

Avant-propos

L'exploration des limitations structurelles classiques d'espace d'état pour la commande des systèmes mène à une question importante : comment exploiter pleinement les informations disponibles, notamment les dérivées d'état mesurables, sans alourdir les architectures de commande ? Cet ouvrage est né de cette interrogation, et des années de recherche théorique et appliquée pour y répondre.

Le cadre d'espace d'état réciproque (*Reciprocal State Space*, RSS), introduit par Tseng dans les années 1990, offre une alternative aux contraintes du formalisme standard. Pourtant, malgré son potentiel évident pour les systèmes où les dérivées d'état sont accessibles (vibrations, aéronautique, robotique dynamique, etc.), ce cadre reste sous-exploité dans la littérature et les pratiques industrielles. Cet ouvrage vise à explorer des approches de commande, en proposant une synthèse unifiée des avancées théoriques récentes et en étendant le RSS à des classes de systèmes plus larges (non linéaires, discrets, robustes).

Public visé et structure

Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs en automatique, aux chercheurs en commande des systèmes souhaitant :

- comprendre les fondements mathématiques du RSS (stabilité, contrôlabilité, observabilité) et ses avantages par rapport au cadre classique ;
- maîtriser des algorithmes innovants pour la commande de systèmes non linéaires (Lipschitz, OSL) ou à dynamique rapide, incluant des extensions en mode glissant et LQR adaptatif ;
- bénéficier d'une vision unificatrice entre les cas continu et discret, essentielle pour l'implémentation numérique.

Remerciements

Je tiens à remercier les Pr. Mohamed Boutayeb, Pr. Noussaiba Gasmî et Pr. Ghazi Bel Haj Frej pour leurs critiques constructives et leurs idées stimulantes. Je remercie l'Institut supérieur des systèmes industriels de Gabès-Tunisie pour le soutien dans la validation expérimentale de certaines méthodes proposées. Une pensée particulière va également aux relecteurs anonymes dont les commentaires ont affiné la rigueur de cet ouvrage.

Un mot au lecteur

Si vous travaillez sur des systèmes où les capteurs fournissent des dérivées d'état (accélérations, vitesses angulaires, etc.), ou si vous cherchez une alternative plus flexible aux architectures de contrôle traditionnelles, cet ouvrage vous offrira des outils théoriques et pratiques directement applicables. Les exemples et les preuves formelles ont été conciliés pour équilibrer intuition et rigueur, j'espère qu'ils inspireront de nouvelles avancées dans vos propres travaux.

Bonne lecture.

Introduction

Le formalisme de l'espace d'état se distingue par son efficacité à modéliser et analyser les systèmes multi-entrées multi-sorties (MIMO), ce qui en fait un atout majeur dans l'étude des systèmes dynamiques. Dans ce cadre, de puissants algorithmes de synthèse de contrôleurs et d'estimateurs ont été développés au fil des décennies, tels que le placement de pôles, l'affectation de structures propres, ou encore la commande optimale *via* la théorie du contrôle quadratique linéaire (LQ).

Cependant, malgré sa large adoption et ses nombreuses réussites, le cadre classique d'espace d'état présente certaines limites structurelles qui restreignent son applicabilité dans des contextes plus généraux ou spécifiques. Deux limitations fondamentales peuvent ainsi être identifiées dans la littérature (Tseng 2003) :

– **première limitation** : les lois de commande fondées sur le cadre classique exploitent principalement les variables d'état, en négligeant souvent les dérivées de ces états. Or, dans de nombreuses applications industrielles ou mécatroniques, des capteurs tels que les accéléromètres – aujourd'hui largement disponibles – fournissent directement des mesures de dérivées d'état, comme les accélérations. Exploiter efficacement ces données dans un cadre standard nécessite souvent l'ajout d'intégrateurs pour reconstruire les états, ce qui alourdit la structure du contrôleur et accroît sa complexité. Des techniques de retour de sortie peuvent être mobilisées pour contourner cette difficulté, mais elles demeurent souvent lourdes et peu adaptées à des systèmes fortement couplés ou soumis à des contraintes temps réel (Stevens *et al.* 2015). Par exemple, dans la commande des vibrations, l'utilisation directe des accélérations mesurées est non seulement naturelle, mais souhaitable ;

– **deuxième limitation** : tous les systèmes physiques ne se prêtent pas à une modélisation dans le cadre standard. C'est notamment le cas des systèmes singuliers, des systèmes à semi-états ou encore des modèles descripteurs, pour lesquels des généralisations du cadre d'espace d'état ont été proposées (Luenberger 1977 ; Newcomb

1981 ; Verghese *et al.* 1981). Ces approches élargissent le champ des systèmes modélisables, mais au prix d'une complexité accrue dans la synthèse des lois de commande. En effet, les algorithmes associés reposent souvent sur des représentations augmentées, des fonctions de transfert, ou exigent un retour d'information combinant états et dérivées, rendant leur implémentation plus délicate (Yip et Sincovec 1981 ; Vatiadis et Karcanias 1995).

Dans le but de dépasser ces limitations et d'offrir une alternative plus souple et adaptée aux systèmes où les dérivées d'état sont mesurables ou préférables à utiliser, cet ouvrage propose une approche innovante fondée sur le cadre d'espace d'état réciproque (*Reciprocal State Space*, RSS), tel qu'introduit par Y.W. Tseng en 1997. Ce cadre repose sur une transformation mathématique réciproque entre le vecteur d'état et sa dérivée, permettant ainsi aux lois de commande de s'appuyer directement sur les dérivées d'état, plutôt que sur les états eux-mêmes. Cette approche a déjà fait l'objet de validations expérimentales convaincantes, notamment dans le domaine de l'aéronautique (Kwak *et al.* 2002).

Le présent ouvrage s'inscrit dans la continuité de ces travaux, tout en proposant de nouvelles avancées, tant sur le plan théorique que pratique. Il s'articule autour des axes suivants :

- dans un premier temps, un rappel des fondements du cadre RSS est proposé, incluant une analyse des propriétés de stabilité, de contrôlabilité et d'observabilité pour les systèmes linéaires. Ces propriétés sont confrontées à leurs équivalents dans le cadre classique, mettant en évidence leur cohérence et les bénéfices spécifiques du formalisme RSS ;

- dans un second temps, l'ouvrage présente plusieurs contributions originales portant sur la synthèse de lois de commande pour les systèmes non linéaires de type Lipschitz et *One-Sided Lipschitz* (OSL). Les approches développées visent tant la stabilisation que la poursuite de trajectoires, avec une attention particulière portée à la robustesse et à l'adaptation. Des extensions vers la commande par mode glissant (SMC), ainsi que des formulations robustes et LQR adaptées au cadre RSS, sont également proposées. Enfin, une généralisation vers le cas discret est explorée, offrant un cadre unifié pour le traitement numérique des systèmes sous forme RSS.

À travers ce travail, nous visons à doter les chercheurs et les ingénieurs d'un ensemble d'outils méthodologiques et algorithmiques leur permettant d'aborder plus efficacement la commande de systèmes complexes, notamment dans les contextes où l'exploitation directe des dérivées d'état se révèle plus naturelle ou avantageuse que celle des états eux-mêmes.