

GEI-720
MODÉLISATION ET COMMANDE MULTIVARIABLES

Jean de Lafontaine

CHAPITRE 1

Introduction

Connaissances et compétences

- Connaître la nature et les exigences des systèmes "complexes"
- Connaître l'évolution de la commande classique à la commande moderne
- Reconnaître les différences entre la commande classique et la commande moderne
- Connaître les éléments d'un système de commande multivariable

Contenu de ce chapitre

1	INTRODUCTION.....	1-1
1.1	Définitions.....	1-1
1.2	Commande classique et commande moderne	1-2
1.3	Utilités de la modélisation et de la commande multivariables.....	1-5
1.4	Applications de la modélisation et de la commande multivariables	1-5

1 INTRODUCTION

1.1 DÉFINITIONS

- **Système**

Agencement organisé de composants qui se coordonnent pour assurer une fonction déterminée ou pour concourir à un résultat désiré.

- chaque élément d'un système peut être un système en soi (appelés sous-systèmes)
- un système produit des résultats ou des effets (appelées sorties) à partir d'objectifs ou de causes (appelées entrées)

- **Systèmes "complexes"**

Systèmes qui ont une ou plusieurs des caractéristiques suivantes:

- système qui intègre plus d'une discipline des sciences physiques (e.g. mécanique, électrique, fluide, thermodynamique, aérodynamique, pneumatique, chimie, etc)
- système dont la réalisation requiert la coordination de plusieurs équipes de travail
- système qui comporte une structure hiérarchique sur plusieurs niveaux, à partir des composantes de base, en passant par les sous-systèmes, jusqu'au système complet
- système qui, à cause de son coût, de sa complexité ou des dangers qu'il représente, doit être conçu à un très haut niveau de détail avant que la réalisation sur matériel ne soit initiée, d'où la nécessité de représenter le système sous forme de modèle mathématique
- système qui a une autonomie intégrée, qui a une certaine "intelligence" embarquée, lui permettant de prendre des décisions autonomes (i.e. sans intervention humaine).

- **Modèle**

La description et la représentation, sous formes de symboles et de relations symboliques, des lois qui régissent le fonctionnement d'un système.

- **Modèle mathématique**

Représentation sous forme de relations logiques/algébriques/différentielles/intégrales.

- **Modèle mathématique multivariable**

Un modèle multivariable est un modèle mathématique qui est soumis à des entrées multiples, qui produit des sorties multiples (SIMO, MISO, MIMO) et qui possède plusieurs variables internes (variable d'état) qui déterminent en tout temps l'état dynamique du système.

- Les modèles de systèmes complexes sont normalement des modèles multivariables.

- **Commande multivariable**

La théorie et la pratique de l'asservissement de systèmes représentés par des modèles multivariables et qui utilise les variables d'état dans le calcul des lois de commande.

- **Commande moderne**

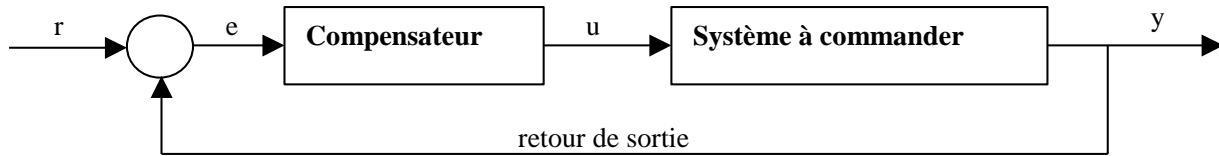
Terme utilisé pour la commande multivariable, par opposition à la commande "classique" à entrée-sortie uniques et qui utilise uniquement les variables d'entrée et de sortie (PID et avance-retard de phase).

1.2 COMMANDE CLASSIQUE ET COMMANDE MODERNE

- **Commande classique**

- ⇒ Les techniques de conception de l'asservissement sont basées sur le lieu des racines (plan s) et la réponse en fréquence obtenus à partir d'un modèle de type **fonction de transfert**.
- ⇒ Les lois de commande sont calculées à partir de la sortie: rétroaction par "retour de sortie"

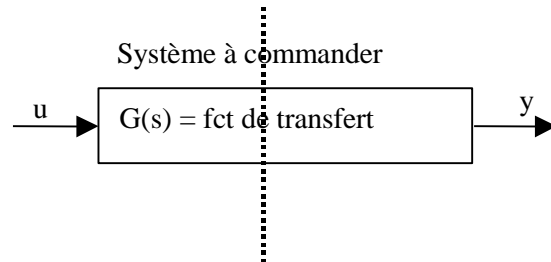
Commande classique



- **Commande moderne**

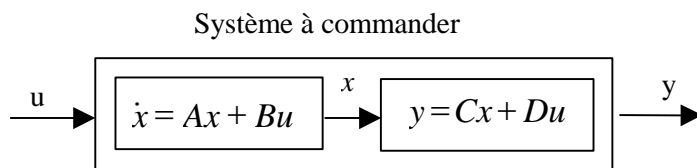
- ⇒ Les techniques de conception de l'asservissement sont basées sur un modèle temporel multivariable du système, i.e. un modèle de type **variables-d'état**.
- ⇒ Les lois de commande sont calculées à partir des variables d'état ("retour d'état") ou des variables de sortie.
- ⇒ Deux types d'asservissements: les **régulateurs** et les **suiveurs**,

Modèle fonction-de-transfert ⇒



Modèle variables-d'état

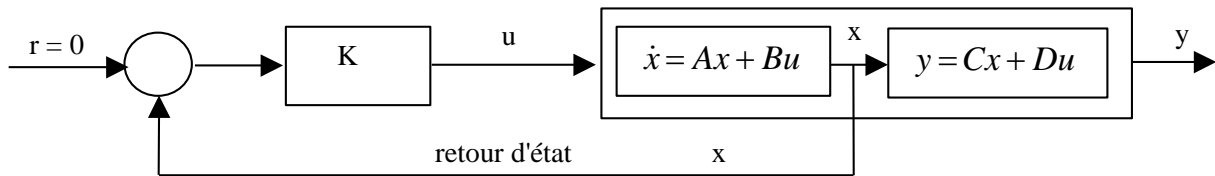
⇒



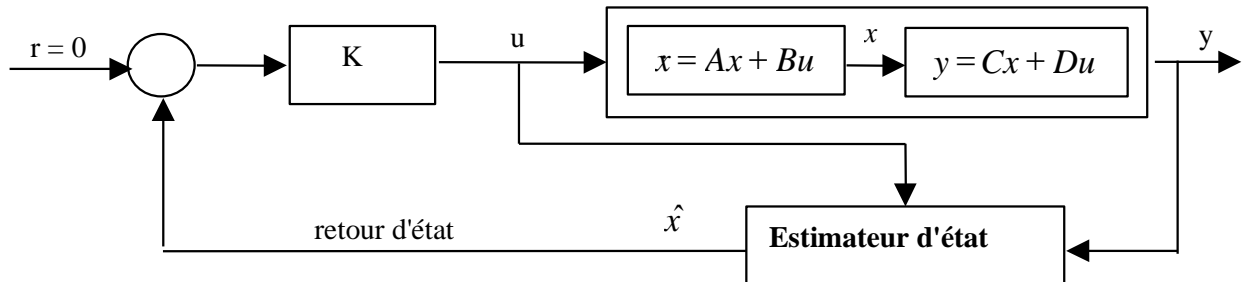
$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu && \text{équation d'état} \\ y &= Cx + Du && \text{équation de sortie} \\ x &= \text{matrice-colonne des variables d'état}\end{aligned}$$

Commande moderne

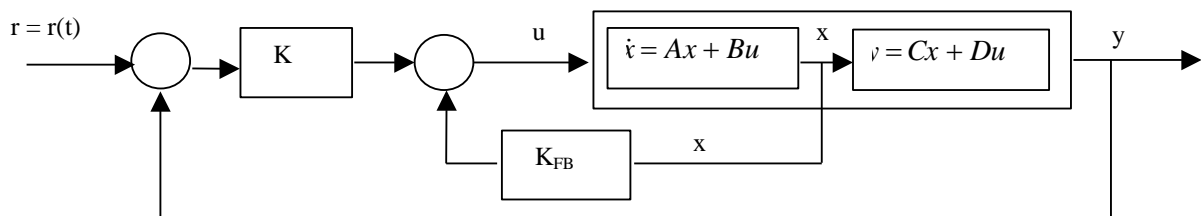
Régulateur à retour d'état



Régulateur avec estimateur d'état



Suiveur (traqueur)



Comparaison : commande classique et commande moderne

Commande classique	Commande moderne
utilisée pour des modèles à entrée-sortie unique, de type fonction de transfert, dans le plan s et/ou des fréquences	utilisée pour des modèles à entrées-sorties multiples, de type variable-d'état (A,B,C,D), dans le domaine du temps
le retour de sortie (<i>output feedback</i>) est utilisé comme signal de rétroaction	le retour d'état (<i>state feedback</i>) ou le retour des sorties est utilisé comme rétroaction
seul un modèle de la dynamique entrée-sortie est requis dans la conception	un modèle de la dynamique interne du système est requis (variables d'état)
l'asservissement contient normalement 2 ou 3 paramètres de commande à ajuster	l'asservissement contient des matrices de paramètres de commande à ajuster
il y a un lien direct entre les paramètres de commande et les paramètres physiques (e.g. PID); le design intuitif est possible	le monde physique est séparé des paramètres de commande par des calculs mathématiques complexes qui obscurcissent le design; perte de l'intuition
possibilités de commande optimale plutôt limitées (nombre limité de paramètres)	permet la commande optimale (temps minimum, erreur minimum, énergie minimum, etc.)
il est possible de faire un design de compensateur par calculs à la main ou par construction graphique	le design de compensateur nécessite d'importants calculs et solution d'équations algébriques/différentielles matricielles
le système asservi possède une robustesse naturelle aux erreurs dans le modèle	la robustesse du design (dans le cas du retour des sorties) n'est pas assurée
le design par le lieu des racines a pour objectif le positionnement de 2 ou 3 pôles dominants, selon la réponse désirée	le design par le lieu des racines permet de placer tous les pôles du système (si certaines conditions sont remplies)
le design par la réponse en fréquence (amplitude et phase) a pour objectif l'assurance d'une tolérance aux retards et aux variations de gain dans la boucle de commande (marges de gain, de phase)	le design par la réponse en fréquence doit être généralisé (valeurs singulières) et a pour objectif l'assurance de la robustesse du design aux erreurs/omissions dans le modèle mathématique utilisé
le design du système de commande peut être exécuté sans aucun modèle mathématique du système (e.g. tracé de Bode)	la performance du système de commande est dépendante de la précision du modèle mathématique utilisé dans la conception
adaptée aux technologies analogue (ampli-op) et numérique (μp , DSP)	liée à la technologie numérique seulement
adaptée à la commande de systèmes relativement simples	adaptée à la commande de systèmes "complexes"

Pour un système multivariable avec r entrées et p sorties, peut-on faire le design de l'asservissement en appliquant les techniques de commande classique (lieu des racines, lieu de Bode) pour chacune des $r \cdot p$ fonctions de transfert, en fermant les boucles une à la fois?

1.3 UTILITÉS DE LA MODÉLISATION ET DE LA COMMANDE MULTIVARIABLES

- Utilités de la modélisation et de la commande multivariables:
 - pour les systèmes complexes, dont l'ordre du modèle est souvent très élevé, l'approche par fonctions de transfert donne de faux résultats à cause des problèmes numériques engendrés; on ne retrouve pas ces problèmes avec un modèle temporel variable-d'état
 - avec un modèle multivariable, la commande peut utiliser beaucoup plus d'information dans la rétroaction (en fait, toutes les variables internes) et peut donc permettre une commande plus complète, plus efficace et plus performante du système qu'il est possible de le faire avec la modélisation et la commande classiques; sous certaines conditions, on peut "refaire" la dynamique complète du système (*replacer tous les pôles du système*)
 - presque toutes les techniques de conception d'asservissements qui permettent une performance optimale du système en boucle fermée (i.e. minimiser ou maximiser des critères de performance) sont basées sur les modèles et la commande multivariables
 - l'utilisation de modèles multivariables permet des changements de base dans lesquelles certaines propriétés du système sont mises en évidence (commandabilité, observabilité, relative importance des modes et simplification du modèle) et permet ainsi une meilleure compréhension du système à commander.
- Inconvénients de la modélisation et de la commande multivariables:
 - exigent un modèle mathématique du système à commander et engendre donc une dépendance de la performance sur la qualité du modèle (problème de robustesse)
 - exigent souvent des calculs (*on-line* et *off-line*) plus complexes que la commande classique

1.4 APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION ET DE LA COMMANDE MULTIVARIABLES

- Contrôle de procédés : industrie chimique, pharmaceutique, pâtes et papier, métallurgie
- Commande et contrôle de processus biologiques: cancer, anomalies cardiaques, respiratoires.
- Commande de systèmes mécatroniques complexes:
centrale nucléaire, satellite/véhicule d'exploration, robot, manipulateur, automobile, aéronef, navire, etc.