRE 4. — Principes de la commande par modèle interne (J.-L. Testud)

4.1 — Introduction — Définitions	134
4.2 — Passage de la régulation classique à la commande par modèle interne (C.M.I.)	135
4.2.1 — Principe	135
4.2.2 — Propriétés	137
4.2.3 — Choix de la loi de commande : calcul de $D(z)$	141
4.2.4 — Conséquences	142
4.3 — Principes de la commande par modèle interne	142
4.3.1 — Modèle interne	142
4.3.2 — Trajectoire de référence	144
4.3.3 — Algorithme de commande	146
4.3.4 — Stabilité — Robustesse	147
4.4 — Exemple de mise en œuvre dans le cas d'un système décrit par ses équations d'état	148
4.4.1 — Définition du problème de commande	148
4.4.2 — Stratégie de commande	149
4.4.3 — Matrice de transfert du système de commande	151
4.4.4 — Étude de la convergence	153
4.4.5 — Étude des performances dynamiques	154
4.5 — Conclusion	156
Bibliographie	156

CHAPITRE 5. — Commande optimale discrète des systèmes stochastiques linéaires

5.1 — Introduction (C. Reboulet 5.1 et 5.2)	158
5.2 — Commande optimale par les techniques de l'algèbre polynomiale	159
5.2.1 — Cas mono-entrée mono-sortie	159
5.2.2 — Cas multivariable	176
5.2.3 — Conclusion	187
5.3 — Approche par la modélisation vectorielle d'état (J.-P. Chrétien)	188
5.3.1 — Rappels des résultats de base de la commande optimale stochastique discrète	188
5.3.2 — Formulations particulières	193
5.3.3 — Exemple	196
5.4 — Comparaison des deux approches (C. Castel)	197
5.4.1 — Matrices rationnelles	198
5.4.2 — Matrices polynomiales	200
5.5 — Conclusion	203
Bibliographie	204

CHAPITRE 6. — Commande adaptative des systèmes stochastiques

6.1 — Introduction (M. Gauvrit 6.1 et 6.2)	205
6.2 — Classification des commandes auto-adaptatives	206
6.2.1 — La commande optimale stochastique auto-adaptative	206
6.2.2 — Définition des concepts	207
6.2.3 — Exemple illustratif	208
6.2.4 — Classification des commandes	211
6.3 — Introduction aux correcteurs auto-ajustables (G. Favier 6.3 à 6.5)	213
6.4 — Algorithme d'estimation des moindres carrés pondérés	216
6.4.1 — Estimateur des moindres carrés ordinaires (M.C.O.)	217
6.4.2 — Estimateur des M.C.P. récursifs	218
6.5 — Présentation de correcteurs auto-ajustables	224
6.5.1 — Stratégie de commande à variance de sortie minimale	224
6.5.2 — Stratégie de commande à variance de sortie généralisée minimale	227
6.5.3 — Exemple numérique	234
6.6 — Conclusion	236
Bibliographie	237

CHAPITRE 7. — Brefs aperçus des méthodes algébrique et géométrique en automatique non linéaire (M. Fliess)

7.1 — Introduction	240
7.2 — Espace d'état en temps continu	241
7.2.1 — Sur la notion de champs de vecteurs	241
7.2.2 — Crochets de Lie	241
7.2.3 — Commandabilité	242
7.3 — Séries génératrices	243
7.3.1 — Systèmes bilinéaires en temps discret	243

7.3.2 — Systèmes bilinéaires en temps continu	245
7.3.3 — Réalisation	246
7.4 — Compléments divers	246
Bibliographie sommaire	247

**DEUXIÈME PARTIE :
APPLICATIONS DE LA COMMANDE NUMÉRIQUE
AUX ENGIN ET ROBOTS**

CHAPITRE 8. — Commande numérique de systèmes en limite de stabilité : application à la stabilisation des satellites (J.-P. Chrétien)

8.1 — Introduction	251
8.2 — Stabilisation de satellites en rotation	252
8.2.1 — Présentation du problème	252
8.2.2 — Commande à court terme	253
8.2.3 — Commande à long terme	258
8.3 — Stabilisation trois axes d'un satellite muni d'appendices flexibles	259
8.3.1 — Présentation du problème	259
8.3.2 — Modèle dynamique du satellite	261
8.3.3 — Axes roulis (lacet)	262
8.3.4 — Axe tangage	265
Bibliographie	268

CHAPITRE 9. — Pilotage numérique d'un lanceur (A. Piquereau)

9.1 — Introduction	269
9.2 — Modélisation du système	270
9.2.1 — Notations	270
9.2.2 — Hypothèses	271
9.2.3 — Équations	271
9.2.4 — Représentation d'état	273
9.3 — Choix du critère et des matrices de covariance	274
9.3.1 — Critère d'optimisation	274
9.3.2 — Matrice de covariance	275
9.3.3 — Choix des paramètres	275
9.4 — Détermination de la commande — mise en œuvre	276
9.4.1 — Gains de commande	277
9.4.2 — Gains de Kalman	277
9.4.3 — Mise en œuvre	278
9.5 — Remarques	279
9.6 — Conclusion	279
Bibliographie	284

CHAPITRE 10. — Réduction de perturbations : Applications au confort passager à bord d'avion (M. Labarrère)

10.1 — Introduction	285
10.2 — Principe de l'antiturbulence pour l'amélioration du confort passager	286

10.3 — Modèle d'un avion rigide en atmosphère turbulente	288
10.4 — Détermination des lois de commande	291
10.5 — Structures de commande	292
10.6 — Mise en œuvre numérique de la commande	294
10.7 — Exemple d'application — Conclusion	295
Bibliographie	298

CHAPITRE 11. — Application de la commande par modèle interne au pilotage automatique d'un navire (J.L. Testud)

11.1 — Introduction	300
11.2 — Présentation générale	300
11.3 — Présentation du Pact	302
11.3.1 — Caractéristiques fonctionnelles du Pact	302
11.3.2 — Performances	316
11.3.3 — Évolutions et perspectives	318
Bibliographie	319

CHAPITRE 12. — Commande selon un modèle de référence : Application au découplage et à la maniabilité d'un hélicoptère (B. Gimonet)

12.1 — Introduction	320
12.2 — Description générale de l'hélicoptère	320
12.3 — Principe de la recherche de la loi de commande	321
12.3.1 — Théorie générale	321
12.3.2 — Optimisation paramétrique	322
12.4 — Choix du modèle de référence	323
12.4.1 — Norme de maniabilité	324
12.4.2 — Construction du modèle de référence	324
12.5 — Réglage de la loi de commande	326
12.6 — Résultats	330
12.6.1 — Résultats fréquentiels	330
12.6.2 — Résultats temporels	330
12.7 — Conclusion	336
Bibliographie	336

CHAPITRE 13. — Commande adaptative appliquée à la réduction des vibrations à bord d'hélicoptères (M. Gauvrit)

13.1 — Introduction	338
13.2 — Modélisation et position du problème	338
13.3 — Recherche de la commande optimale	340
13.4 — Estimation des paramètres de la matrice S	341
13.4.1 — Premier cas : les paramètres sont constants	341
13.4.2 — Deuxième cas : les paramètres sont variables	342
13.5 — Résultats expérimentaux	343
13.5.1 — Configuration à vitesse constante	343
13.5.2 — Configuration à vitesse variable	343
13.6 — Conclusion	347
Bibliographie	347

CHAPITRE 14. — Minimisation du coût d'exploitation d'un vol d'avion par optimisation de la trajectoire (A.J. Fossard)

14.1 — Introduction	349
14.2 — Critère et modèle mathématique	350
14.2.1 — Critère	350
14.2.2 — Modèle dynamique	351
14.2.3 — Contraintes	354
14.3 — Choix de la méthode d'optimisation	355
14.3.1 — Procédure séquentielle	355
14.3.2 — Procédure parallèle	355
14.4 — Méthode des perturbations singulières forcées	357
14.5 — Application au problème posé	360
14.5.1 — Solution réduite (phase de croisière)	361
14.5.2 — Solution dans la première couche initiale	363
14.5.3 — Solution dans la deuxième couche	367
14.5.4 — Synthèse de la trajectoire globale	367
14.6 — Conclusion	369
Bibliographie	369

CHAPITRE 15. — Interception en temps minimum à conditions finales imposées (A. Piquereau)

15.1 — Position du problème	371
15.2 — Équations d'optimalité	372
15.3 — Détermination de la commande optimale	374
15.4 — Détermination du point final	378
15.5 — Conclusion	379

CHAPITRE 16. — Techniques de commande de robots (A. Liegeois)

16.1 — Généralités	380
16.1.1 — Rappels	381
16.1.2 — Principales fonctions à assurer	389
16.2 — Utilisation des modèles cinématique et géométrique	391
16.2.1 — Génération de mouvements dans l'espace des configurations	392
16.2.2 — Génération de mouvements dans l'espace opérationnel	401
16.3 — Utilisation des modèles de la dynamique	409
16.3.1 — Les asservissements théoriques	409
16.3.2 — Approches de la commande dynamique dans l'espace opérationnel	413
16.3.3 — Conclusion sur la commande dynamique	415
16.4 — Commandes référencées à des capteurs	415
16.4.1 — Retour proximétrique	416
16.4.2 — Retour d'effort	418
16.4.3 — Contrôle hybride	419
16.5 — Conclusion	421
Bibliographie	422

ANNEXE : Propriétés des matrices polynomiales (C. Castel)

A.1 — Matrices polynomiales	425
A.1.1 — Définitions élémentaires sur les matrices	425
A.1.2 — Principales transformations	426
A.1.3 — Divisibilité	430
A.1.4 — Applications	434
A.2 — Problèmes d'inverses	436
A.2.1 — Inverse généralisée	436
A.2.2 — Inverses de matrices polynomiales	436
A.2.3 — Équation $M.D = Y$	437
A.3 — Factorisation spectrale	438
INDEX	439

PREMIERE PARTIE

COMMANDE MANÉGEABLE DES SYSTEMES LINEAIRES MULTIVARIABLES

SÉRIE AUTOMATIQUE

Y. FAËS

Commande des processus industriels par ordinateur

J. LEGRAS

Algorithmes et programmes d'optimisation non linéaire avec contraintes

K. NAJIM

Commande adaptative des processus industriels

A. OUSTALOUP

Systèmes asservis linéaires d'ordre fractionnaire

K. NAJIM-G. MURATET

Pratique de la régulation numérique des processus industriels

J.P. BABARY-W. PELCZEWSKI

Commande optimale des systèmes continus déterministes

M. BERNHEIM

Automatisation par modélisation de processus

sous la direction de

C. FARGEON

Commande numérique des systèmes

coordonnateur

I.D. LANDAU-L. DUGARD

Commande adaptative. Aspects pratiques et théoriques



9 782225 807848

ISBN : 2-225-80784-1