

Table des matières

Avant-propos	11
Chapitre 1. Contrôle, asservissement et régulation des systèmes	23
1.1. Introduction	23
1.1.1. Généralités et définitions	23
1.1.2. Synthèse d'une loi de commande	27
1.1.2.1. Spécifications et configuration	27
1.1.2.2. Les performances : régulation, rejet de perturbation, anticipation	28
1.1.2.3. La robustesse et les incertitudes paramétriques	28
1.1.2.4. Contraintes sur la commande : énergie de l'entrée de commande	28
1.1.3. Exemple d'application et de compréhension	29
1.1.3.1. Etude d'un asservissement de l'attitude d'un satellite	29
1.2. Commande de processus	32
1.2.1. Correction dans le domaine fréquentiel	32
1.2.2. Correcteur à avance de phase, correcteur proportionnel dérivé (PD)	34
1.2.3. Correcteur à retard de phase, compensateur intégral (PI)	36
1.2.4. Commande proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)	38
1.2.4.1. Commande proportionnelle et dérivée (PD)	39
1.2.4.2. Commande proportionnelle intégrale (PI)	40
1.2.4.3. Commande proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)	43
1.3. Quelques exemples d'application	44
1.3.1. Identification de la fonction de transfert et asservissement	44
1.3.1.1. Calcul des erreurs statiques et dynamiques	45
1.3.1.2. Etude de stabilité	45

1.3.1.3. Asservissement par correcteur à avance de phase	46
1.3.1.4. Asservissement par compensateur intégral (correcteur à retard de phase)	49
1.3.2. Correction PI	50
1.3.3. Correction à avance de phase	53
1.4. Quelques exercices d'application	57
1.5. Application 1 : stabilisation d'un robot rigide avec actionneur pneumatique	59
1.5.1. Approche classique	61
1.6. Application 2 : commande en température d'un four	73
1.6.1. Etude de modélisation et identification	73
1.6.1.1. Choix d'une représentation	74
1.6.1.2. Choix d'une paramétrisation	74
1.6.1.3. Choix d'une méthode d'identification	76
Chapitre 2. Commande de processus d'un système	77
2.1. Introduction	77
2.2. La modélisation	77
2.2.1. Introduction	77
2.3. Gouvernabilité, commandabilité et observabilité	78
2.3.1. Polynôme caractéristique, polynôme minimal, théorème de Cayley-Hamilton	78
2.3.2. Gouvernabilité ou commandabilité	78
2.3.2.1. Définition	78
2.3.2.2. Critère de commandabilité de Kalman	79
2.3.2.3. Commandabilité d'un système discret	82
2.3.2.4. Changement de base et commandabilité	82
2.3.2.5. Tests de commandabilité de Popov-Belevitch-Hautus	84
2.3.3. Observabilité	85
2.3.3.1. Définitions	85
2.3.3.2. Critère d'observabilité de Kalman	86
2.3.3.3. Observabilité d'un système discret	88
2.3.3.4. Changement de base et observabilité	89
2.3.3.5. Tests d'observabilité de Popov-Belevitch-Hautus	90
2.3.4. Observateur	90
2.3.5. Observateur pour la reconstruction d'état	92
2.3.6. Représentation d'état minimal	99
2.3.6.1. Définition et exemples	100
2.3.6.2. Stabilité des modes et minimalité	101
2.4. Retour d'état, commande par placement de pôles et stabilisabilité	102
2.4.1. Commande par retour d'état	102
2.4.2. Placement de pôles et stabilisabilité	103
2.4.3. Réponse en temps fini pour un système discret, réponse pile	107

2.4.4. Utilisation d'un observateur pour la commande :	
principe de séparation	108
2.4.4.1. Observateur et commande d'un système continu	108
2.5. Commande linéaire quadratique (LQ ou LQR)	110
2.5.1. Régulateur linéaire quadratique (LQR)	112
2.6. Commande optimale (LQ)	114
2.7. Quelques exercices d'application et de compréhension	117

Chapitre 3. Actionneurs : modélisation et analyse 141

3.1. Introduction : actionneurs électriques, hydrauliques et pneumatiques	141
3.1.1. Méthodes de représentation pour les systèmes physiques	142
3.1.1.1. Analogies entre systèmes physiques	142
3.1.1.2. Représentations et transfert d'énergie	143
3.1.2. Modélisation de quelques constituants des systèmes physiques	144
3.1.2.1. Circuits et réseaux électriques	144
3.1.2.2. Caractéristiques des machines à courant continu	144
3.1.2.3. Régime dynamique ou régime transitoire	145
3.1.2.4. Les asymétries	148
3.1.2.5. La dépendance de la position	148
3.1.2.6. Le frottement de Stribeck	149
3.1.2.7. Modélisation du frottement	149
3.2. Chaînes de transmission, actionneurs et capteurs	150
3.2.1. Actionneurs électriques en robotique	150
3.2.1.1. Principe	152
3.2.1.2. Régime permanent	154
3.2.2. Caractéristique couple vitesse du moteur	154
3.2.3. Régime dynamique ou régime transitoire	155
3.2.4. Systèmes électriques moteur charge	158
3.2.4.1. Chaîne de transmission flexible : actionneurs électriques avec flexibilité	158
3.3. Actionneurs pneumatiques	161
3.3.1. Modélisation d'un système pneumatique	161
3.3.2. Modèle de frottements	169
3.3.2.1. L'adhérence ou stiction	170
3.4. Actionneurs hydrauliques	174
3.4.1. Description du système	174
3.4.2. Modèle mécanique	174
3.4.3. Modèle d'actionneur hydraulique	176
3.5. Exercices d'application	178

Chapitre 4. Commande numérique et approche polynômiale	185
4.1. Introduction à la correction numérique	185
4.1.1. Synthèse des correcteurs numériques par transposition	186
4.1.1.1. Transposition par échantillonnage – blocage	187
4.1.2. Transposition d’Euler	189
4.1.2.1. Effet de la transposition d’Euler sur l’intégration	192
4.1.2.2. Effet fréquentiel de la transposition d’Euler	192
4.1.2.3. Conclusion	193
4.1.3. Choix de la période d’échantillonnage (théorème de Shannon)	194
4.2. Synthèse du correcteur PID et son équivalent RST numérique	196
4.2.1. Correcteurs standards	196
4.2.2. Etude des PID numériques	198
4.2.2.1. Forme sans dérivation de la consigne	199
4.2.2.2. Effet des saturations sur le terme intégral	200
4.2.2.3. Dispositif d’anti-emballement du terme intégral	201
4.2.3. Synthèse du correcteur RST numérique	203
4.2.4. Choix des pôles et zéros à compenser	205
4.2.5. Calcul des polynômes R , S et T	206
4.2.5.1. Résolution des équations diophantiennes	206
4.2.6. Objectifs supplémentaires pour la synthèse	207
4.3. Commande par placement de pôles numériques	208
4.3.1. Choix de la période d’échantillonnage	209
4.4. Diophantine, Bézout, PGCD, PPCM et division	209
4.4.1. Arithmétique des polynômes	209
4.4.2. Equation diophantienne $ax + by = c$ et théorème de Bachet-Bézout	210
4.4.3. Identité de Bézout	211
4.4.4. PGCD	211
4.4.5. PPCM	211
4.5. Quelques exercices d’application et de compréhension	212
Chapitre 5. Robot Nao	219
5.1. Introduction	219
5.2. Projet d’assistance à domicile	220
5.2.1. Le logiciel Chorégraphe	220
5.2.1.1. Interface graphique	220
5.2.1.2. Connectivité <i>via</i> Wifi	221
5.2.1.3. Utilisation de Chorégraphe et commande de Nao	222
5.2.1.4. Télépathe et capteurs	224
5.2.1.5. Monitor	225
5.2.1.6. NaoSim (simulation 3D)	226
5.2.1.7. Webots	226

5.2.2. Recherche SDK Matlab Nao	226
5.2.2.1. Conversion de type	230
5.2.3. Nao et l'assistance à domicile	232
5.2.3.1. Besoin	232
5.2.3.2. Cadre de travail	232
5.2.4. Les actions à effectuer	233
5.3. Détail des différents programmes	234
5.3.1. Demande de nouvelles	234
5.3.1.1. Objectif	234
5.3.1.2. Déroulement	234
5.3.2. Boîte AppelPompiers	236
5.3.3. Boîte AppelVoisin	238
5.3.4. Boîte AppelFamille	240
5.3.4.1. Détecteur de collision	241
5.3.4.2. Actions spéciales : réveil	242
5.3.4.3. Toilette du matin	245
5.3.4.4. Gymnastique	246
5.3.4.5. Appel infirmière	250
5.3.4.6. Jeu de mémoire	251
5.3.4.7. Rappel des médicaments	257
5.3.4.8. Lecture	258
5.3.4.9. Ecoute de musique	259
5.3.4.10. Jeu de multiplication	265
5.3.4.11. Danse de Nao	269
5.3.4.12. Jeu de questions	270
5.3.4.13. Repère personne à terre	273
5.3.4.14. A tout moment	277
5.4. Conclusion	279
5.4.1. Les limites de Nao et les améliorations possibles	279

Chapitre 6. Problèmes d'application avec solutions 281

6.1. Exercice n° 1 : suspension de voiture	281
6.1.1. Modélisation	281
6.1.2. Analyse	283
6.2. Exercice n° 2 : système électromécanique	286
6.2.1. Modélisation	286
6.2.2. Analyse	288
6.3. Exercices : identification et représentation d'état	289
6.3.1. Exercice n° 3	289
6.3.2. Exercice n° 4	291
6.3.3. Exercice n° 5	293
6.3.4. Exercice n° 6	296
6.3.4.1. Modélisation	296

6.3.4.2. Identification	299
6.3.5. Exercice n° 7	302
6.4. Exercices : observation et commande de systèmes non linéaires	303
6.4.1. Exercice n° 8	303
6.4.2. Exercice n° 9	306
6.4.3. Exercice n° 10	313
6.4.4. Exercice n° 11	316
6.4.5. Exercice n° 12	319
6.4.5.1. Forme compagne observable	319
6.4.5.2. Forme compagne commandable	320
6.4.6. Exercice n° 13	321
6.4.7. Exercice n° 14	325
6.4.8. Exercice n° 15	326
6.4.8.1. Représentation d'état du système	326
6.4.8.2. Commandabilité	326
6.4.8.3. Observabilité	327
Bibliographie	331
Index	337