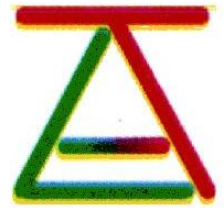


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Aboubekr Belkaid Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique et Électronique

Laboratoire d'Automatique de Tlemcen



THÈSE de DOCTORAT

présentée par

Amal CHOUKCHOU-BRAHAM
née EL HATHOUT

Titre :

**CONTRIBUTION À LA STABILISATION
DES SYSTÈMES MÉCANIQUES SOUS ACTIONNÉS**

Soutenue le 21 Mai 2011 devant le jury :

Président	N. Ghouali	Professeur à l'Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Algérie.
Examineur	K. Busawon	Professeur à Northumbria University Newcastle, United Kingdom.
Examineur	M. Djemaï	Professeur à l'Université de Valenciennes, France.
Examineur	M. F. Khelfi	Professeur à l'Université Es sénia Oran, Algérie.
Directeur de thèse	B. Cherki	Maître de conférences à l'Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.

Résumé

La commande des systèmes mécanique sous actionnés est un sujet de recherche actif en Automatique et en Robotique. D'une part, la commande de ces systèmes donne souvent lieu à des problèmes qu'on ne peut résoudre avec des techniques classiques, d'autre part, l'émergence récente d'applications robotiques mettant en oeuvre des véhicules autonomes sous actionnés, tels que les dirigeables, les sous-marins, ou les machines volantes de type VTOL (Vertical Take-off and Landing), constitue une forte incitation à développer plus en avant les recherches sur ce sujet.

L'objectif de la thèse est de contribuer à ces recherches en développant des outils pour la synthèse de commande systématique pour les systèmes sous actionnés. Ces derniers sont définis comme étant des systèmes qui possèdent moins d'entrées de commande que de degrés de liberté à commander.

L'intérêt d'étudier et de commander de tels systèmes provient non seulement de l'existence réels de ces systèmes et des applications qui leurs sont associées mais aussi des avantages qu'ils peuvent présenter sur la réduction du prix et du poids des applications voire même, la contribution à la réussite de certaines mission délicates en cas de panne d'actionneurs. Cependant, la restriction sur les actionneurs rend la commande de ces systèmes plutôt difficile. En effet, certains résultats et propriétés établis pour toute une classe de système non linéaire tels que la linéarisabilité par feedback, la passivité et la matching condition ne sont plus valables. De plus, d'autres propriétés indésirables telles qu'un degré relatif non déterminé ou un comportement à non minimum de phase se manifestent. Par ailleurs, plusieurs de ces systèmes présentent une obstruction structurelle à l'existence de commandes stabilisantes lisses et invariantes dans le temps.

Toutes ces raisons ont fait que le plus souvent, ces systèmes sont étudiés sur la base du cas par cas. À notre connaissance, seules deux tentatives de classifications pour ces systèmes sont disponibles dans la littérature.

La première est due à *Seto et Baillieul* et est basée sur la construction d'un diagramme de circuit de contrôle pour représenter les forces d'interactions à travers les degrés de liberté du système sous actionné. Trois types de structures pour les systèmes à deux degrés de liberté sont identifiées : structure chaîne, structure arbre et point isolé. Les auteurs dans leur

classification donnent une solution de commande que pour les systèmes ayant une structure chaîne où une procédure systématique de backstepping est mise au point ; c'est précisément le point fort de cette classification, par contre son point faible est que les deux autres structures restent un problème ouvert pour la commande.

La deuxième classification est due à *Reza Olfati-Saber* et est basée sur les propriétés structurelles des systèmes mécaniques telles que l'actionnement de certains degrés de liberté, le couplage des entrées et l'intégrabilité des moments généralisés. En fonction de ces propriétés, l'auteur a proposé de transformer les systèmes ayant les mêmes propriétés en trois formes normales principales à savoir : la forme normale feedback stricte, feedforward et la forme normale non triangulaire. L'auteur de cette classification a proposé une procédure de commande en deux étapes pour les deux premières formes normales : stabiliser le système réduit en premier lieu, ensuite étendre la stabilisation au système globale par une procédure de backstepping ou de forwarding selon la forme normale. Quelques suggestions de commande ont été données pour la troisième forme. Cependant, la procédure proposée pour la stabilisation du système réduit nécessite la vérification d'une hypothèse assez restrictive de sorte que l'auteur lui-même ne l'a utilisée qu'une seule fois. De plus, sa procédure qui s'effectue en deux étapes conduit à des explosions de termes qui engendrent des expressions de commandes très compliquées, par conséquent difficiles à implémenter.

Dans ce travail, nous proposons de répondre aux problèmes de stabilisation, encore ouverts, des deux structures en arbre et en point isolé de la première classification jugées plus difficiles à commander que la structure chaîne. Notre stratégie consiste en fait à étendre la procédure systématique élaborée pour la structure chaîne à une sous classe de système ayant une structure arbre en s'inspirant partiellement des changements de contrôle et de coordonnées de la deuxième classification. Cependant, les systèmes transformés ne satisfont pas une certaine hypothèse du schéma de contrôle de backstepping, par conséquent, le contrôle synthétisé présente des singularités réduisant ainsi le domaine de stabilité.

Pour assurer une stabilité globale, nous proposons en premier lieu d'adopter une stratégie de contrôle hybride permettant le passage à travers les singularités. En second lieu, et en se basant sur la même fonction de Lyapunov que dans la première stratégie, nous proposons de modifier la loi de commande afin de tenir compte des singularités. L'efficacité des deux contrôles est démontré à travers l'exemple du système Tora qui possède initialement une structure arbre et auquel nous avons réussi à appliquer une procédure de backstepping, nous

avons par la même occasion permis la relaxation d'une hypothèse par rapport au schéma de contrôle initial.

Ensuite, pour la deuxième sous classe de la structure arbre non transformable en structure chaîne, nous proposons une procédure de contrôle basée sur une linéarisation partielle suivie d'une synthèse de loi de commande incluant des termes stabilisants pour deux variables en parallèles afin de stabiliser simultanément deux degrés de libertés.

Enfin, pour les systèmes ayant des structures en point isolé, nous proposons d'atteindre les objectifs de commande à travers une linéarisation approximative ou éventuellement des approximations d'ordre supérieur suivie d'une synthèse de commande robuste de type mode glissant.

La conception de tous les contrôles est basée sur l'utilisation de plusieurs techniques de commande. Essentiellement sur des procédures de backstepping, de linéarisation partielles et approximatives, des commandes à commutations et par mode glissant. Les preuves de stabilité des lois de commande sont élaborées moyennant la théorie de Lyapunov et appuyées par des résultats de simulation.

Et bien que les systèmes réels soient d'ordre élevé, les exemples considérés dans cette thèse, pour illustrer l'efficacité des schémas de contrôle, sont à deux degrés de liberté. Ces exemples incluent le système chariot pendule inversé, la masse glissante sur chariot, l'Acrobot, le Pendubot, le système Tora, le pendule à roue inertielle et le système bille sur rail. La plupart de ces systèmes possèdent une signification en tant que benchmarks du contrôle non linéaire. De plus, le principe de fonctionnement de certaines applications pratiques est similaires au fonctionnement de ces systèmes.

Pour permettre une compréhension plus simple aux lecteurs, nous avons introduit dans cette thèse un ensemble de résultats classiques mais se trouvant souvent dans des références disparates.

"...Ce que l'on conçoit bien s'annonce clairement et les mots pour le dire arrivent aisément."