UNIVERSITÉ PARIS SUD

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences et Technologie de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes

Laboratoire des Signaux et Systèmes - L2S

DISCIPLINE: PHYSIQUE

SYNTHÈSE DE DOCTORAT

Soutenance prévue le

13/02/2015 par

Giovanni MATTEI

Robust Nonlinear Control

from continuous time to sampled-data with aerospace applications

Composition du jury

Directeurs de thèse:	Salvatore MONACO	Professeur (DIAG, Sapienza)
	Dorothée NORMAND-CYROT	Directeur de recherche (L2S - Supélec)
Rapporteurs:	Jean-Pierre BARBOT	Professeur (ECS-Lab/ENSEA 6)
	Giovanni ULIVI	Professeur (DIA, Roma Tre)
Examinateurs:	Stefano BATTILOTTI	Professeur (DIAG, Sapienza)
	Vincent FROMION	Docteur (INRA Jouy-en-Josas)
	Romeo ORTEGA	Directeur de recherche (L2S - Supélec)

La thèse porte sur le développement de techniques non linéaires robustes de stabilisation et commande des systèmes avec perturbations de modèle. D'abord, on introduit les concepts de base de stabilité et stabilisabilité robustes dans le contexte des systèmes non linéaires. Ensuite, on présente une méthodologie de stabilisation par retour d'état en présence d'incertitudes qui ne sont pas dans l'image de la commande (« unmatched »). L'approche récursive du « backstepping » permet de compenser les perturbations « unmatched » et de construire une fonction de Lyapunov contrôlée robuste, utilisable pour le calcul ultérieur d'un compensateur des incertitudes dans l'image de la commande (« matched »). Le contrôleur obtenu est appelé « recursive Lyapunov redesign ». Ensuite, on introduit la technique de stabilisation par « Immersion & Invariance » (I&I) comme outil pour rendre robuste par rapport à des dynamiques non modélisées un contrôle non linéaire. La première technique de contrôle non linéaire robuste proposée est appliquée au projet d'un autopilote pour un missile air-air et au développement d'une loi de commande d'attitude pour un satellite avec appendices flexibles. L'efficacité du « recursive Lyapunov redesign » est mise en évidence dans le deux cas d'étude considérés. En parallèle, on propose une méthode systématique de calcul des termes incertains basée sur un modèle déterministe d'incertitude. La partie finale du travail de thèse est relative à la stabilisation des systèmes sous échantillonnage. En particulier, on reformule, dans le contexte échantillonné, la technique d'Immersion et Invariance. En premier lieu, on propose des solutions constructives en temps continu dans le cas d'une classe spéciale des systèmes en forme triangulaire « feedback form », au moyen de « backstepping » et d'arguments de domination non linéaire. L'implantation numérique est basée sur une loi multi-échelles, dont l'existence est garantie pour la classe des systèmes considérée. Le contrôleur digital assure la propriété d'attractivité et des trajectoires bornées. La loi de commande, calculée par approximation finie d'un

développement asymptotique, est validée en simulation de deux exemples académiques et deux systèmes physiques, le pendule inversé sur un chariot et le satellite rigide.

Le contrôle automatique de systèmes non linéaires perturbés par erreurs de modélisation et termes incertains variables dans le temps peut être considéré sans exagération un thème d'intérêt central pour l'entière communauté scientifique gravitant autour du domaine « automatique non linéaire et robuste », soit du point de vue de l'analyse, soit de la synthèse de contrôleurs. Dans le travail de thèse, on développe une procédure pour obtenir la stabilisation pratique asymptotique de systèmes non linéaires avec perturbations « matched » et « unmatched ». L'idée essentielle est celle de réunir les résultats existant de « Lyapunov redesign » et de « robust backstepping » dans un seul contrôleur stabilisant, que l'on appelle « recursive Lyapunov redesign ». Cet outil associe la philosophie constructive du « backstepping » avec la définition implicite du contrôle propre au « Lyapunov redesign », pour empêcher les effets des perturbations « matched » et « unmatched » dans la dynamique du système. Plus précisément, la propriété de stabilité que l'on peut atteindre est la stabilité globale asymptotique « pratique-robuste », c'est-à-dire que les trajectoires du système en boucle fermée convergent vers un ensemble compact, comprenant l'origine de l'espace d'état, dont la dimension est arbitrairement réductible par une variation appropriée des paramètres du projet de contrôle. Cet approche est particulièrement appropriée au projet de lois de contrôle pour les systèmes aérospatiaux dont la dynamique est fortement non

linéaire et perturbée par des paramètres incertains. Dans le travail de thèse, on applique la technique proposée à deux problèmes différents, la stabilisation d'attitude d'un satellite avec appendices flexibles et le projet d'autopilote pour un missile asymétrique air-air commandé au travers d'actionneurs en queue.

L'histoire de l'automatique non linéaire robuste commence à partir des premières années '80, dans le contexte nommé « guaranteed stability framework» avec le travail de Corless, Leitmann, Gutman et Barmish. Les premières solutions d'un point de vue géométrique apparaissent dans les premières années '90 (Astolfi and Isidori). Le « backstepping » robuste a été introduit par Freeman et Kokotovic en 1993, et par Marino et Tomei sous différentes hypothèses et représentations. Une construction similaire avait été développée en 1992, par Qu. En fonction des applications, des contraintes du projet et des améliorations méthodologiques, les idées originales ont été progressivement spécialisées et détaillées dans différents domaines d'intérêt, comme le contrôle robuste adaptatif, la mise en place d'observateurs et l'optimalité inverse. Dans les années suivantes, des nouveaux concepts ont été introduits, comme la stabilité entrée-état (« Input-to-State Stability », ISS), la stabilité incrémentale et la théorie de la contraction. Il faut aussi mentionner la stratégie de contrôle « Sliding mode » et ses développements (« higher-order sliding modes », « super-twisting algorithms »), qui souffrent du problème du « chattering », oscillations haute fréquence du signal de contrôle. Les idées fondamentales exploitées dans le « backstepping » robuste pour

empêcher l'effet des perturbations « unmatched » sont la *récursivité* et le *contrôle virtuel*. La première permet d'exploiter la structure du système pour construire la loi de commande ; le deuxième se charge de compenser les perturbations « unmatched ». En outre, cette technique fournit une façon systématique de construction des fonctions de Lyapunov contrôlées pour des systèmes sous forme « pure-feedback » ou « strict-feedback ». Dans le domaine aérospatial, les techniques de commande les plus connues, comme le « gain scheduling » ou les développements plus récents du contrôle « LPV/quasi LPV » ne garantissent pas la stabilité globale pour toutes les conditions de fonctionnement ou donnent des résultats très conservatifs. De plus, les approches non linéaires adaptives échouent pour satisfaire le cahier des charges en termes de vitesse de réponse pour le projet d'autopilote.

La deuxième partie conceptuelle du travail porte sur l'application d'une technique de contrôle non linéaire robuste sous échantillonnage. La technique est nommée « Immersion and Invariance », et rend une loi de contrôle non linéaire donnée, robuste par rapports à des dynamiques d'ordre supérieur, par exemple les dynamiques des actionneurs. La stabilisation sous échantillonnage est garantie par la conception de lois de contrôle qui incluent des termes dépendant de la période d'échantillonnage, nommés termes correcteurs. De plus, l'application d'une stratégie de contrôle multi-échelles se prête à la stabilisation des systèmes en cascade, avec extensions dynamiques et dynamiques d'actionneurs, en préservant

les propriétés stabilisantes de la loi de contrôle proposé en temps continu, et ceci aux instants d'échantillonnage.

Dans le **Chapitre 1** on introduit les notions fondamentales de stabilité et stabilisabilité robustes des systèmes non linéaires non autonomes avec incertitudes. On commence avec les définitions de stabilité semi-globale et pratique, qui sont de certain intérêt dans le contexte applicatif, puisque les propriétés introduites prennent en compte domaines bornées de conditions initiales et un erreur en régime permanent, qui peut aussi être « suffisamment petit » et pas exactement zéro. Ensuite, on introduit les concepts très importants de « Stabilité-Entrée-Etat » (« Input-to-State Stability », ISS) et « Fonction de Lyapunov Contrôlée » (« Control Lyapunov Function », CLF), qui sont liées au problèmes d'atténuation des perturbations et de stabilisabilité des systèmes non linéaires. On définit le problème de stabilisabilité robuste non linéaire et les définitions correspondantes de système non linéaire avec incertitudes et de stabilisabilité robuste pratique. Enfin, on introduit le concept de fonction de Lyapunov contrôlée robuste (« robust control Lyapunov function », RCLF), qui est l'idée centrale des techniques de commande non linéaire robuste.

Dans le **Chapitre 2,** la définition de système non linéaire avec incertitudes introduite dans le premier chapitre est précisée et particularisée en utilisant une représentation appropriée de l'incertitude. De plus, on spécialise l'étude pour la classe des systèmes non linéaires avec incertitudes qui sont aussi affines en la commande. On donne des exemples de systèmes avec incertitudes qui ne sont pas

stabilisables en utilisant des approches classiques, puisque l'incertitude modifie leur structure très fortement dans certain cas critiques. La notion structurelle fondamentale est caractérisée par les « matching conditions » et des versions plus faibles, les « generalized matching conditions ». Ces conditions, qui posent des contraintes sur l'amplitude des incertitudes et sur leur position dans le système, sont strictement liées à la stabilisabilité robuste. Les plus dangereuses sont les incertitudes « unmatched » et les « matched » qui dépendent de, ou simplement multiplient, la loi de commande. Dans la partie finale du chapitre, on propose un modèle déterministe pour les termes incertains en exploitant les concepts de « delta-operator » et « deviation function ». En outre, on établit des règles pour le calcul et la propagation des termes incertains dans la dynamique d'un système. On trouve deux résultats très utiles pour l'application à l'aérodynamique du missile air-air et aux termes flexibles du satellite symétrique.

Dans le **Chapitre 3** on établit le résultat principal du travail de thèse. On commence en retenant la technique du « Lyapunov redesign », et en en introduisant une version modifiée qui exploite des fonctions sigmoïdales appropriées avec dérivée continue. On appelle ces fonctions des « fonctions de commande virtuelle robuste » (« robust virtual control functions », RVCF). Avec ces fonctions, il est possible de construire une loi de commande non linéaire robuste récursive et d'éviter les oscillations de haute fréquence (« chattering ») créées par des lois de commande discontinues, très dangereuses en phase

d’implantation pour les actionneurs. On retient la technique du « backstepping » robuste et on présente le résultat principal, qui consiste dans la fusion de ceci avec le « Lyapunov redesign ». La technique est appelée « Lyapunov recursive redesign» et permet la compensation d’incertitudes « umatched » et aussi d’incertitudes qui dépendent de la loi de commande, très communes dans certaines dynamiques non linéaires de systèmes aérospatiaux, comme la dynamique du missile air-air et la dynamique flexible du satellite symétrique. Dans la partie finale du chapitre, on rappelle la technique de stabilisation par « Immersion and Invariance » comme outil pour la robustification « vis-à-vis » dynamiques d’ordre supérieur des lois de commande non linéaires données. On propose une solution dans le cas d’une classe particulière des systèmes en « strict-feedback form » en utilisant une étape de « backstepping « plus un argument de domination non linéaire.

Dans le **Chapitre 4**, les techniques de commande non linéaire robuste introduites sont appliquées à la dynamique d’un satellite symétrique avec appendices flexibles. D’abord, le modèle dynamique non linéaire est rendu plus fiable en utilisant les paramètres de Cayley-Rodrigues modifiés, pour une représentation d’attitude non redondante et globale. Ensuite, la stabilité exponentielle du sous-système cinématique – flexible sous loi de commande linéaire est montrée, en exploitant les bonnes propriétés de la dynamique flexible découplée. Ce résultat intermédiaire est crucial pour simplifier l’application du « Lyapunov recursive redesign ». Cette application conduit à la stabilité

robuste pratique uniforme globale asymptotique (« practical-robust uniform global asymptotic stability », P-RUGAS) du système en boucle fermée.

Dans le **Chapitre 5** la technique du « recursive Lyapunov redesign » est utilisée pour concevoir l'autopilote non linéaire robuste d'un missile asymétrique air-air, afin d'effectuer des manœuvres « Skid-to-Turn » et « Bank-to-Turn ». Un modèle dynamique incertain est mis au point avec l'aide des résultats de modélisation d'incertitudes par propagation du deuxième chapitre. Le modèle est très non linéaire et constitué de paramètres à haute vitesse de variation temporelle. Le problème est posé comme un « tracking problem », c'est-à-dire un problème de suivi des trajectoires. On construit un stabilisateur « backstepping » nominal, c'est-à-dire qui ne prend pas en compte les incertitudes dans le modèle dynamique. Ensuite, on construit le stabilisateur non linéaire robuste « recursive Lyapunov redesign », qui tient compte des incertitudes « matched » (aussi dépendant de la commande) et « unmatched ». La stabilité robuste pratique uniforme globale asymptotique du système en boucle fermée est ainsi montrée : les trajectoires du système convergent sur les signaux de référence avec un erreur qui peut être rendue arbitrairement petite avec un choisi approprié des paramètres de commande, notamment les inclinaisons des sigmoïdes constituant les fonctions de commande virtuelle robustes. Différentes simulations dans distincts scénarios, sous trois niveaux d'incertitude, montrent l'efficacité de la loi de commande proposée face au simple « backstepping » nominal.

Dans le **Chapitre 6**, on reformule dans le contexte digital la solution de stabilisation par « Immersion and Invariance » du troisième chapitre. La commande est maintenue constante sur intervalles de longueur fixée, c'est-à-dire les périodes d'échantillonnage. Pour la classe particulière des systèmes considérée, une solution de commande digitale multi-échelles existe, et on propose une version approchée lors de l'implantation. Les solutions simple-échelle et multi-échelles sous échantillonnage reproduisent, aux instants d'échantillonnage, les trajectoires en boucle fermée du temps continu. Ceci garantit l'attractivité de la variété sur laquelle le système cible est défini. En plus, la bornitude des trajectoires sous échantillonnage est préservée par loi de commande proposée plus des hypothèses de régularité et d'existence des solutions du système. Aussi, l'invariance de la variété est assurée sous échantillonnage : c'est-à-dire que les trajectoires qui commencent avec des conditions initiales sur la variété, restent sur la variété. Les lois de commande digitales sont appliquées à deux exemples académiques et au système du pendule inversé sur un chariot. Les simulations montrent comment la présence du terme correcteur améliore la performance et garantit la stabilité pratique à temps d'échantillonnage plus grands que dans le cas d'implantation directe au travers un dispositif bloqueur d'ordre zéro (« zero-order hold »).

Dans le **Chapitre 7**, on considère le problème de stabilisation d'attitude du satellite rigide, avec robustesse contre la dynamique d'actionneur au premier ordre. D'abord, on propose une nouvelle loi

de commande en temps continu, en utilisant une transformation « backstepping » en deux étapes et, ensuite, l'approche par « Immersion and Invariance » est utilisée pour prendre en compte la dynamique d'actionneur, vue comme une extension dynamique du système. La stabilisation asymptotique pratique est atteinte à travers un argument de domination non linéaire. La version digitale single-échelle de la loi de commande, adaptée à la nature « multi-input » du système, est donc construite et proposée. Son efficacité est vérifiée et validée à travers différentes simulations dans deux scénarios avec périodes d'échantillonnage croissantes. La présence du terme correcteur au premier ordre rend la loi de commande bien meilleure que la loi en temps continu, implémentée directement avec un dispositif « zero-order hold », puisque le maximum de temps d'échantillonnage admissible (« maximum allowable sampling time », MASP) est plus haut.

Conclusions et perspectives

La conception de lois de contrôle non linéaires et robustes pour la stabilisation des systèmes avec perturbations a été développée et validée par son application au projet d'autopilote pour un missile air-air et à la stabilisation d'attitude d'un satellite avec appendices flexibles. De nouvelles techniques de représentation et modélisation de l'incertitude ont étés introduites pour évaluer l'enveloppe d' incertitude des paramètres aérodynamiques (missiles et avions). La méthodologie de stabilisation par « Immersion and Invariance » a été

implémentée avec succès sous échantillonnage, en montrant que la présence de termes correcteurs dans la loi de contrôle préserve la stabilité pour des temps d'échantillonnage pour lesquels l'implantation directe par dispositifs de bloqueur d'ordre zéro (« zero order hold ») échoue.

Le travail futur devra prendre en considération explicitement en phase de projet, la présence de limites en saturation et bande passante sur les actionneurs. Une possibilité sera quelle de rechercher des solutions plus « douces » en modifiant convenablement la fonction de Lyapunov contrôlée robuste, afin de réduire les dépassement dans le régime transitoire. Alternativement, on pourra développer des lois de contrôle avec optimalité inverse ou exploiter le concept de stabilité entrée-état. Dans le contexte de la stabilisation sous échantillonnage, on devra envisager le problème d'un temps d'échantillonnage variable pour réduire l'effort du contrôle et améliorer la performance du système. Les outils des systèmes hybrides et des systèmes à évènements pourront nous aider à poser le problème, que l'on abordera alors d'un point de vue constructif en utilisant les techniques introduites dans le présent travail de thèse et articles connexes.