

Génie des procédés de l'École de Nancy

Jean-Pierre CORRIOU

Commande des procédés

3^e édition

Editions
TEC
& **DOC**

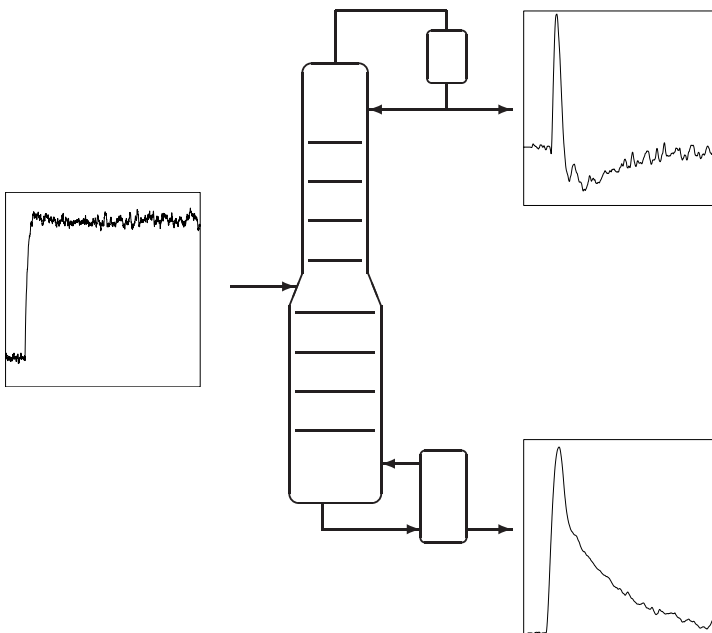
Lavoisier

Commande des procédés

3^e édition

Jean-Pierre Corriou

Professeur à l'École Nationale Supérieure
des Industries Chimiques de Nancy



Editions
TEC
& **DOC**

www.editions.lavoisier.fr

Dans la même collection :

Cinétique et catalyse, 2^e Éd.

G. Scacchi, M. Bouchy, J.-F. Foucaut, O. Zahraa, R. Fournet, 2011

Sécurité des procédés chimiques: connaissances de base et méthodes d'analyse de risques, 2^e Éd.

A. Laurent, 2003

Génie de la réaction chimique, 2^e Éd.

J. Villermaux, 1993

Chez le même éditeur :

Méthodes numériques et optimisation. Théorie et pratique pour l'ingénieur

J.-P. Corriou, 2010

Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique : aspects théoriques et pratiques, 2^e Éd.

H. Fauduet, 2012

Mécanique des fluides et des solides appliquée à la chimie

H. Fauduet, 2011

Introduction au génie des procédés

D. Ronze, 2008

Phénomènes de transfert en génie des procédés

J.-P. Couderc, Ch. Gourdon, A. Liné, 2008

Dictionnaire de la chimie et de ses applications, 4^e Éd.

C. Duval, R. Duval, J.-C. Richer, 2010

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc

Edition : Brigitte Peyrot

Fabrication : Estelle Perez-Le Du

Impression et brochage : EMD, Lassay-les-Châteaux

© 2012, Lavoisier, Paris

ISBN : 978-2-7430-1471-1

ISSN : 1251-5159

Préface

Organisation de l'ouvrage

L'ouvrage a été conçu afin d'introduire progressivement des concepts de difficulté croissante et de permettre un apprentissage des théories et des méthodes de commande qui ne soit pas trop brutal. Il comporte différents niveaux de lecture (Figure 1). En particulier, la première partie peut être abordée en majorité par des étudiants débutant en automatique ou par des techniciens et ingénieurs issus du monde industriel, n'ayant eu jusque-là qu'un contact de terrain avec l'automatique et désirant améliorer leurs connaissances. Les parties suivantes nécessitent une connaissance préalable minimale en automatique. Elles permettent également de mettre en oeuvre des techniques souvent plus performantes. Sans prétendre à l'exhaustivité, ce livre propose un large éventail de méthodes d'identification et de commande applicables sur les procédés et accompagnées d'exemples suivis fournissant ainsi des éléments de comparaison.

Ce livre ne prétend pas rivaliser avec des livres théoriques d'automatique spécialisés sur tel ou tel point, par exemple l'identification, le traitement du signal, la commande multivariable, la commande robuste, ou la commande non linéaire. Par contre, le lecteur trouvera de nombreuses références et des exposés permettant de comprendre un grand nombre de ces concepts et de les appliquer dans son domaine, en s'inspirant des cas traités dans le présent ouvrage.

Plusieurs commandes sont examinées sous des angles différents:

- la commande par modèle interne mono-entrée mono-sortie en continu et en discret, multivariable en discret,
- la commande par placement de pôles en continu et en discret,
- la commande linéaire quadratique mono-entrée mono-sortie par fonction de transfert continue et multivariable dans l'espace d'état en continu et en discret.
- la commande prédictive généralisée, la commande prédictive basée sur le modèle, éventuellement avec observateur, linéaire ou non linéaire.

La considération d'un même problème par des approches différentes entraîne ainsi une réflexion approfondie.

Les exemples souvent pris dans le domaine du génie des procédés concernent en particulier des réacteurs chimiques, biologiques, de polymérisation, un réacteur de cracking catalytique (FCC), ou des colonnes de distillation. Ces exemples sont détaillés, y compris numériquement, afin que les raisonnements utilisés puissent

être vérifiés et repris par le lecteur. Les simulations ont été réalisées à l'aide des logiciels Matlab[®], Maple[®] et en Fortran.

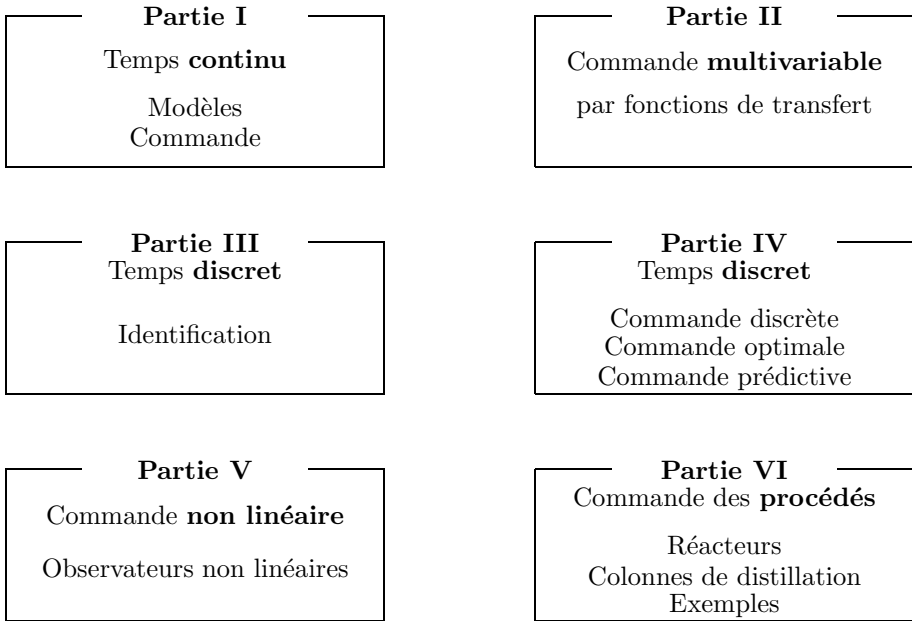


Figure 1: Organisation générale du livre.

La partie I concerne la commande monovariante en temps continu. La présentation faite de la commande linéaire des procédés mono-entrée mono-sortie à contre réaction est classique, volontairement simple dans l'ensemble. Elle présente l'avantage pédagogique de bien décomposer l'approche d'un problème de commande, d'introduire un certain nombre de notions importantes, et facilite à notre avis la compréhension de la commande réalisée en temps discret, appelée commande numérique, et de la commande non linéaire. Egalement, elle est proche, par sa conception, d'une grande partie de la pratique industrielle, tout au moins dans le domaine du génie chimique. Le régulateur PID continu y est traité de manière abondante, mais sans exclusivité. Les principaux types de modèles dynamiques rencontrés en génie des procédés sont commentés et les modèles de systèmes sont présentés aussi bien dans l'espace d'état que comme des fonctions de transfert (chapitre 1). La commande est abordée simplement par le régulateur PID (chapitre 2). La stabilité est présentée à la fois pour les systèmes linéaires et non linéaires. Ainsi, la stabilité d'un réacteur de polymérisation est détaillée en mettant en évidence la présence d'états stationnaires multiples en relation avec le comportement physique du réacteur (chapitre 3). La synthèse des régulateurs est abordée avec le PID, mais est ensuite élargie à la commande par modèle interne, très importante industriellement, la commande par placement de pôles ou la commande linéaire quadratique (chapitre 4). L'analyse fréquentielle débute de manière classique par l'analyse dans les représentations de Bode et de Nyquist, mais est ensuite étendue à travers la robustesse et les fonctions de sensibilité (chapitre 5). Les améliorations des régulateurs comme la compensation de retard pur, la commande en cascade, la commande par anticipation sont passées en revue avec des exemples d'application sur des procédés industriels (chapitre 6). La première partie

Partie I

Modélisation dynamique, Dynamique en boucle ouverte	Chapitre 1
Commande linéaire PID par rétroaction	Chapitre 2
Analyse de stabilité linéaire et non linéaire	Chapitre 3
Conception des régulateurs PID, Placement de pôles,	Chapitre 4
Commande linéaire quadratique, Commande par modèle interne	
Analyse fréquentielle, Robustesse	Chapitre 5
Régulateurs améliorés, Prédicteur de Smith,	Chapitre 6
Cascade, Feedforward	
Représentation d'état, Commandabilité, Observabilité,	Chapitre 7
Réalisations et réduction de modèle	

Partie II

Commande multivariable par matrice de fonctions de transfert	Chapitre 8
---	------------

Partie III

Généralités sur le temps discret,	Chapitre 9
Traitement du signal	
Principes d'identification	Chapitre 10
Modèles pour l'identification	Chapitre 11
Algorithmes d'identification	Chapitre 12

Partie IV

Placement de pôles discret, PID discret,	Chapitre 13
Commande par modèle interne discrète	
Commande optimale,	Chapitre 14
Commande continue LQ et LQG,	
Commande discrète LQ et LQG,	
Commande prédictive généralisée monovariable	Chapitre 15
Commande prédictive multivariable basée sur le modèle	Chapitre 16

Partie V

Commande non linéaire	Chapitre 17
Observateurs non linéaires, estimateurs statistiques	Chapitre 18

Partie VI

Réacteurs	Chapitre 19
Colonnes de distillation	Chapitre 20
Exemples de procédés, problème-tests	Chapitre 21

Tableau 1: Contenu des chapitres.

s'achève sur les concepts de représentation d'état pour les systèmes linéaires et la commandabilité et l'observabilité (chapitre 7). Certaines parties de chapitres plus délicates peuvent être abordées dans une lecture ultérieure, comme la robustesse, la commande par placement de pôles ou la commande linéaire quadratique.

La partie II ne concerne en fait qu'un chapitre traitant de la commande multi-

variable par matrice de fonctions de transfert, continues en général. Ce choix est effectué à cause de la pratique assez courante de représentation choisie en commande des procédés. Le chapitre présente essentiellement des concepts généraux sur la manière d'aborder la commande multivariable. D'autres types de commande multivariable sont abordés dans des chapitres spécifiques: la commande linéaire quadratique et linéaire quadratique gaussienne (chapitre 14), la commande prédictive basée sur le modèle (chapitre 16) et la commande non linéaire multivariable (chapitre 17). En fait, il est possible d'aborder la troisième partie avant la seconde partie.

La partie III commence par un exposé de traitement du signal dont les concepts généraux sont indispensables en commande et en identification. Ensuite, les aspects généraux de la commande numérique et de l'échantillonnage sont traités et les fonctions de transfert discrètes y sont introduites (chapitre 9). Le reste de la partie III est consacré à l'identification en temps discret. D'abord, les principes de l'identification sont explicités (chapitre 10), puis différents types de modèles sont présentés (chapitre 11). Enfin, les principaux algorithmes d'identification paramétrique sont détaillés avec de nombreuses indications sur les précautions d'utilisation (chapitre 12). Différents types d'entrées utiles à l'identification y sont explicités. L'identification paramétrique d'un réacteur chimique est présentée. L'identification est traitée dans le cadre mono-entrée mono-sortie sauf en ce qui concerne le filtre de Kalman.

Dans la partie IV, plusieurs types classiques de commandes numériques sont étudiés. Le chapitre 13 décrit le placement de pôles et le PID numérique, la commande à modèle interne discrète comme des commandes monovariables avec application à un même réacteur chimique. Dans le chapitre 14, la commande optimale multivariable est considérée dans le cadre général de l'optimisation dynamique et la commande linéaire quadratique gaussienne aussi bien continue que discrète en découle sous la forme d'une commande multivariable, avec application à une colonne de distillation extractive à deux entrées et deux sorties. Deux types de commande prédictive sont étudiés. Dans le chapitre 15, la commande prédictive généralisée monovariante est étudiée avec application au réacteur chimique précédemment cité. Le chapitre 16 traite la commande prédictive basée sur le modèle, multivariable, permettant de prendre en compte des contraintes, souvent utilisée dans l'industrie, présentée sous plusieurs formes. Un exemple didactique multivariable est présenté. Deux applications à un réacteur de cracking catalytique (FCC) multivariable sont démontrées pour deux types différents de commande prédictive basée sur le modèle.

La partie V concerne la commande non linéaire présentée dans le cadre de la géométrie différentielle (chapitre 17) et les observateurs d'état (chapitre 18). Il s'agit de développements récents en commande, potentiellement très puissants. Pour faciliter son approche, plusieurs concepts sont analysés du point de vue linéaire, puis la commande non linéaire pour un système mono-entrée mono-sortie est étudiée avec la linéarisation entrée-états et entrée-sortie. La commande non linéaire multivariable est esquissée. L'estimation des états est nécessaire en commande non linéaire. Le chapitre 18 sur les observateurs ne concerne pas seulement le filtre linéaire de Kalman décrit dans la partie III, mais les observateurs non linéaires dont les filtres de Kalman étendu, inodore et d'ensemble, l'observateur à grand gain, l'estimateur à horizon glissant, des estimateurs de type Monte-Carlo ainsi que des estimateurs statistiques.

La partie VI est relative à deux grandes classes de procédés chimiques: les réacteurs et les colonnes de distillation. Dans les parties IV et V, l'identification linéaire et la commande linéaire avaient été appliquées au réacteur chimique décrit en détail dans le chapitre 19. Dans le chapitre 19, premier de la partie VI, l'utilisation d'une méthode de commande non linéaire, basée sur le modèle de connaissance du procédé, couplée avec un observateur d'états, est explicitée sur un réacteur chimique et un réacteur biologique. Le chapitre 20 balaie les méthodes de commandes utilisées en distillation, depuis les années 1970 jusqu'à l'époque actuelle marquée par l'utilisation industrielle de la commande non linéaire. De plus, dans le chapitre 21, un ensemble d'exemples et de problème-tests permettant de tester les différentes méthodes de commande décrites est fourni et conclut l'ouvrage.

A l'intention des lecteurs

L'auteur remercie les lecteurs, étudiants ou professeurs, qui ont bien voulu faire part de leurs remarques et corrections permettant d'améliorer les deux premières éditions. D'autre part, les errata des éditions successives sont disponibles sur le site web de l'auteur:

<http://jp.corriou.free.fr>

et les lecteurs souhaitant faire part de leurs remarques y trouveront en outre les adresses électroniques de l'auteur.

Remerciements

A travers l'enseignement que l'auteur dispense à l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, à travers les contacts qu'il entretient avec de nombreux automaticiens, à travers sa connaissance des industries de procédés, il a pu se rendre compte de la difficulté de faire partager les concepts de l'automatique aux ingénieurs de formation chimique ou de génie des procédés. En effet, l'ingénieur en charge des procédés doit aussi maîtriser un grand nombre de disciplines, chimie, génie des procédés, mécanique des fluides, thermique qui lui permettent de comprendre le fonctionnement de son procédé ou d'expliquer les dysfonctionnements qu'il observe. Si ce livre peut être utile aux étudiants en commande des procédés qu'ils soient issus du génie des procédés ou plutôt automaticiens, aux ingénieurs en charge des procédés, aux thésards débutant en commande des procédés, le but fixé par l'auteur sera atteint.

L'auteur tient à remercier ses nombreux collègues de l'ENSIC et du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique qui l'ont encouragé dans sa démarche lors de la première édition, en particulier le directeur de l'ENSIC A. Storck et le directeur du LSGC D. Tondeur. Il n'oublie pas tout le personnel pour le climat agréable de collaboration, les informaticiens qui l'ont aidé en particulier dans l'installation de \LaTeX et Linux. Il remercie tous les développeurs mondiaux de \LaTeX et Linux qui ont su créer des outils aussi efficaces. Il remercie ses plus proches collègues des groupes successifs TASC (Traitement et Acquisition de l'information chimique, Simulation et Commande des procédés) du LSGC et ODCA (Optimisation Dynamique et Commande Avancée des procédés) du LRGP, ses thésards, en particulier par ordre d'ancienneté K. Abidi, Z.L. Wang, S. Lucena, C. Gentric, M. Ben Thabet, A. Maidi, qui ont bien voulu s'intéresser à la commande non linéaire

de procédés chimiques ou biologiques, à la commande des systèmes à paramètres distribués, et qui ont partagé difficultés et satisfactions, et ses autres thésards en espérant qu'ils n'ont pas trop souffert durant la longue rédaction.

L'auteur tient également à remercier ses collègues qui ont bien voulu relire certaines parties de la première édition et faire part de leurs remarques, J. Ragot, professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, P. Sibille, maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I , G. Thomas, professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, S. Rohani, professeur à University of Western Ontario, U. Volk, ingénieur à Shell Godorf et spécialiste de commande prédictive. Je remercie S. Othman, maître de conférences à l'Université de Lyon, spécialiste de l'observateur à grand gain. Que M. Alamir, chercheur au Laboratoire d'Automatique de Grenoble qui a accepté la lourde tâche de relire la totalité de la seconde édition, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Enfin et surtout, l'auteur dédie ce livre à ses enfants Alain et Gilles et ses proches qui ont su faire preuve de tant de patience et de compréhension face à l'investissement considérable lié à la réalisation de cet ouvrage.

Table des matières

I	Commande en temps continu	1
1	Modélisation dynamique des procédés	3
1.1	Références	3
1.2	Intérêt de la commande des procédés	3
1.3	Description d'un procédé du point de vue de l'automaticien	4
1.4	Classification des modèles	7
1.5	Représentation d'état	8
1.6	Exemples de modèles en génie des procédés	9
1.6.1	Systèmes à paramètres localisés	9
1.6.2	Procédés à paramètres distribués	17
1.6.3	Degrés de liberté	25
1.7	Stabilité des procédés	26
1.8	Ordre d'un procédé	26
1.9	Transformation de Laplace	27
1.9.1	Linéarisation et variables d'écart	28
1.9.2	Quelques propriétés de la transformation de Laplace	29
1.9.3	Fonctions de transfert	32
1.9.4	Pôles et zéros d'une fonction de transfert	40
1.9.5	Analyse qualitative de la réponse d'un système	40
1.10	Systèmes linéaires dans l'espace d'état	43
1.10.1	Cas général	43
1.10.2	Représentation analogique	45
1.11	Comportement dynamique de procédés simples	47
1.11.1	Systèmes de premier ordre	47
1.11.2	Systèmes intégrateurs	48
1.11.3	Systèmes de second ordre	50
1.11.4	Systèmes d'ordre supérieur	54
1.11.5	Identification de modèles continus de procédés	61
2	Commande linéaire à contre réaction	69
2.1	Conception d'une boucle de contre réaction	69
2.1.1	Diagramme de blocs de la boucle de contre réaction	69
2.1.2	Types généraux de régulateurs	71
2.1.3	Organes de mesures : capteurs	73
2.1.4	Lignes de transmission	74
2.1.5	Actionneurs	74
2.2	Diagramme de blocs, graphes de fluence, règles de calcul	76
2.3	Dynamique des procédés commandés par contre réaction	84

2.3.1	Etude des différentes actions	88
2.3.2	Influence de l'action proportionnelle	88
2.3.3	Influence de l'action intégrale	92
2.3.4	Influence de l'action dérivée	95
2.3.5	Résumé des caractéristiques des régulateurs	99
3	Analyse de stabilité	105
3.1	Cas d'un système défini par sa fonction de transfert	105
3.2	Analyse dans l'espace d'état	106
3.2.1	Analyse d'un système linéaire dans l'espace d'état	106
3.2.2	Analyse générale pour un système continu non linéaire	107
3.2.3	Cas d'un système continu linéaire	112
3.2.4	Cas d'un système continu non linéaire: le réacteur de polymérisation	114
3.3	Analyse de stabilité des systèmes à rétroaction	119
3.3.1	Critère de Routh-Hurwitz	120
3.3.2	Analyse du lieu des racines	122
3.3.3	Méthode fréquentielle	126
4	Synthèse des régulateurs par bouclage	129
4.1	Critères de performance	129
4.2	Caractéristiques de la réponse transitoire	130
4.3	Critères d'intégrale d'erreur et conception de la commande	132
4.4	Choix du régulateur PID	133
4.4.1	Remarques générales	133
4.4.2	Recommandations	134
4.5	Réglage des régulateurs PID	136
4.5.1	Réglage par essai-erreur	136
4.5.2	Méthode d'oscillation entretenue	136
4.5.3	Méthode d'oscillation par relais	137
4.5.4	Méthode de la courbe de réaction du procédé	142
4.5.5	Réglage de Tavakoli et Fleming pour les régulateurs PI	145
4.5.6	Réglage robuste pour régulateurs PID	145
4.6	Amélioration des PID	146
4.6.1	Régulateur PID avec action dérivée sur la sortie mesurée	146
4.6.2	Utilisation d'une trajectoire de référence	147
4.6.3	Régulateur PID discrétisé	148
4.6.4	Anti-emballement du régulateur	149
4.6.5	Régulation PID par commande tout ou rien	150
4.6.6	Régulation de pH	152
4.7	Méthode de synthèse directe	158
4.8	Commande par modèle interne	158
4.9	Placement de pôles	164
4.9.1	Robustesse de la commande par placement de pôles	170
4.9.2	Régulateur à retour de sortie unitaire	172
4.10	Commande linéaire quadratique	172
4.10.1	Comportement en régulation	173
4.10.2	Comportement en poursuite	173

5	Analyse fréquentielle	181
5.1	Réponse d'un système linéaire à une entrée sinusoïdale	181
5.1.1	Cas d'un procédé de premier ordre	181
5.1.2	Note sur les nombres complexes	183
5.1.3	Cas d'un procédé linéaire quelconque	184
5.1.4	Cas de systèmes linéaires en série	185
5.2	Représentation graphique	185
5.2.1	Diagramme de Bode	185
5.2.2	Système d'ordre n	187
5.2.3	Diagramme de Nyquist	189
5.2.4	Système d'ordre n	191
5.2.5	Diagramme de Black	192
5.3	Caractérisation d'un système par analyse fréquentielle	192
5.4	Réponse fréquentielle des régulateurs à rétroaction	193
5.4.1	Régulateur proportionnel	193
5.4.2	Régulateur proportionnel-intégral	193
5.4.3	Régulateur proportionnel-dérivé idéal	194
5.4.4	Régulateur proportionnel-intégral-dérivé	196
5.5	Critère de stabilité de Bode	198
5.6	Marge de gain et marge de phase	203
5.6.1	Marge de gain	203
5.6.2	Marge de phase	204
5.7	Critère de stabilité de Nyquist	208
5.8	Réponse fréquentielle en boucle fermée	211
5.9	Principe de modèle interne	217
5.10	Robustesse	217
5.11	Résumé pour la conception	232
6	Amélioration des systèmes de commande	235
6.1	Compensation du retard pur	235
6.2	Compensation du phénomène de réponse inverse	237
6.3	Commande en cascade	239
6.4	Commande sélective	245
6.5	Commande partagée	246
6.6	Commande par anticipation ("feedforward")	246
6.6.1	Généralités	246
6.6.2	Application en distillation	247
6.6.3	Synthèse d'un régulateur par anticipation	248
6.6.4	Réalisation d'un régulateur par anticipation	250
6.6.5	Commande par anticipation et rétroaction	252
6.7	Commande par rapport	253
7	Représentation d'état, commandabilité, observabilité	257
7.1	Représentation d'état	257
7.1.1	Système monovisible	257
7.1.2	Système multivisible	258
7.2	Commandabilité	259
7.3	Observabilité	263
7.4	Réalisations	266
7.5	Remarque sur la commandabilité et l'observabilité en discret	271

II	Commande multivariable	273
8	Commande multivariable par matrice de fonctions de transfert	275
8.1	Représentation d'un procédé multivariable par matrice de fonctions de transfert	275
8.2	Etude de stabilité	277
8.2.1	Forme de Smith-McMillan	278
8.2.2	Pôles et zéros d'une matrice de fonctions de transfert	278
8.2.3	Critère de Nyquist généralisé	278
8.2.4	Lieux caractéristiques	279
8.2.5	Cercles de Gershgorin	280
8.2.6	Indice de Niederlinski	281
8.3	Interaction et découplage	281
8.3.1	Découplage pour un système 2×2	282
8.3.2	Rejet de perturbations	283
8.3.3	Décomposition en valeurs singulières	283
8.3.4	Matrice de gain relatif	284
8.3.5	Cercles de Gershgorin et interaction	290
8.4	Robustesse multivariable	290
8.5	Etude de robustesse d'une colonne de distillation 2×2	294
8.5.1	Analyse du découplage simplifié	294
8.5.2	Analyse du découplage idéal	295
8.5.3	Analyse du découplage unilatéral	296
8.5.4	Comparaison des trois découplages précédents	296
8.6	Synthèse d'une commande multivariable	296
8.6.1	Réglage des correcteurs	297
8.7	Commande multivariable discrète par modèle interne	298
III	Identification en temps discret	303
9	Généralités sur les signaux	305
9.1	Transformation de Fourier et traitement du signal	305
9.1.1	Transformée de Fourier continue	306
9.1.2	Transformée de Fourier discrète	311
9.1.3	Signaux aléatoires	315
9.1.4	Signaux aléatoires stationnaires	316
9.1.5	Résumé	317
9.2	Echantillonnage	318
9.2.1	Conversions AN et NA	318
9.2.2	Choix de la période d'échantillonnage	319
9.3	Filtrage	325
9.3.1	Filtre de premier ordre	326
9.3.2	Filtre de deuxième ordre	327
9.3.3	Filtre à moyenne mobile	327
9.3.4	Filtre ébarbeur	328
9.4	Temps discret et modèles de différences finies	329
9.5	Différentes représentations discrètes d'un système	330
9.5.1	Représentation discrète: Transformation en z	330
9.5.2	Conversion d'une description continue en temps discret	349

9.5.3	Opérateurs	352
10	Principes de l'identification	359
10.1	Description du système	359
10.1.1	Système sans perturbation	359
10.1.2	Représentation d'une perturbation	360
10.2	Identification non paramétrique	361
10.2.1	Identification fréquentielle	361
10.2.2	Identification par analyse de corrélation	362
10.2.3	Identification spectrale	363
10.3	Identification paramétrique	367
10.3.1	Principes de prédiction	367
10.3.2	Prédiction à un pas	367
10.3.3	Prédiction à p pas	372
11	Modèles et méthodes pour l'identification paramétrique	375
11.1	Structure des modèles pour l'identification paramétrique	375
11.1.1	Modèles linéaires de fonctions de transfert	375
11.1.2	Modèles pour l'estimation dans l'espace d'état	385
11.2	Modèles de systèmes linéaires dépendant du temps	393
11.3	Linéarisation de modèles non linéaires dépendant du temps	393
11.4	Principes de l'estimation paramétrique	394
11.4.1	Minimisation des erreurs de prédiction	394
11.4.2	Régressions linéaires et moindres carrés	395
11.4.3	Méthode du maximum de vraisemblance	398
11.4.4	Corrélation des erreurs de prédiction avec les données passées	401
11.4.5	Méthode de la variable instrumentale	402
12	Algorithmes d'estimation paramétrique	407
12.1	Régression linéaire et moindres carrés	407
12.2	Méthodes de gradient	409
12.2.1	Méthode de gradient basée sur l'erreur a priori	409
12.2.2	Méthode de gradient basée sur l'erreur a posteriori	413
12.3	Algorithmes récursifs	415
12.3.1	Moindres Carrés Récursifs Simples	415
12.3.2	Moindres Carrés Récursifs Etendus	423
12.3.3	Moindres Carrés Récursifs Généralisés	423
12.3.4	Maximum de Vraisemblance Récursif	424
12.3.5	Méthode d'Erreur de Prédiction Récursive	425
12.3.6	Méthode de la Variable Instrumentale	428
12.3.7	Méthode d'erreur de sortie	428
12.4	Robustification des algorithmes	429
12.5	Validation	431
12.6	Suites d'entrée pour l'identification	432
12.6.1	Suite binaire pseudo aléatoire	432
12.6.2	Autres suites pour l'identification	434
12.7	Exemples d'identification	440
12.7.1	Exemple académique d'un système de second ordre	440
12.7.2	Identification d'un réacteur chimique simulé	445

IV	Commande en temps discret	451
13	Commande numérique	453
13.1	Commande par placement de pôles	453
13.1.1	Influence de la position des pôles	453
13.1.2	Synthèse de la commande par placement des pôles	453
13.1.3	Relation entre le placement de pôles et le retour d'état	460
13.1.4	Synthèse générale du placement de pôles	463
13.1.5	Régulateur PID numérique	470
13.2	Commande par modèle interne discrète	472
13.3	Généralités sur la commande adaptative	479
14	Commande optimale	483
14.1	Introduction	483
14.2	Position du problème	484
14.3	Méthode variationnelle classique dans le cadre mathématique	486
14.3.1	Variation du critère	487
14.3.2	Problème variationnel sans contraintes, à limites fixes	488
14.3.3	Problème variationnel avec contraintes, cas général	489
14.3.4	Equation de Hamilton-Jacobi	491
14.4	Commande optimale	493
14.4.1	Méthodes variationnelles	493
14.4.2	Variation du critère	494
14.4.3	Equations d'Euler	496
14.4.4	Condition de Weierstrass et maximisation du hamiltonien	498
14.4.5	Equation de Hamilton-Jacobi	498
14.4.6	Principe du maximum	501
14.4.7	Arcs singuliers	503
14.4.8	Problèmes numériques	510
14.5	Programmation dynamique	515
14.5.1	Programmation dynamique classique	515
14.5.2	Equation de Hamilton-Jacobi-Bellman	520
14.6	Commande linéaire quadratique	521
14.6.1	Commande linéaire quadratique en temps continu	521
14.6.2	Commande linéaire quadratique gaussienne	528
14.6.3	Commande linéaire quadratique en temps discret	535
15	Commande prédictive	547
15.1	Intérêt de la commande prédictive généralisée	547
15.2	Bref aperçu de l'évolution de la commande prédictive	548
15.3	Commande prédictive généralisée simple	549
15.3.1	Présentation théorique	549
15.3.2	<i>Exemple</i> numérique: Commande prédictive généralisée d'un réacteur chimique	552
15.3.3	La CPG vue comme un placement de pôles	554
15.4	Commande prédictive généralisée avec modèle de référence multiple	555
15.4.1	Présentation théorique	555
15.4.2	<i>Exemple</i> numérique: Commande prédictive généralisée avec modèle de performance d'un réacteur chimique	558
15.5	Commande avec modèle de référence sur l'état partiel	559

15.6	Commande prédictive généralisée d'un réacteur chimique	560
16	Commande prédictive basée sur le modèle	567
16.1	Une vue générale de la commande prédictive basée sur le modèle	567
16.2	Commande prédictive linéaire basée sur le modèle	573
16.2.1	En absence de contraintes	573
16.2.2	En présence de contraintes	573
16.2.3	Brève description de IDCOM	573
16.2.4	Commande dynamique matricielle (Dynamic Matrix Control DMC)	574
16.2.5	Commande matricielle dynamique quadratique: Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC)	580
16.2.6	Formulation dans l'espace d'état de DMC	585
16.2.7	Commande prédictive linéaire dans l'espace d'état: OBMPC	587
16.2.8	Commande prédictive linéaire basée sur le modèle en tant qu'optimisation générale	590
16.3	Commande prédictive non linéaire	591
16.3.1	Commande dynamique matricielle non linéaire: Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control (NLQDMC)	591
16.3.2	Autres approches de la commande prédictive non linéaire	593
16.4	Commande prédictive basée sur le modèle d'un FCC	596
16.4.1	Modélisation du FCC	596
V	Commande non linéaire	611
17	Commande géométrique non linéaire	613
17.1	Quelques notions de linéaire utiles en non linéaire	614
17.1.1	Influence d'un changement de coordonnées en linéaire	614
17.1.2	Degré relatif	615
17.1.3	Forme normale et degré relatif	616
17.1.4	Dynamique des zéros	618
17.1.5	Retour d'état statique	618
17.1.6	Placement de pôles par retour d'état statique	619
17.1.7	Placement de pôles entrée-sortie	621
17.2	Commande non linéaire monovariante	621
17.2.1	Quelques notions de géométrie différentielle	621
17.2.2	Degré relatif d'un système non linéaire monovariante	623
17.2.3	Théorème de Frobenius	624
17.2.4	Changement de coordonnées	625
17.2.5	Forme normale	626
17.2.6	Commandabilité et observabilité	627
17.2.7	Principe de la linéarisation par bouclage	628
17.2.8	Linéarisation exacte entrée-états pour un système de degré relatif égal à n	629
17.2.9	Linéarisation entrée-sortie d'un système de degré relatif r inférieur ou égal à n	631
17.2.10	Dynamique des zéros	632

17.2.11	Stabilité asymptotique	634
17.2.12	Poursuite d'une trajectoire de référence	636
17.2.13	Découplage par rapport à une perturbation	637
17.2.14	Cas de systèmes à non-minimum de phase	638
17.2.15	Commande globalement linéarisante	638
17.3	Commande non linéaire multivariable	639
17.3.1	Degré relatif	640
17.3.2	Changement de coordonnées	641
17.3.3	Forme normale	641
17.3.4	Dynamique des zéros	642
17.3.5	Linéarisation exacte par retour d'état et difféomorphisme	642
17.3.6	Commande non linéaire parfaitement découplée par retour d'état statique	643
17.3.7	Obtention d'un degré relatif par extension dynamique	644
17.3.8	Commande adaptative non linéaire	645
17.4	Applications de commande non linéaire géométrique	646
18	Observateurs d'état	651
18.1	Introduction	651
18.1.1	Capteurs indirects	652
18.1.2	Principe d'un observateur	652
18.2	Estimation paramétrique	653
18.3	Estimation statistique	653
18.3.1	A propos des données	654
18.3.2	Analyse en Composantes Principales	654
18.3.3	Moindres Carrés Partiels (Partial Least Squares)	656
18.4	Observateurs	658
18.4.1	Observateur de Luenberger	658
18.4.2	Filtre de Kalman linéaire	661
18.4.3	Filtre de Kalman étendu (EKF) sous forme continue-discrète	663
18.4.4	Filtre de Kalman inodore	665
18.4.5	Filtres à particules	668
18.4.6	Filtre d'ensemble de Kalman	673
18.4.7	Observateur globalement linéarisant	675
18.4.8	Observateur à grand gain	676
18.4.9	Estimation à horizon glissant	679
18.5	Conclusion	683
VI	Applications aux procédés	691
19	Commande non linéaire de réacteurs avec estimation d'état	693
19.1	Introduction	693
19.2	Réacteur chimique	693
19.2.1	Modèle du réacteur chimique	694
19.2.2	Position du problème de commande	695
19.2.3	Obtention de la loi de commande	697
19.2.4	Estimations des états	698
19.2.5	Résultats de simulation	700

19.3	Réacteur biologique	704
19.3.1	Introduction	704
19.3.2	Modèle dynamique du réacteur biologique	705
19.3.3	Synthèse de la loi de commande non linéaire	706
19.3.4	Conditions de simulation	709
19.3.5	Résultats de simulation	710
19.3.6	Conclusion	710
20	Commande de colonnes de distillation	715
20.1	Généralités sur le fonctionnement des colonnes de distillation	715
20.2	Modèle dynamique de la colonne de distillation	718
20.3	Généralités sur la conduite des colonnes de distillation	722
20.4	Différents types de commande des colonnes de distillation	723
20.4.1	Commande monovariable	723
20.4.2	Commande duale par découplage	724
20.4.3	La colonne vue comme un système 5×5	728
20.4.4	Commande numérique linéaire	732
20.4.5	Commande prédictive basée sur le modèle	734
20.4.6	Modèles bilinéaires	734
20.4.7	Commande non linéaire	737
20.5	Conclusion	740
21	Exemples et problème-tests de procédés typiques	745
21.1	Procédés simple entrée-simple sortie	745
21.1.1	Description par fonctions de transfert	745
21.1.2	Description par un modèle de connaissance	746
21.1.3	Description par un modèle linéaire dans l'espace d'état	751
21.2	Procédés multivariables	752
21.2.1	Matrices de fonctions de transfert continues	752
21.2.2	Description par un modèle linéaire dans l'espace d'état	754
21.2.3	Description par un modèle de connaissance dans l'espace d'état	755
21.2.4	Modèles continus dans l'espace d'état	756

Commande des procédés

Cette troisième édition a été enrichie par l'introduction de nouveaux exemples et de méthodes récentes. En un volume unique, le livre propose une synthèse progressive et approfondie des principales méthodes de commande exposées sous forme théorique et illustrées sur des exemples variés de procédés : réacteurs chimiques, biologiques, de polymérisation, craqueur catalytique, colonne de distillation. Les six parties couvrent la modélisation et la commande continue monovariable, la commande multivariable par fonction de transfert, l'identification et la commande en temps discret, la commande optimale et prédictive multivariable, la commande non linéaire et les observateurs d'état.

Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux étudiants de 2^e et 3^e cycle qu'aux chercheurs, enseignants et ingénieurs.

Jean-Pierre Corriou est professeur à l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy – Université de Lorraine, et effectue des travaux de recherche en simulation et commande des procédés au sein du Laboratoire de Réactions et Génie des Procédés.

Génie des procédés de l'École de Nancy

www.lavoisier.fr



978-2-7430-1471-1