

# Commande moderne

La commande moderne qui fait appel à la description de systèmes au moyen de variables d'état est un outil indispensable pour la conception de systèmes de commande efficaces. Elle permet de mieux comprendre les propriétés des systèmes et de mieux dimensionner les compensations nécessaires à leur asservissement en vue d'en assurer la stabilisation et d'en améliorer les performances. L'ouvrage *Commande moderne – Approche par modèles continus et discrets* vise à initier le lecteur à la représentation de systèmes par des variables d'état ainsi qu'aux principaux outils de conception et de réalisation analogiques et numériques de la commande moderne de systèmes linéaires. Il présente d'abord les bases mathématiques requises pour la compréhension de la matière, puis étudie en détail les principes de modélisation, de stabilité, de commandabilité, d'observabilité et de réalisation. Il aborde de plus les domaines de la commande optimale et de la commande stochastique.

L'ouvrage privilégie une approche didactique basée sur la présentation intuitive des concepts de la commande, puis sur leur développement à l'aide d'outils mathématiques simples. Les nombreuses démonstrations sont étayées par des exemples pertinents.

Le livre *Commande moderne – Approche par modèles continus et discrets* est d'abord destiné aux étudiants en génie électrique, mais il intéressera sans aucun doute les praticiens de l'automatique qui désirent approfondir leurs connaissances en la matière.

**David Bensoussan est détenteur d'un doctorat en génie électrique de l'Université McGill. Il est professeur au Département de génie électrique de l'École de technologie supérieure de l'Université du Québec. Ses pôles d'intérêt en recherche couvrent les télécommunications et l'automatique. Il est l'auteur de nombreux ouvrages didactiques et publications scientifiques ainsi que de plusieurs brevets.**

Approche par modèles continus et discrets



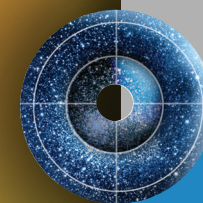
Commande moderne  
Approche par modèles continus et discrets

David Bensoussan



# Commande moderne

Approche par modèles continus et discrets



David Bensoussan

ISBN 978-2-553-01417-8



9 782553 014178



PRESSES INTERNATIONALES  
POLYTECHNIQUE

www.polymtl.ca/pub

PRESSES INTERNATIONALES  
POLYTECHNIQUE

# Commande moderne

## Approche par modèles continus et discrets

### CLIENTÈLE CIBLE

La commande moderne faisant appel à la description de systèmes au moyen de variables d'état constitue un outil de conception incontournable des systèmes de commande actuels. Elle facilite la compréhension des propriétés des systèmes et permet de mieux dimensionner les compensations nécessaires à leur asservissement pour en assurer la stabilisation et en améliorer les performances.

*Commande moderne – Approche par modèles continus et discrets* vise à initier l'étudiant à la représentation de systèmes par des variables d'état ainsi qu'aux principaux outils de conception et de réalisation de la commande moderne, incluant la commande optimale et la commande stochastique. Il traite des grands axes de la commande moderne : stabilité, commandabilité, observabilité, réalisation de Kalman, commande optimale et filtrage de Kalman.

L'approche didactique privilégiée consiste à présenter les concepts de la commande de façon intuitive, puis à les développer à l'aide d'outils mathématiques simples.

L'ouvrage est d'abord destiné aux étudiants en génie électrique, mais il intéressera aussi les praticiens de l'automatique.

### ORIGINALITÉ

Comment présenter un domaine du génie faisant appel à des notions mathématiques relativement complexes tout en gardant à l'esprit les objectifs de conception de commande ? En ayant recours aux outils mathématiques les plus simples et en les illustrant par des exemples que le lecteur peut vérifier par simple calcul manuel, en formulant les objectifs de commande par variables d'état sous différentes perspectives et en concrétisant les thèmes étudiés par des exemples d'application résolus en détail. Ainsi les paramètres de la commande et les notions mathématiques s'imbrquent-ils pour former un tout cohérent et complet. C'est le défi que relève cet ouvrage.

### Presses internationales Polytechnique

C.P. 6079, succ. Centre-ville  
Montréal (Québec) H3C 3A7  
CANADA  
Téléphone : 514 340-3286  
Télécopieur : 514 340-5882  
pip@polymtl.ca  
www.polymtl.ca/pub

### SUJET

Dans les premiers chapitres, les notions mathématiques préalables font l'objet d'un rappel et sont explicitées par des exemples pertinents afin d'en faciliter l'étude par des lecteurs de formations diversifiées. Dans les chapitres subséquents, les principes de base qui permettent d'atteindre des objectifs de stabilisation et d'amélioration des performances sont examinés. Les thèmes de modélisation, de stabilité, de commandabilité, d'observabilité et de réalisation sont étudiés avant que soient abordés les domaines de la commande optimale et de la commande stochastique. L'ouvrage comporte de nombreux cas d'application, en particulier celui du pendule inversé, repris dans plusieurs chapitres.

À la fin de chaque chapitre, une section propose des problèmes qui reprennent les principes d'application de la commande nécessitant des développements théoriques complémentaires ou qui introduisent des notions de domaines avancés de la commande.

Tout au long de l'ouvrage, les différents thèmes sont traités pour des systèmes représentés dans le domaine continu (transformation de Laplace) et dans le domaine discret (transformation en Z).

### AUTEUR

**David Bensoussan** est détenteur d'un doctorat en génie électrique de l'Université McGill. Il est professeur au Département de génie électrique de l'École de technologie supérieure de l'Université du Québec. Reçu *Senior Member* de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) et *Fellow Member* de l'Institute of Electrical Engineers (IEE), il a également été lauréat de la fondation japonaise Matsumae. Il est l'auteur de nombreux ouvrages didactiques et de publications scientifiques ainsi que de plusieurs brevets dans le domaine de l'énergie. Ses pôles d'intérêt en recherche couvrent les télécommunications et l'automatique. Il a contribué aux premières formulations de la commande  $H_\infty$  étendue aux systèmes multivariables et de la commande quasi linéaire.

### Technique et Documentation — Lavoisier

11, rue Lavoisier  
75008 Paris  
France  
Téléphone : 33 (0) 1 42 65 39 95  
Télécopieur : 33 (0) 1 42 65 02 46  
Courriel : magasin@lavoisier.fr  
www.lavoisier.fr



## CONTENU

### Chapitre 1 Introduction à la théorie de la commande moderne

Classification des systèmes. Commande en boucle ouverte et commande en boucle fermée. Représentation des processus. Commande classique, commande moderne et commande robuste. Plan de l'ouvrage.

### Chapitre 2 Fonctions de variables complexes

Transformation de Fourier. Transformation de Laplace. Application de la transformation de Laplace aux équations différentielles. Systèmes échantillonnés. Transformation en Z. Application de la transformation en Z aux équations aux différences. Transformation inverse de Laplace. Transformation inverse en Z. Transformation W. Agrégation de systèmes décrits par leur fonction de transfert en S. Agrégation de systèmes décrits par leur fonction de transfert en Z.

### Chapitre 3 Révision d'algèbre linéaire

Matrices. Valeurs propres, vecteurs propres et valeurs singulières d'une matrice. Matrices définies positives. Équation de Lyapunov. Solution d'équations algébriques linéaires. Vecteurs, bases et changements de base.

### Chapitre 4 Objectifs de performance

Caractéristiques d'un système dynamique. Objectifs de performance temporelle. Étude temporelle des fonctions de transfert du premier et du second ordre : caractéristiques en régime transitoire. Étude temporelle : le cas discret. Compensation de type proportionnel, intégral ou différentiel. Objectifs de performance fréquentiels. Critères de performance temporels et fréquentiels. Performance en régime permanent.

### Chapitre 5 Description de systèmes dynamiques par variables d'état

Analyse des systèmes dynamiques. Représentation par variables d'état. Formes canoniques. Linéarisation de systèmes non linéaires. Agrégation de systèmes décrits par des variables d'état. Fonction de transfert d'un système décrit par des variables d'état. Systèmes discrets décrits par des variables d'état. Pendule inversé.

### Chapitre 6 Solution générale de l'équation d'état

Calcul de la matrice de transition. Propriétés des matrices de transition. Solution générale de l'équation d'état. Systèmes discrets décrits par des variables d'état.

### Chapitre 7 Commandabilité et observabilité de systèmes dynamiques

Définitions. Illustration de la commandabilité et de l'observabilité. Critère de commandabilité. Critères d'observabilité. Principe de la dualité. Commandabilité dans le domaine discret. Observabilité dans le domaine discret. Stabilisabilité d'un système. Déteçtabilité d'un système. Problème du pendule inversé.

### Chapitre 8 Stabilité et placement des pôles

Stabilité des systèmes. Stabilisation par retour d'état. Placement de pôles dans le cas d'une forme canonique de commandabilité. Placement de pôles dans le plan discret. Formule générale du compensateur pour le placement de pôles. Stabilisation par retour de sortie. Problème du pendule inversé.

### Chapitre 9 Observateurs

Construction d'un observateur. Observabilité et construction d'un observateur. Principe de séparation. Observateurs dans le plan discret. Observateurs d'ordre réduit. Choix de l'estimation de la valeur initiale. Méthode des perturbations singulières.

### Chapitre 10 Formes canoniques et réalisations

Systèmes monoentrée. Décomposition d'un système en sous-systèmes commandables et/ou observables. Propriétés des représentations minimales. Systèmes multientrées.

### Chapitre 11 Commande optimale

Définition du problème. Étude de la fonction de transfert d'un système monoentrée-monosortie avec commande optimale. Propriétés de la boucle fermée. Commande optimale. Étude du cas discret.

### Chapitre 12 Introduction au filtrage de Kalman

Notions de probabilité. Notions de stochastique. Entrées et sorties d'un filtre de Kalman. Filtre de Kalman continu. Stabilité du filtre de Kalman. Filtre de Kalman étendu aux systèmes non linéaires. Récapitulation du filtre de Kalman.

Annexes  
Bibliographie  
Index