

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Optimisation convexe pour le Guidage-Pilotage de véhicules aérospatiaux

Référence : **TIS-DTIS-2022-18**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse :

Date limite de candidature :

Mots clés : Commande optimale, Optimisation convexe, Véhicules aérospatiaux, Guidage, Pilotage

Profil et compétences recherchées

Optimisation et commande optimale
Automatique linéaire et non-linéaire
Programmation et simulation Matlab et C++

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'objectif de la thèse est d'étendre les résultats sur le guidage optimal de véhicules aérospatiaux par optimisation convexe en y incorporant le pilotage et en analysant la robustesse aux incertitudes.

Dans le contexte actuel, les systèmes autonomes sont amenés à réaliser des missions de plus en plus complexes, notamment dans les domaines de l'aérospatial et de la robotique. On citera par exemple l'atterrissage de lanceurs, les rendez-vous orbitaux, et la planification de trajectoires dans des environnements complexes. Ces missions nécessitent la mise en œuvre de méthodes de navigation, guidage, pilotage avancées permettant notamment de :

- Minimiser la consommation d'énergie ou la durée de la tâche
- Prendre en compte des contraintes (vol en atmosphère, obstacles, actionneurs, etc.)
- Rester robuste aux incertitudes, aux pannes, aux perturbations, etc.

Dans le domaine aérospatial, les méthodes de commande optimale sont utilisées pour l'étape de guidage afin d'obtenir une trajectoire de référence réaliste et minimisant un critère d'intérêt spécifique à la mission (classiquement la consommation de carburant) tout en respectant les contraintes liées à l'engin, à l'environnement et à la mission. Cette trajectoire est calculée au sol avant mission, recalculée en ligne périodiquement ou ponctuellement en cas de reconfiguration. Cela permet ensuite de générer les consignes pour la loi de commande dédiée au pilotage de l'engin.

Les méthodes de résolution numériques indirectes sont basées sur le principe de Pontryagin et sur les équations Hamilton-Jacobi-Bellman sont précises mais difficiles à initialiser [1]. D'autres part les méthodes directes sont plus faciles à mettre en œuvre mais sont moins précises et généralement plus gourmandes en temps de calcul. Elles se basent notamment sur des algorithmes d'optimisation génériques de type boîtes noires qui sont difficiles à optimiser pour les rendre embarquables.

Parallèlement, les méthodes basées sur l'optimisation convexe [2] ont suscité un grand intérêt [3,4], aussi bien d'un point de vue théorique qu'applicatif, notamment en ce qui concerne l'embarquabilité temps-réel des algorithmes. Les avancées majeures concernent le développement de techniques permettant de transformer des problèmes d'optimisation non-linéaires (difficilement solvables et sans garanties de convergence) en problèmes convexes rapidement solvables à l'aide d'outils numériques très efficaces, notamment des auto-codeurs. On citera comme exemples d'utilisations notables, la phase d'atterrissage des lanceurs réutilisables de SpaceX [5] et des rovers martiens de la NASA [6], ainsi pour des futures missions de l'ESA.

La rapidité d'exécution de ces algorithmes permet d'envisager leur utilisation à des tâches plus bas niveau que le guidage, comme le pilotage. Cette tâche met classiquement en œuvre des algorithmes spécifiques

qui reposent généralement sur une forme d'optimisation. Elle est par exemple réalisée avec des techniques de contrôle du type H-infini garantissant une robustesse aux perturbations via l'optimisation des gains du contrôleur.

Dans un premier temps une revue de la littérature sur la commande optimale et l'optimisation convexe sera effectuée. Cela inclura l'implémentation des algorithmes en simulation sur des exemples simples et représentatifs. L'objectif de la thèse est ensuite d'étendre les résultats de la littérature dans les directions suivantes :

- Intégrer le pilotage au problème de commande optimale, en utilisant l'approche par optimisation convexe.
- S'intéresser à la robustesse de l'algorithme lorsque la trajectoire est recalculée en ligne à haute fréquence en présence, par exemple, d'incertitudes de modèle et de perturbations.

[1] Bonalli, R., Hérisse, B., & Trélat, E. (2019). 'Optimal Control of Endo-Atmospheric Launch Vehicle Systems: Geometric and Computational Issues'. *IEEE Transactions on Automatic Control*.

[2] Boyd, S., Boyd, S. P., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge university press

[3] Liu, X., Lu, P., & Pan, B. (2017). Survey of convex optimization for aerospace applications. *Astrodynamics*, 1(1), 23–40.

[4] Malyuta, D., Yu, Y., Elango, P., & Acikmese, B. (2021). Advances in trajectory optimization for space vehicle control. *arXiv preprint arXiv:2108.02335*.

[5] Blackmore, L. (2016). Autonomous precision landing of space rockets. In *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2016 Symposium* (Vol. 46, pp. 15-20). Washington, DC: The Bridge.

[6] Reynolds, T. P., Szmuk, M., Malyuta, D., Mesbahi, M., Açikmeşe, B., & Carson III, J. M. (2020). Dual Quaternion-Based Powered Descent Guidance with State-Triggered Constraints. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 43(9), 1584-1599.

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Traitement de l'Information et Systèmes

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact : Florian Dietrich

Tél. : +33 1 80 38 66 36

Email : florian.dietrich@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Bruno Hérisse

Laboratoire : ONERA Palaiseau

Tél. : +33 1 80 68 66 93

Email : bruno.herisse@onera.fr

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