

Table des matières

Avant-propos	V
Remerciements	VII
Chapitre 1	
Introduction à la théorie de la commande moderne	1
1.1 Classification des systèmes	1
1.2 Commande en boucle ouverte et commande en boucle fermée	4
1.3 Représentation des processus	8
1.4 Commande classique, commande moderne et commande robuste	8
1.5 Plan de l'ouvrage.....	9
Chapitre 2	
Fonctions de variables complexes.....	11
Introduction.....	11
2.1 Transformation de Fourier	11
2.2 Transformation de Laplace.....	12
2.3 Application de la transformation de Laplace aux équations différentielles.....	13
2.4 Systèmes échantillonnés.....	15
2.5 Transformation en Z	20
2.6 Application de la transformation en Z aux équations aux différences	22
2.7 Transformation inverse de Laplace	24
2.7.1 Cas de pôles distincts	26
2.7.2 Cas de pôles répétés	27
2.8 Transformation inverse en Z	28
2.9 Transformation W	30
2.10 Agrégation de systèmes décrits par leur fonction de transfert en S	31
2.10.1 Systèmes en parallèle	31
2.10.2 Systèmes en cascade.....	31
2.11 Agrégation de systèmes décrits par leur fonction de transfert en Z	31
2.11.1 Systèmes en cascade.....	31
2.11.2 Systèmes en parallèle	33
Problèmes.....	34
Chapitre 3	
Révision d'algèbre linéaire.....	39
Introduction.....	39
3.1 Matrices.....	39
3.2 Valeurs propres, vecteurs propres et valeurs singulières d'une matrice	43
3.2.1 Transformation de similarité	46

3.2.2 Propriétés des valeurs propres, des valeurs singulières et des déterminants	50
3.3 Matrices définies positives	53
3.4 Équation de Lyapunov	54
3.5 Solution d'équations algébriques linéaires.....	55
3.6 Vecteurs, bases et changements de base	57
Problèmes.....	65

Chapitre 4

Objectifs de performance	71
Introduction.....	71
4.1 Caractéristiques d'un système dynamique	71
4.1.1 Réponse impulsionnelle	71
4.1.2 Intégrale de convolution.....	72
4.1.3 Fonction de transfert et réponse en fréquence.....	75
4.1.4 Notions de causalité	77
4.1.5 Relations module-déphasage de réponses en fréquence causales	77
4.2 Objectifs de performance temporelle	78
4.3 Étude temporelle des fonctions de transfert du premier et du second ordre : caractéristiques en régime transitoire	80
4.4 Étude temporelle : le cas discret.....	83
4.4.1 Cas d'un pôle réel.....	83
4.4.2 Cas d'un pôle complexe	84
4.5 Compensation de type proportionnel, intégral ou différentiel.....	88
4.5.1 Effet d'un zéro supplémentaire sur la réponse d'un système du second ordre	88
4.5.2 Effet d'un pôle supplémentaire sur la réponse d'un système du second ordre	88
4.6 Objectifs de performance fréquentiels	89
4.6.1 Stabilité, marge de gain et marge de phase	92
4.6.2 Minimisation des perturbations	93
4.7 Critères de performance temporels et fréquentiels.....	94
4.8 Performance en régime permanent.....	95
4.8.1 Signaux d'entrée types	97
4.8.2 Types de système	99
4.8.3 Formulation généralisée de l'erreur en régime permanent dans le cas continu.....	100
4.8.4 Formulation généralisée de l'erreur en régime permanent dans le cas discret.....	101
Problèmes.....	103

Chapitre 5

Description de systèmes dynamiques par variables d'état	111
Introduction.....	111
5.1 Analyse des systèmes dynamiques.....	111

5.1.1	Équations de Newton.....	111
5.1.2	Équations de Lagrange	112
5.2	Représentation par variables d'état	114
5.3	Formes canoniques.....	120
5.3.1	Première forme canonique	121
5.3.2	Deuxième forme canonique	122
5.4	Linéarisation de systèmes non linéaires	124
5.5	Agrégation de systèmes décrits par des variables d'état	130
5.6	Fonction de transfert d'un système décrit par des variables d'état	131
5.7	Systèmes discrets décrits par des variables d'état	132
5.8	Problème du pendule inversé	132
5.8.1	Modélisation du système	133
5.8.2	Modélisation selon les équations de Newton	134
5.8.3	Modélisation selon la méthode de Lagrange	135
5.8.4	Linéarisation du modèle	136
5.8.5	Représentation sous forme de variables d'état	136
5.8.6	Fonction de transfert.....	137
5.8.7	Modélisation du pendule inversé incorporant le moteur	138
5.8.8	Fonction de transfert du système incorporant le moteur	140
	Problèmes.....	145

Chapitre 6

	Solution générale de l'équation d'état.....	153
	Introduction.....	153
6.1	Calcul de la matrice de transition.....	154
6.1.1	Méthode de diagonalisation de la matrice de transition	154
6.1.2	Utilisation de la transformée de Laplace.....	158
6.1.3	Méthode des diagrammes de fluence	159
6.1.4	Approximation par série de puissances	160
6.2	Propriétés des matrices de transition	162
6.3	Solution générale de l'équation d'état.....	162
6.4	Systèmes discrets décrits par des variables d'état	165
6.4.1	Utilisation de la transformée en Z	166
6.4.2	Évaluation de la matrice de transition discrète.....	169
6.4.3	Relation entre variables d'état discrètes et variables d'état continues	170
	Problèmes.....	173

Chapitre 7

	Commandabilité et observabilité de systèmes dynamiques	181
	Introduction.....	181
7.1	Définitions.....	181
7.2	Illustration de la commandabilité et de l'observabilité	182
7.3	Critère de commandabilité	184
7.4	Critères d'observabilité	188

XII *Table des matières*

7.5	Principe de la dualité	190
7.6	Commandabilité dans le domaine discret.....	191
7.7	Observabilité dans le domaine discret.....	192
7.8	Stabilisabilité d'un système.....	193
7.9	Détectabilité d'un système	194
7.10	Problème du pendule inversé	194
	Problèmes.....	197
 Chapitre 8		
	Stabilité et placement des pôles	203
	Introduction.....	203
8.1	Stabilité des systèmes.....	203
8.2	Stabilisation par retour d'état	207
8.3	Placement de pôles dans le cas d'une forme canonique de commandabilité	209
8.4	Placement de pôles dans le plan discret	211
8.5	Formule générale du compensateur pour le placement de pôles.....	212
8.6	Stabilisation par retour de sortie.....	217
8.7	Problème du pendule inversé	218
	Problèmes.....	221
 Chapitre 9		
	Observateurs	229
	Introduction.....	229
9.1	Construction d'un observateur	230
9.2	Observabilité et construction d'un observateur.....	230
9.3	Principe de séparation	231
9.4	Observateurs dans le plan discret.....	235
9.5	Observateurs d'ordre réduit.....	237
9.6	Choix de l'estimation de la valeur initiale.....	241
9.7	Méthode des perturbations singulières.....	241
	Problèmes.....	245
 Chapitre 10		
	Formes canoniques et réalisations	251
	Introduction.....	251
10.1	Systèmes monoentrée.....	251
10.1.1	Forme canonique de commandabilité	251
10.1.2	Forme canonique d'observabilité.....	257
10.1.3	Autres formes canoniques	261
10.2	Décomposition d'un système en sous-systèmes commandables et/ou observables.....	262
10.2.1	Décomposition d'un système en sous-systèmes commandable/non commandable.....	262

10.2.2	Décomposition d'un système en sous-systèmes observable/non observable.....	268
10.2.3	Décomposition de Kalman : décomposition d'un système en sous-systèmes commandables et/ou observables	271
10.3	Propriétés des représentations minimales	278
10.4	Systèmes multientrées.....	283
	Problèmes.....	289
Chapitre 11		
	Commande optimale.....	295
	Introduction.....	295
11.1	Définition du problème	295
11.2	Étude de la fonction de transfert d'un système monoentrée-monosortie avec commande optimale.....	306
11.3	Propriétés de la boucle fermée	309
11.4	Commande optimale : étude du cas discret.....	310
	Problèmes.....	317
Chapitre 12		
	Introduction au filtrage de Kalman.....	321
	Introduction.....	321
12.1	Notions de probabilité.....	321
12.1.1	Espace probabilité (Ω, P).....	321
12.1.2	Fonction de distribution	326
12.1.3	Espérance	327
12.1.4	Variance	328
12.1.5	Covariance	329
12.1.6	Fonctions d'un vecteur aléatoire	333
12.2	Notions de stochastique	334
12.2.1	Processus aléatoire	334
12.2.2	Paramètres statistiques d'un processus aléatoire.....	335
12.2.3	Fonctions d'un vecteur aléatoire	337
12.2.4	Estimation de processus aléatoires corrélés	337
12.3	Entrées et sorties d'un filtre de Kalman.....	338
12.3.1	Définitions.....	339
12.3.2	Algorithme de Kalman.....	341
12.4	Filtre de Kalman continu.....	349
12.5	Stabilité du filtre de Kalman	350
12.6	Filtre de Kalman étendu aux systèmes non linéaires	350
12.7	Récapitulation du filtre de Kalman	352
	Problèmes.....	353
Annexe A	Propriétés des principales transformations.....	363
Annexe B	Valeurs limites.....	365
Annexe C	Transformées utiles	367

XIV *Table des matières*

Annexe D	Démonstration de la formule d'Ackerman.....	369
Annexe E	Principales distributions	371
Bibliographie		375
Index		377