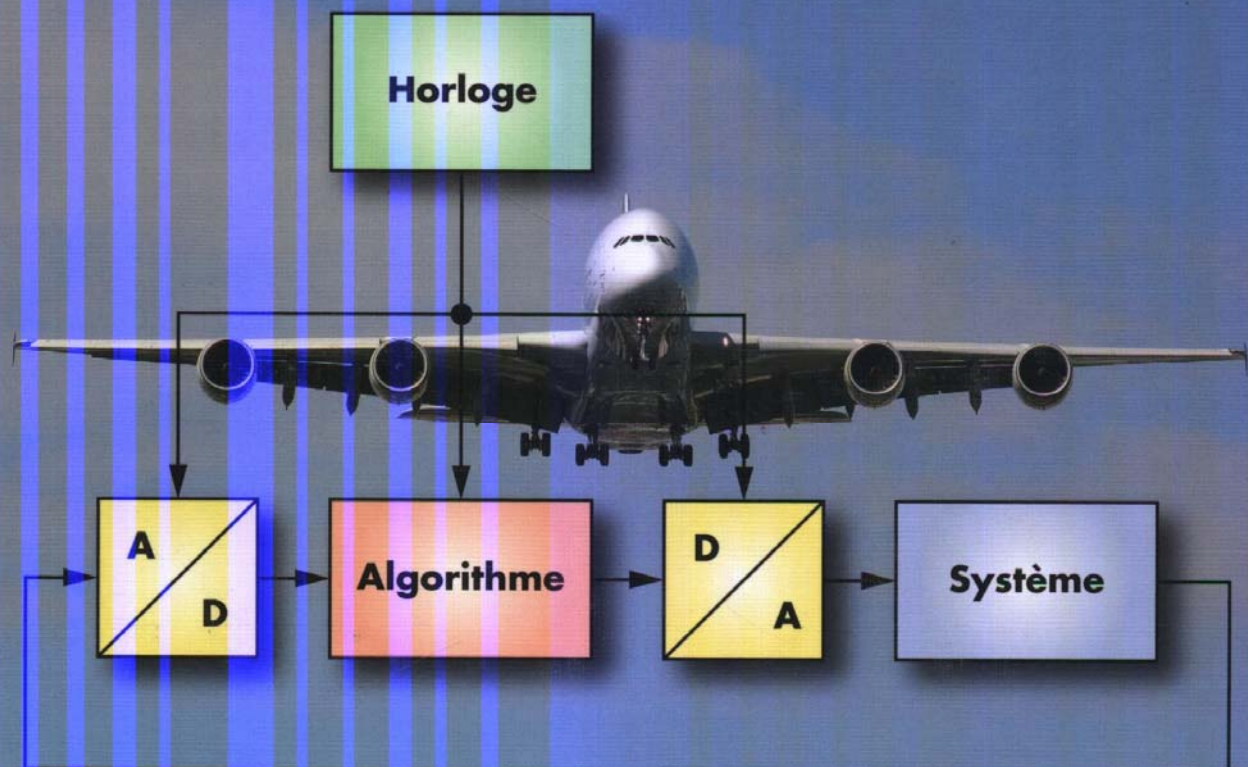


COMMANDE NUMÉRIQUE DE SYSTÈMES DYNAMIQUES

COURS D'AUTOMATIQUE

ROLAND LONGCHAMP

Deuxième édition
entièrement revue
et augmentée



PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Table des matières

Avant-propos	vii
PREMIÈRE PARTIE Outils de base	1
CHAPITRE 1 Introduction à la commande automatique	3
1.1 Introduction	3
1.2 Qu'est-ce l'automatique?	4
1.3 Approche systémique	12
1.4 Définitions	19
1.4.1 Montage en asservissement	19
1.4.2 Montage en régulation	20
1.4.3 Montage en asservissement et régulation	22
1.4.4 Analyse et synthèse des systèmes automatiques	23
1.5 Propriétés d'une architecture à rétroaction	30
1.5.1 Préambule	30
1.5.2 Stabilité	30
1.5.3 Précision en régime permanent	32
1.5.4 Robustesse	33
1.5.5 Amortissement du régime transitoire	34
1.5.6 Sensibilité	36
1.5.7 Bande passante	37
1.5.8 Complexité	40
1.6 Régulateur tout-ou-rien	40
1.6.1 Régulateur tout-ou-rien	40
1.6.2 Régulateur tout-ou-rien avec seuil	44
1.6.3 Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis	47
1.6.4 Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis	52
1.7 Régulateur proportionnel intégral dérivé	53
1.7.1 Régulateur proportionnel	53
1.7.2 Régulateur proportionnel intégral	56
1.7.3 Régulateur proportionnel dérivé	58
1.7.4 Régulateur proportionnel intégral dérivé	62
1.7.5 Synthèse des régulateurs P, PI et PID par les méthodes de Ziegler-Nichols	67
1.7.6 Synthèse des régulateurs PI, PD et PID par imposition d'un modèle à poursuivre	73
1.8 Rôles de l'ordinateur en automatique	76

1.9	Principes de la commande numérique	80
1.9.1	Aspects matériel et logiciel	80
1.9.2	Commentaires	82
1.9.3	Atouts et faiblesses de la commande numérique ..	84
1.10	Nécessité d'une théorie des systèmes échantillonnés	85
1.10.1	Imprécision de la numérisation	85
1.10.2	Potentiel numérique inexploité	90
1.10.3	Phénomènes inexpliqués	91
1.10.4	Systèmes intrinsèquement discrets	91
1.11	Problèmes	97
CHAPITRE 2	Echantillonnage et reconstruction	107
2.1	Introduction	107
2.2	Echantillonnage	108
2.3	Théorème de l'échantillonnage	111
2.4	Filtre de garde	115
2.5	Reconstruction	118
2.6	Choix de la période d'échantillonnage	120
2.7	Problèmes	121
CHAPITRE 3	Systèmes discrets	125
3.1	Introduction	125
3.2	Systèmes discrets au repos, linéaires, causals et stationnaires	126
3.2.1	Définitions	126
3.2.2	Produit de convolution	132
3.3	Systèmes représentés par des équations aux différences	137
3.4	Opérateurs avance et retard	141
3.5	Problèmes	142
CHAPITRE 4	Transformée en z	145
4.1	Introduction	145
4.2	Définitions	146
4.3	Propriétés de la transformée en z	149
4.3.1	Linéarité	149
4.3.2	Décalages temporels	151
4.3.3	Dérivation complexe	153
4.3.4	Changement d'échelle complexe	154
4.3.5	Valeurs initiale et finale	155
4.3.6	Produit de convolution	157
4.3.7	Accumulation	159
4.3.8	Différence	159
4.3.9	Grammaire et dictionnaire de la transformée en z	160

4.4	Calcul de la transformée en z inverse	163
4.4.1	Décomposition en éléments simples	163
4.4.2	Intégration dans le plan complexe	170
4.4.3	Inversion numérique	172
4.4.4	Nature temporelle des signaux discrets	174
4.5	Fonction de transfert	175
4.5.1	Fonction de transfert d'un système au repos, linéaire, causal et stationnaire	175
4.5.2	Fonction de transfert d'un système décrit par une équation aux différences	180
4.6	Problèmes	186
DEUXIÈME PARTIE Analyse et synthèse des systèmes automatiques		195
CHAPITRE 5	Fonction de transfert du système bouclé	197
5.1	Introduction	197
5.2	Echantillonnage du système à commander	198
5.2.1	Fonction de transfert échantillonnée du système à commander	198
5.2.2	Transformation des pôles par échantillonnage ..	203
5.3	Algorithme de commande	206
5.3.1	Modèle temporel	206
5.3.2	Fonction de transfert	209
5.3.3	Considérations pratiques	211
5.4	Fonctions de transfert du système bouclé	213
5.4.1	Montage en asservissement	213
5.4.2	Montage en régulation	215
5.4.3	Montage en asservissement et régulation	220
5.4.4	Cas général	221
5.5	Problèmes	224
CHAPITRE 6	Réponse harmonique	231
6.1	Introduction	231
6.2	Fonction de transfert harmonique	232
6.2.1	Définitions	232
6.2.2	Représentation de la fonction de transfert harmonique	238
6.3	Réponse harmonique en boucle ouverte	246
6.3.1	Echantillonnage à impulsions	246
6.3.2	Cas simplifié	249
6.3.3	Cas général	258
6.4	Problèmes	261
CHAPITRE 7	Stabilité	265
7.1	Introduction	265
7.2	Stabilité BIBO	266

7.3	Critères algébriques	270
7.3.1	Transformation bilinéaire	270
7.3.2	Critère de Jury	272
7.4	Critère de Nyquist	275
7.4.1	Préambule	275
7.4.2	Critère de Nyquist complet	279
7.4.3	Critère de Nyquist simplifié	288
7.5	Robustesse de la stabilité	291
7.6	Ecart permanent	300
7.6.1	Montage en asservissement	300
7.6.2	Montage en régulation	308
7.6.3	Montage en asservissement et régulation	313
7.7	Performance en régime harmonique	314
7.8	Problèmes	318
CHAPITRE 8	Numérisation	331
8.1	Introduction	331
8.2	Numérisation d'un régulateur analogique	334
8.2.1	Synthèse d'un régulateur analogique	334
8.2.2	Echantillonnage du régulateur analogique	334
8.2.3	Approximations numériques	336
8.2.4	Commentaires	343
8.3	Régulateur proportionnel intégral dérivé numérique ...	346
8.3.1	Forme position	346
8.3.2	Forme incrémentale	349
8.3.3	Forme à dérivation séparée	349
8.3.4	Forme non filtrée	349
8.3.5	Mesure anti-emballement de l'intégrateur	353
8.4	Problèmes	358
CHAPITRE 9	Synthèse directe	363
9.1	Introduction	363
9.2	Performance en régime permanent	364
9.3	Robustesse de la stabilité	365
9.4	Amortissement du régime transitoire	366
9.4.1	Préambule	366
9.4.2	Condition absolue d'amortissement	366
9.4.3	Condition relative d'amortissement	368
9.4.4	Conditions absolue et relative d'amortissement	371
9.4.5	Relation empirique entre marges et amortissement	371
9.4.6	Spécifications sur la réponse indicielle	372
9.5	Sensibilité	373
9.6	Fonction de transfert harmonique en boucle fermée	376
9.7	Synthèse du régulateur dans le lieu des pôles	381

9.7.1	Préambule	381
9.7.2	Définition et propriétés du lieu des pôles.....	383
9.7.3	Synthèse du régulateur proportionnel	398
9.7.4	Déformation du lieu des pôles et synthèse du régulateur proportionnel dérivé	399
9.7.5	Dipôle et synthèse du régulateur proportionnel intégral	404
9.7.6	Correcteur par avance-retard de phase et synthèse du régulateur proportionnel intégral dérivé	412
9.8	Synthèse du régulateur dans les diagrammes de Bode ..	416
9.8.1	Calibrage de la fonction de transfert en boucle ouverte.....	416
9.8.2	Synthèse du régulateur proportionnel	425
9.8.3	Correction par avance de phase et synthèse du régulateur proportionnel dérivé	426
9.8.4	Correction par retard de phase et synthèse du régulateur proportionnel intégral.....	432
9.8.5	Correction par avance-retard de phase et synthèse du régulateur proportionnel intégral dérivé	436
9.9	Prédicteur de Smith	441
9.10	Commande a priori	446
9.11	Problèmes	454

TROISIÈME PARTIE Méthodes avancées 471

CHAPITRE 10	Régulateur RST	473
10.1	Introduction	473
10.2	Définitions	474
10.3	Synthèse algébrique du régulateur RST	479
10.3.1	Principe de la synthèse.....	479
10.3.2	Imposition du modèle à poursuivre.....	482
10.3.3	Equation de Diophante.....	491
10.3.4	Existence et unicité d'un régulateur RST causal à degré minimal	498
10.3.5	Choix du modèle à poursuivre	503
10.3.6	Algorithmes de synthèse du régulateur RST	513
10.4	Commentaires	529
10.4.1	Influence d'un intégrateur	529
10.4.2	Amplitudes de la grandeur de commande.....	532
10.5	Variantes du régulateur RST	533
10.5.1	Mise en évidence de la commande a priori	533
10.5.2	Simplification de pôles et de zéros	535
10.5.3	Poursuite et régulation à objectifs différents.....	537
10.5.4	Synthèse par calibrage fréquentiel	539
10.6	Problèmes	541

CHAPITRE 11	Identification	545
11.1	Introduction	545
11.2	Régression linéaire	546
11.3	Application à l'identification des systèmes dynamiques	558
11.4	Méthode des moindres carrés	569
11.5	Méthode des moindres carrés pondérés	577
11.6	Méthode des moindres carrés récurrents	581
11.7	Méthode des moindres carrés pondérés récurrents	592
11.8	Problèmes	594
CHAPITRE 12	Commande adaptative	603
12.1	Introduction	603
12.2	Commande adaptative par imposition d'un modèle	604
12.2.1	Schéma indirect	604
12.2.2	Schéma direct	611
12.3	Auto-ajustement du régulateur	614
12.4	Régulateur à gains programmés	628
12.5	Problèmes	630
CHAPITRE 13	Commande floue	635
13.1	Introduction	635
13.2	Définitions	636
13.3	Caractéristiques d'un ensemble flou	644
13.4	Opérations sur les ensembles flous	646
13.5	Structure d'une commande floue	651
13.5.1	Préambule	651
13.5.2	Principes de la commande floue	655
13.5.3	Fuzzification	659
13.5.4	Inférence floue	661
13.5.5	Défuzzification	670
13.6	Analyse d'un régulateur flou	676
13.6.1	Préambule	676
13.6.2	Propriétés de la caractéristique entrée-sortie d'un régulateur flou	679
13.7	Commentaires	688
13.8	Problèmes	689
ANNEXE I	Compléments mathématiques	697
I.1	Critères de D'Alembert et de comparaison	697
I.2	Principe de l'argument	698
I.3	Transformation conforme	699
I.4	Théorème sur le rang du produit de deux matrices	702
ANNEXE II	Commande analogique	703
II.1	Introduction	703

II.2	Systèmes analogiques	704
II.2.1	Produit de convolution	704
II.2.2	Transformée de Laplace	704
II.2.3	Réponse harmonique	706
II.3	Analyse des systèmes automatiques analogiques	712
II.3.1	Fonctions de transfert du système bouclé	712
II.3.2	Stabilité	714
II.4	Synthèse des régulateurs analogiques	724
II.4.1	Spécifications	724
II.4.2	Synthèse dans le lieu des pôles	725
II.4.3	Synthèse par calibrage de la boucle	727
II.4.4	Commande cascade	732
ANNEXE III	Guide d'utilisation succinct des applications contenues dans le CD-ROM	739
Bibliographie		743
Notations		749
Index		759