www.onera.fr

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Commande multi-échelle sous contraintes, application à un véhicule de rentrée

Référence : **TIS-DTIS-2024-42**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Septembre 2024	**Date limite de candidature :** Juin 2024

Mots clés : Guidage, pilotage, véhicules de rentrée, perturbations singulières

Profil et compétences recherchées

M2 en automatique, mathématiques appliquées, systèmes aérospatiaux

Compétences : Automatique, commande non linéaire, commande optimale, mécanique du vol, MATLAB/Simulink

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les systèmes aérospatiaux sont régis par les équations de la dynamique du vol qui décrivent le déplacement du centre de gravité ainsi que les changements d'orientation de l'objet, et cela en fonction des commandes appliquées (gouvernes, moteurs, …). Les expressions des forces aérodynamiques et propulsives rendent ces équations fortement non-linéaires puisqu'elles varient en fonction du point de fonctionnement. Le contrôle des systèmes aérospatiaux est généralement divisé en deux disciplines : le guidage pour le calcul et le suivi d'une trajectoire de référence, et le pilotage pour le contrôle d'attitude par les actionneurs.

Classiquement, des modèles approximés sont utilisés pour analyser les performances et pour concevoir des lois de commande. Par exemple, la dynamique est linéarisée autour des points de vols, les variables d'état du système sont séparées en fonction de leurs échelles de temps, la dynamique des actionneurs est négligée, les termes de faibles amplitudes dans la dynamique sont négligés ou bien considérés comme des perturbations…

Ces simplifications a priori empiriques peuvent se justifier mathématiquement en utilisant la théorie des perturbations singulières [1-3]. Cette technique a été très utilisée dans les années 60-70 lorsque les moyens informatiques ne permettaient pas d'utiliser des algorithmes d'optimisation non-linéaires comme c'est le cas actuellement. Cependant, les méthodes de perturbations singulières restent pertinentes pour l'utilisation de méthodes de contrôle optimal [1,2,4] en vol, où les capacités de calcul sont limitées, et puisqu'elles permettent l'obtention de lois de commandes quasi-optimales en boucle fermée.

Alors que les méthodes de perturbations singulières ont été majoritairement appliquées aux problèmes de génération de trajectoires, d'optimisation (pour le guidage) et d'analyse de stabilité (pour le pilotage), elles sont aussi adaptées à la synthèse de lois de pilotage pour des systèmes non linéaires et même non autonomes. Le cadre méthodologique a été développé dans les années 70-80 [2,3,5,6] mais a été très peu exploité depuis.

L'avantage de cette approche est de simplifier la conception du pilote en le décomposant en deux parties, chacune étant responsable de la stabilisation d'un seul sous-système (rapide ou lent). De plus, les équations de la dynamique peuvent être traitées directement sans avoir recourt à une mise en forme particulière (triangulaire, …). Ces transformations sont requises pour la plupart des méthodologies non linéaires mais ont tendance à faire disparaitre la physique du problème, ce qui complique l'analyse et la conception.

Cette réduction dans la phase de la conception pourrait s'avérer particulièrement bénéfique pour la commande de véhicules aérospatiaux dans la présence des contraintes et où des phénomènes dynamiques tels que les ballottements de carburant et les effets aéro-élastiques des ailes doivent être atténués.

L'objectif de la thèse est de proposer des nouveaux algorithmes de guidage-pilotage basés sur la méthode des perturbations singulières pour le problème de rentrée atmosphérique pour un véhicule de type navette spatiale.

Pour le guidage, un travail préliminaire consistera à obtenir des solutions quasi-optimales et boucles fermées obtenues en couplant les perturbations singulières à la commande optimale par principe du maximum de Pontryagin. Les solutions boucles fermées sont intéressantes d'un point de vue robustesse mais aussi d'un point de vue embarquabilité. Cela est particulièrement désirable en cas de besoin de recalculer la trajectoire en cours de vol (suite à un changement d'objectif ou à des perturbations subies), avec des moyens de calculs limités. La méthode proposée sera comparée avec les méthodes numériques et boucles ouvertes de l'état de l'art actuel (shooting indirect et continuation [7], ou optimisation convexe séquentielle [8]). Ces résultats permettront d'alimenter les travaux en pilotage avec des trajectoires de références pertinentes.

Pour le pilotage, les méthodes actuelles de conception par perturbations singulières, dites commandes composites, ne permettent pas de prendre en compte les limitations sur l'évolution dynamique des différentes variables d'un véhicule (incidence, ballottement carburant, modes souples). Des avancements récents en commande non linéaire proposent un cadre méthodologique, par fonctions Barrières-Lyapunov [9, 10], pour intégrer des contraintes d'état/sortie dans la phase de synthèse d'un pilote. Ce cadre est d'autant plus prometteur puisqu'il permet aussi d'incorporer facilement des contraintes temporelles (p.e. dépassement, erreur statique) [11] qui correspondent directement aux spécifications de performance imposées. Cette thèse vise à étendre la méthode par commandes composites afin d'intégrer différentes contraintes et spécifications de performance imposées sur un véhicule de rentrée atmosphérique.

Le déroulement de la thèse sera le suivant : étude bibliographique des méthodes de perturbations singulières et leurs applications au guidage/pilotage des véhicules aérospatiaux, modélisation du problème de rentrée atmosphérique pour un véhicule d'intérêt, résolution analytique et numérique des problèmes de guidage, comparaison avec les méthodes de commande optimale (Pontryagin) et d'optimisation convexe, résolution analytique et numérique des problèmes de pilotage, comparaison avec des solutions classiques, résultats numériques de la boucle guidage-pilotage complète.

Un dossier de candidature contenant CV, lettre de motivation et relevés de notes récents est à envoyer à tous les responsables de la thèse aux adresses mails indiquées.

[1] Naidu, D. S., & Calise, A. J. (2001). Singular perturbations and time scales in guidance and control of aerospace systems: A survey. Journal of Guidance, Control, and Dynamics

[2] Kokotović, P., Khalil, H. K., & O'Reilly, J. (1999). Singular perturbation methods in control: analysis and design. Society for Industrial and Applied Mathematics.

[3] Kokotovic P. (1984). Applications of singular perturbation techniques to control problems. SIAM Review.

[4] Trélat, E. (2005). Contrôle optimal: théorie & applications (Vol. 36). Paris: Vuibert.

[5] J. H. Chow and P. V. Kokotovic. (1978) Two-time-scale feedback design of a class of nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control.

[6] A. Saberi and H. Khalil (1985) Stabilization and regulation of nonlinear singularly perturbed systems-Composite control. IEEE Transactions on Automatic Control.

[7] Bonalli, R. (2018). Optimal control of aerospace systems with control-state constraints and delays (Doctoral dissertation, Sorbonne Université). https://theses.hal.science/tel-01848542v3

[8] Malyuta, D., Reynolds, T. P., Szmuk, M., Lew, T., Bonalli, R., Pavone, M., & Açıkmeşe, B. (2022). Convex Optimization for Trajectory Generation: A Tutorial on Generating Dynamically Feasible Trajectories Reliably and Efficiently. IEEE Control Systems Magazine.

[9] K. P. Tee, S. S. Ge, and E. H. Tay (2009). Barrier Lyapunov functions for the control of output constrained nonlinear systems. Automatica.

[10] E. Restrepo-Ochoa (2021) Coordination control of autonomous robotic multi-agent systems under constraints. Ph.D. dissertation, University Paris-Saclay, Gif sur Yvette, France, https://tel.archivesouvertes.fr/tel-03537341.

[11] E. Restrepo and D. V. Dimarogonas (2022). On Asymptotic Stability of Leader–Follower Multiagent Systems Under Transient Constraints. IEEE Control Systems Letters.

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA
Département : Traitement de l'Information et Systèmes
Lieu (centre ONERA) : Palaiseau
Contact : Ioannis SARRAS, Florian DIETRICH
Tél. : 01 80 38 66 65 Email : ioannis.sarras@onera.fr, florian.dietrich@onera.fr

Directeur de thèse
Nom : Bruno HERISSE
Laboratoire : ONERA
Tél. : 01 80 38 66 93
Email : bruno.herisse@onera.fr

Pour plus d'informations : https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche