

Table des matières

Avant-propos	11
Introduction	13
PARTIE 1. ÉLÉMENTS AVANCÉS ET BANC D’ESSAI DE COMMANDE ET RÉGULATION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR	23
Chapitre 1. Modèles d’état discrets canoniques de processus dynamiques	25
1.1. Intérêt et construction de modèles d’état canoniques	25
1.2. Réalisations canoniques d’une fonction de transfert $G(z)$	25
1.2.1. Réalisation canonique de Jordan	26
1.2.1.1. Cas où $G(z)$ admet des pôles réels distincts	26
1.2.1.2. Cas où $G(z)$ admet des pôles réels multiples	28
1.2.1.3. Problèmes posés par la réalisation de Jordan	28
1.2.2. Réalisation canonique commandable	29
1.2.3. Réalisation canonique observable	31
1.3. Transformations canoniques de modèles d’état discrets.	33
1.3.1. Transformation canonique de Jordan	34
1.3.2. Transformation canonique commandable.	36
1.3.3. Transformation canonique observable.	38
1.3.4. Transformation canonique de Kalman.	41
1.4. Schéma de décomposition canonique	41
1.5. Discrétisation et transformations canoniques par Matlab	43
1.6. Exercices corrigés	43

Chapitre 2. Conception et simulation des systèmes de commande et régulation numérique par retour d'état	49
2.1. Principe de la commande numérique par retour d'état	49
2.2. Calcul du gain K par positionnement de pôles	50
2.3. Retour d'état avec observateur d'ordre complet	51
2.3.1. Problématique	51
2.3.2. Structure de l'observateur d'état complet ou total	51
2.3.3. Schéma de synthèse du retour d'état avec observateur complet	53
2.3.3.1. Principe de séparation	53
2.3.3.2. Algorithme de mise en œuvre	54
2.4. Retour d'état discret avec observateur partiel	56
2.4.1. Problématique	56
2.4.2. Structure de l'observateur d'état partiel	56
2.4.3. Schéma de retour d'état discret avec observateur partiel	59
2.4.3.1. Principe de séparation	59
2.4.3.2. Algorithme de mise en œuvre	62
2.5. Retour d'état discret avec poursuite de consigne	62
2.6. Schéma bloc d'un système de régulation numérique	62
2.7. Simulation par ordinateur d'un servomécanisme	63
2.7.1. Simulation d'un servomécanisme de vitesse	63
2.7.1.1. Modèle d'état discret canonique avec retard d'entrée	63
2.7.1.2. Schéma de régulation par retour d'état avec observateur	64
2.7.1.3. Simulations numériques et résultats	66
2.7.2. Simulation par ordinateur d'un servomécanisme de position	68
2.8. Exercices corrigés	71
Chapitre 3. Banc d'essai multimédia de commande et régulation par ordinateur	83
3.1. Contexte et intérêt	83
3.1.1. Contexte	83
3.1.2. Intérêt scientifique/didactique	84
3.1.3. Méthodologie de présentation de la plateforme	84
3.2. Constituants matériels de la plateforme	84
3.3. Éléments de conception de l'application logicielle ServoSys	86
3.3.1. Éléments fondamentaux	86
3.3.1.1. Schéma des systèmes de commande et régulation considérés	86
3.3.1.2. Identification paramétrique et commande en boucle ouverte	87
3.3.1.3. Retour d'état sans ou avec observateur	89

3.3.2. Éléments de programmation logicielle	90
3.3.2.1. Éléments de la technologie de programmation MEX-C++ . .	90
3.3.2.2. Éléments de la technologie de programmation Matlab/GUI . .	94
3.3.2.3. Méthodologie de programmation Matlab/GUI	95
3.4. Conception de l'application logicielle ServoSys	96
3.4.1. Schéma architectural de l'application logicielle	96
3.4.2. GRAFCET de la plateforme multimédia ServoSys	97
3.5. Mise en œuvre de la plateforme multimédia ServoSys	102
3.5.1. Mise en œuvre matérielle	102
3.5.2. Mise en œuvre logicielle	103
3.6. Essais d'ensemble de la plateforme	106
3.6.1. Mises en service et modes opératoires	106
3.6.2. Échantillons des résultats affichés sur le panneau Matlab/GUI . . .	107
3.7. Exercices corrigés	112

PARTIE 2. COMMANDE ET RÉGULATION NUMÉRIQUE OPTIMALE DÉTERMINISTE ET STOCHASTIQUE 119

Chapitre 4. Commande et régulation numérique optimale déterministe 121

4.1. Contexte et historique de la commande optimale	121
4.1.1. Contexte	121
4.1.2. Historique	121
4.2. Problème général de commande optimale à temps discret	124
4.2.1. Principe	124
4.2.2. Formulation fonctionnelle	124
4.3. Régulateur linéaire quadratique (LQR en anglais)	125
4.3.1. Définition, formulation et méthodes d'étude	125
4.3.2. Équations de H-J-B	126
4.3.2.1. Structure	126
4.3.2.2. Résolution des équations d'H-J-B et équation de Riccati . .	126
4.3.2.3. Structure du LQR	129
4.3.2.4. Régulateur quadratique linéaire sur horizon infini ($[0, \infty[$) . .	130
4.4. Traduction en temps discret du problème LQR continu	130
4.4.1. Discrétisation de l'équation d'état	131
4.4.2. Discrétisation de la fonction coût	131
4.4.3. Étude de cas d'un problème LQR scalaire	132
4.4.3.1. Données	132
4.4.3.2. Solution du LQR discret avec $T = 5$ ms (période d'échantillonnage)	132

4.4.3.3. Programme Matlab de résolution	134
4.5. Commande optimale prédictive	136
4.5.1. Principe de base	136
4.5.2. Équation de récurrence d'un processus à base de l'opérateur q^{-1}	138
4.5.3. Formulation générale d'un modèle de prédiction	138
4.5.4. Solution et structure de la commande optimale prédictive	140
4.6. Exercices corrigés	141

Chapitre 5. Commande et régulation numérique optimale stochastique. 151

5.1. Introduction aux processus dynamiques stochastiques	151
5.2. LQR stochastique	152
5.2.1. Formulation	152
5.2.2. Résolution de l'équation de H-J-B stochastique	153
5.2.3. Schéma fonctionnel du LQR stochastique	157
5.2.4. Propriétés du LQR stochastique	158
5.2.4.1. Solution du système en boucle fermée	158
5.2.4.2. Propagation des moyennes statistiques si v_k est un bruit blanc	159
5.2.4.3. Propagation des variances si $v(k)$ est un bruit blanc	159
5.2.4.4. Comportement asymptotique	159
5.3. Filtre de Kalman discret	160
5.3.1. Contexte scientifique et hypothèses	160
5.3.2. Notations	160
5.3.3. Schéma algorithmique en boucle fermée	161
5.4. Régulateur linéaire quadratique gaussien	163
5.4.1. Contexte	163
5.4.2. Principe de séparation	164
5.4.3. Schéma algorithmique du régulateur LQG	165
5.5. Exercices corrigés	166

Chapitre 6. Plateforme Matlab/GUI déployée de conception et simulation virtuelle des systèmes de commande optimale stochastique. 169

6.1. Introduction à la plateforme OPCODE (<i>OPTimal CONTROL DEsign</i>)	169
6.1.1. Contexte scientifique	169
6.1.2. Méthodologie de présentation détaillée	169
6.2. Éléments fondamentaux de conception d'OPCODE	170

6.2.1. Éléments de commande optimale déterministe	170
6.2.1.1. Schémas de commande optimale déterministe	170
6.2.1.2. Formulation générique des problèmes de commande optimale déterministe	171
6.2.1.3. Algorithmes d'optimisation numérique des problèmes LQR/LQRO	173
6.2.2. Éléments de commande optimale stochastique	173
6.2.2.1. Schémas de commande optimale stochastique	173
6.2.2.2. Formulation des problèmes de commande optimale stochastique	175
6.2.2.3. Algorithmes d'optimisation numérique des problèmes LQG/LQGT	176
6.3. Conception de l'outil OPCODE par GRAFCET	176
6.3.1. Schéma architectural	176
6.3.2. GRAFCET de mise en œuvre	178
6.4. Mise en œuvre logicielle	181
6.5. Exemples d'utilisation de l'outil OPCODE	183
6.5.1. Conception de systèmes de commande optimale déterministe	183
6.5.2. Conception de systèmes de commande optimale stochastique	183
6.6. Production de l'application déployée OPCODE.EXE	186
6.6.1. Intérêt du déploiement de l'application Matlab/GUI	186
6.6.2. Méthodologie de déploiement	187
6.6.3. Essais de l'application OPCODE.EXE déployée	187
6.7. Exercices corrigés	189

PARTIE 3. SYSTÈMES DE COMMANDE ET RÉGULATION

TÉLÉ-OPÉRABLE VIA INTERNET	195
---	------------

Chapitre 7. Éléments de systèmes de commande et régulation télé-opérable <i>via</i> Internet	197
---	------------

7.1. Problématique	197
7.2. Topologies infrastructurelles	198
7.2.1. Topologie de base	198
7.2.2. Topologies avancées	199
7.2.2.1. Topologie monoserveur et multiprocesseur	199
7.2.2.2. Topologie multiserveur et multiprocesseur	201
7.2.2.3. Topologie des systèmes de commande télé-opérables coopératifs	201
7.2.2.4. Topologie universelle	202
7.3. Laboratoires télé-opérables <i>via</i> Internet	203
7.3.1. Comparaison de laboratoires classiques et télé-opérables	203

7.3.2. Infrastructures du côté serveur d'un laboratoire télé-opérable. . .	205
7.3.2.1. Plateforme expérimentale	205
7.3.2.2. Applications logicielles	205
7.3.2.3. Appareillage réseau	206
7.3.3. Critères de création d'un laboratoire télé-opérable	206
7.4. Exercices corrigés	207

Chapitre 8. Laboratoire d'automatique télé-opérable

via Internet	213
8.1. Introduction au laboratoire d'automatique télé-opérable	213
8.1.1. Cadre de création	213
8.1.2. Contexte didactique.	214
8.1.3. Spécifications	214
8.2. Conception et mise en œuvre du système expérimental.	215
8.2.1. Schémas descriptifs.	215
8.2.2. Modèle dynamique du système réel d'éclairage de puissance.	217
8.2.3. Modèle dynamique du régulateur PID de l'éclairage de puissance	217
8.2.4. Application Labview assistée par IHMM.	218
8.3. Topologie du laboratoire d'automatique télé-opérable	219
8.3.1. Infrastructure matérielle	220
8.3.2. Infrastructure spécialisée du côté serveur.	220
8.3.2.1. Applications logicielles	220
8.3.2.2. Serveur(s) web Labview/TeamViewer	222
8.3.3. Infrastructure du côté télé-opérateur	222
8.4. Utilisation du laboratoire télé-opérable <i>via</i> Internet	222
8.4.1. Fiche d'instruction du mode opératoire	222
8.4.2. Échantillons de résultats d'essais obtenus avec le LABAUTOP	223
8.5. Exercices corrigés	227
 Annexe 1. Table des transformées en z	 235
 Annexe 2. Éléments de Matlab utilisés dans l'ouvrage	 237
 Annexe 3. Discrétisation des fonctions de transfert	 241
 Bibliographie	 243
 Index	 245