Résumé de thèse

Arda YIGIT

Septembre 2021

1 Introduction

La manipulation aérienne consiste à utiliser des drones (aéronefs sans pilote) afin de réaliser des tâches de manipulation robotique. Les manipulateurs aériens peuvent être des alternatives aux robots manipulateurs industriels pour des tâches nécessitant un espace de travail important.

La robotique aérienne, et en particulier la manipulation aérienne, monte en popularité ces dernières années et cette popularité est accompagnée d'avancées majeures et fréquentes dans le domaine. Cependant, la commercialisation est difficile en raison de la législation stricte dans le domaine des aéronefs. Un autre obstacle est la faible densité d'énergie des batteries lithium-ion, qui limite l'autonomie.

La thèse s'intéresse au développement d'un nouveau type de robot : le manipulateur aérien avec suspension élastique. La figure 1 illustre le concept. Un manipulateur aérien équipé d'une pince est suspendu par un ressort au bout d'un porteur robotique. Il peut générer un torseur d'effort dans n'importe quelle direction de l'espace grâce à ses propulseurs. Il s'agit d'un nouveau type de robot, hybride entre un manipulateur série et un manipulateur aérien avec le ressort qui agit comme pièce déformable.

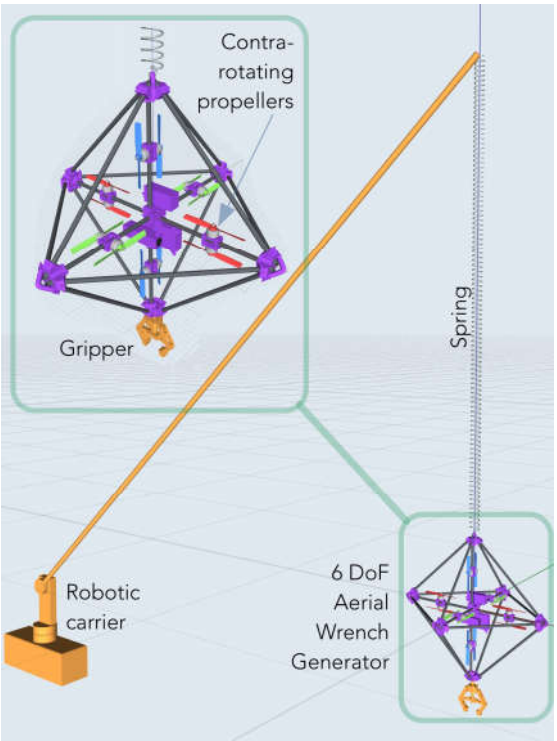

FIGURE 1 – Manipulateur aérien avec suspension élastique

Le ressort permet de compenser la gravité. Le robot nécessite donc très peu d'énergie par rapport à un manipulateur aérien standard. Le porteur robotique est facultatif. Il permet d'élargir l'espace de travail et de déplacer le point d'équilibre du robot vers la position moyenne de la tâche en cours, réduisant encore plus la consommation énergétique.

Ce document résume les travaux effectués lors de la thèse l'ordre chronologique.

2 Première année

La thèse a commencé par une phase de recherche bibliographique sur les différents thématiques autour des drones omnidirectionnels, à savoir : l'actionnement et l'instrumentation, la modélisation dynamique et la commande.

Par la suite, un modèle dynamique est obtenu avec des hypothèses simplificatrices. Il s'agit d'un modèle à un seul corps, on néglige donc les effets inertiels dus à la rotation des rotors et des hélices. On suppose également que la force générée par une hélice est directement proportionnelle au carré de sa vitesse de rotation instantanée. Ce modèle est validé dans un premier temps à l'aide d'un simulateur multiphysique.

Contrairement à celui d'un drone de type quadricoptère, le modèle dynamique présente une forte non-linéairté à cause de la présence du ressort. Il est donc préférable d'utiliser des lois de commande non-linéaire. Pour aboutir à une première preuve de concept expérimentale, la commande par couples calculés (*computed torque* en anglais) est retenue. Il s'agit d'un cas particulier de *feedback linearization* pour les systèmes dynamiques mécaniques. Cette loi de commande consiste à utiliser le modèle dynamique inverse afin d'avoir un comportement linéaire de l'erreur de pose. Ensuite, l'erreur est pilotée à zéro à l'aide un correcteur PID. Cette loi de commande a été testée et validée en simulation.

Afin d'utiliser des lois de commande avancée qui nécessitent de piloter la force générée par les actionneurs, il est nécessaire de faire une commande en vitesse des moteurs sans balai sur lesquels sont montés les hélices. Cependant la grande majorité des contrôleurs de moteurs de drone ne proposent pas de commande en vitesse et les rares contrôleurs disponibles ne sont plus à jour et donc limitent les performances maximales. C'est pourquoi, un logiciel embarqué est développé. Une carte Teensy (similaire aux cartes Arduino) communique avec les contrôleurs des moteurs brushless afin de commander la vitesse des moteurs. Le code source du projet est désormais *open-source*.

Un premier prototype, illustré par la figure 2, a été fabri-

qué avec un stagiaire en dernière année de master. Des résultats expérimentaux préliminaires avec la stabilisation du robot autour de son point d'équilibre ont fait l'objet d'une présentation lors de la conférence ICRA 2020 et ont été publiés dans les actes de conférence (*conference proceedings*) [1].

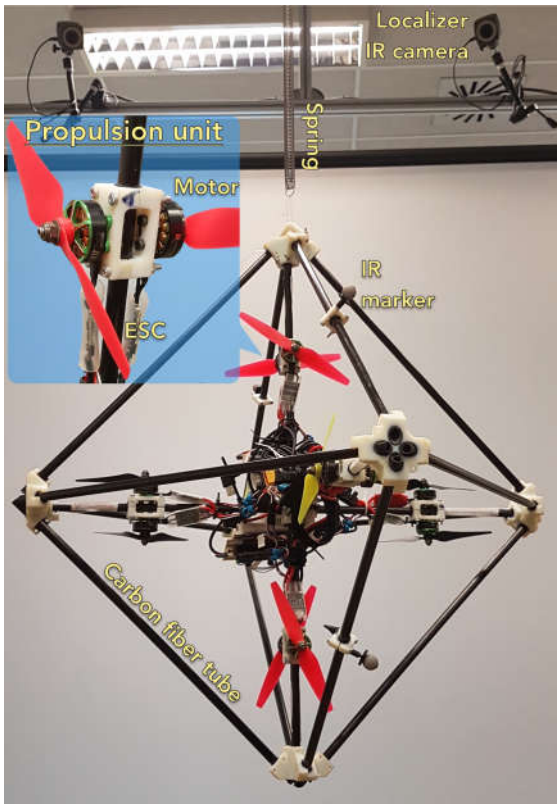

FIGURE 2 – Premier prototype

3 Deuxième année

Suite aux expériences réalisées à la fin de la première année, un certain nombre de problèmes ont été identifiés au niveau de l'actionnement, de la conception mécanique et de la commande. De plus, le robot a été sérieusement endommagé suite à une chute. Un nouveau prototype a été fabriqué avec un stagiaire (voir figure 3).

Afin d'obtenir de meilleurs performances dynamiques avec le robot, une autre loi de commande a été envisagée : la commande prédictive non-linéaire (*Nonlinear Model Predictive Control* en anglais). Connaissant le modèle dynamique du robot, cette loi de commande évalue son comportement futur pour différentes entrées afin de choisir celle qui minimise une fonction coût quadratique. La minimisation de cette fonction coût nécessite de faire un compromis entre les performances de suivi de trajectoire et l'énergie du signal de commande, et donne ainsi un aspect intuitif aux pondérations. La commande prédictive permet également de prendre en compte des saturations, et ici en particulier les saturations des actionneurs. Ainsi, le robot peut rester stable tout en saturant les actionneurs et donc avec des dynamiques plus importantes qu'avec la commande par couples calculés.

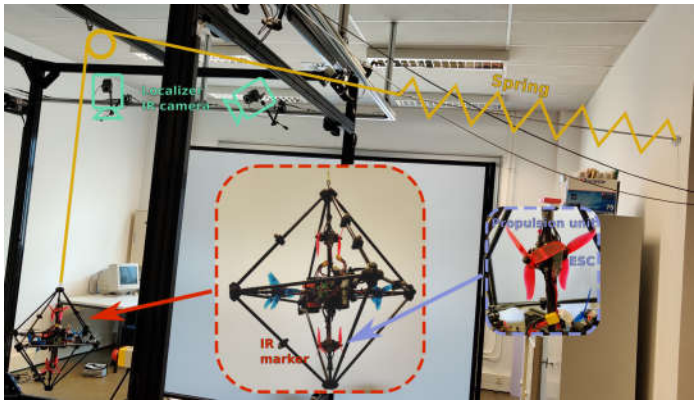

FIGURE 3 – Deuxième prototype

La commande prédictive non-linéaire étant très gourmande en calcul, il n'est pas possible de l'embarquer sur l'ordinateur de bord du robot. Un serveur a été développé afin de déporter les calculs sur un ordinateur distant. Ce serveur récupère les données mesurées par les différents capteurs et renvoie le résultat du problème d'optimisation.

Les performances statiques du robot ont d'abord été caractérisées avec la commande par couples calculés. En particulier, il est montré que le robot a un espace de travail de $0.12\,\mathrm{m}^3$ et une répétabilité millimétrique, est capable de soulever une charge d'au moins 500 g, et consomme environ quatre fois moins d'énergie qu'un drone équivalent.

Dans l'état actuel, la commande prédictive permet de commander efficacement la dynamique du robot, mais crée des erreurs en régime permanent à cause des erreurs de modèle. La prise en compte des saturations des actionneurs permet une réponse indicielle plus rapide avec moins de dépassement. De plus, grâce à un choix adéquat de la fonction coût, la consommation énergétique est encore plus faible.

La prochaine étape consiste à améliorer la loi de commande afin de faire disparaître l'erreur statique résiduelle. Pour cela, il faudra intégrer au modèle de prédiction des sources de perturbation constante correspondant aux erreurs de modèle et modifier la loi de commande afin de les éliminer.

4 Troisième année

La troisième année de la thèse a commencé par la soumission de deux articles sur les expériences réalisées lors de l'année précédente. Le premier, sur la caractérisation expérimentale du robot avec la commande par couples calculés, a été publié dans la revue RA-L et présenté lors de la conférence ICRA 2021 [2]. Le second, sur la comparaison des performances avec les commandes par couples calculés et prédictive non-linéaire, a été présenté également lors de la conférence ICRA 2021, et publié dans les actes de conférence [3].

Par la suite, la robot a été modifié afin de lui ajouter un porteur qui permet le déplacement du point d'accroche du ressort (voir figure 4). Ainsi, l'espace de travail du porteur s'ajoute à celui du manipulateur aérien suspendu. Ici, le por-

teur est un robot parallèle à câbles (ou RPC). Comme les manipulateurs aériens, les RPC sont des robots legers (par rapport à la taille de leur espace de travail), mécaniquement simple et peu coûteux. On peut réunir ces deux types de robots sous la qualification "frugale". Le RPC utilisé lors des expériences est un robot industriel fabriqué par Haption et s'appelle Inca^{TM}. Le point d'accroche du ressort est déplacé à l'aide de quatre câbles qui s'intersectent. Chaque câble est équipé d'un ressort d'équilibrage afin de créer un point d'équilibre "passif", dans le sens où il n'est pas nécessaire d'apporter de l'énergie pour rester à ce point, la pensenteur étant complétement compensée.

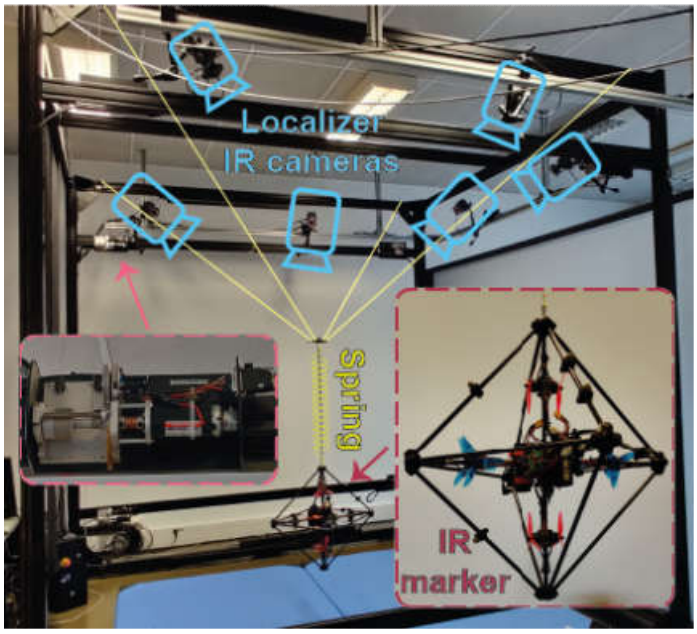

FIGURE 4 – Le robot avec son porteur

Le robot étant désormais redondant, il faut choisir une stratégie d'allocation, c'est-à-dire définir un critère qui permet de distribuer de façon unique la commande entre les actionneurs. Deux solutions sont proposées et elles visent toutes les deux à réduire la consommation énergétique du manipulateur aérien, qui est significativement plus élevée que la consommation du RPC.

Dans un premier temps, une commande partitionnée a été utilisée. Il s'agit de piloter les deux sous-systèmes (manipulateur aérien et RPC) indépendamment. La gestion de la redondance se fait alors au niveau de la génération de trajectoire. Connaissant la trajectoire désirée au niveau de l'effecteur (centre de gravité du manipulateur aérien pour le moment), il faut déterminer la trajectoire à imposer au RPC. À orientation constante du manipulateur aérien, la stratégie implémentée consiste à imposer la même trajectoire aux deux robots à un décalage vertical près qui correspond à la distance à l'équilibre entre les deux points pilotés. En cas de changement d'orientation, l'effecteur du RPC se positionne de sorte à annuler le moment au centre de gravité du manipulateur aérien du ressort qui relie les deux robots. Les résultats expérimentaux obtenus ont été présentés lors de la conférence IROS 2021, et publiés dans les actes de conférences [4]. L'ajout du porteur permet de réduire la consommation énergétique par environ 50%.

Bien que cette première solution soit efficace en régime permanent, elle n'est pas satisfaisante durant les transitoires puisque les deux robots n'ont pas les mêmes dynamiques. En effet, le RPC est plus lent que le manipulateur aérien et n'arrive donc pas à le suivre. Le moment du ressort devient alors plus important ainsi que la consommation du manipulateur aérien. La seconde solution proposée est de commander simultanément les deux robots avec la commande prédictive non-linéaire, en ajoutant dans la fonction coût un terme pénalisant la consommation des actionneurs pour gérer la redondance. Connaissant les dynamiques des deux robots, il est ainsi possible d'anticiper le mouvement du RPC et donc de synchroniser la trajectoire des deux robots de sorte à minimiser la consommation énergétique. La validation de cette solution, en simulation et expérimentalement, est en cours.

La fin de la troisième année de la thèse a été consacrée à la rédaction du manuscrit de thèse, qui sera soumise aux membres du jury fin septembre pour une soutenance mi-novembre.

5 Communication

Pendant ces trois années, j'ai eu l'opportunité de participer à la rédaction d'articles scientifiques et de contribuer à des projets *open-source*.

Je suis auteur ou co-auteur de six articles acceptés pour publication :

- Premier auteur de l'article [1] pour la conférence ICRA 2020 sur les résultats obtenus pendant ma première année de thèse. J'ai également présenté l'article lors de la conférence.
- Premier auteur de l'article [2] pour la revue RA-L et pour présentation lors de la conférence ICRA 2021 sur la caractérisation expérimentale du robot avec la commande par couples calculés.
- Premier auteur de l'article [3] pour la conférence ICRA 2021 sur la comparaison des performances des commandes par couples calculés et prédictive non-linéaire.
- Premier auteur de l'article [4] sur la commande combinée du manipulateur aérien et du RPC avec la loi de commande partitionnée.
- Co-auteur de l'article [5] pour la conférence IROS sur la commande d'un robot parallèle à câbles avec en plus des hélices de drones sur la nacelle.
- Co-auteur de l'article [6] pour la conférence EBCCSP 2020 sur un algorithme de vision événementiel pour obtenir la pose d'un robot.

Deux autres articles sont envisagés d'ici la fin du contrat (fin 2021) :

- Premier auteur d'un article pour la revue RA-L sur la suppression de l'erreur statique avec la commande prédictive non-linéaire, appliquée au manipulateur aérien.
- Premier auteur d'un article pour une revue de robotique sur la commande prédictive non-linéaire du manipulateur aérien et du RPC afin de minimiser en temps-réel la consommation énérgétique du robot.

Enfin, j'ai participé à trois projets *open-source* :

- Développeur de teensySHOT [7] qui permet de commander la vitesse de moteurs de drone.
- Développeur de RPIt [8] qui permet de commander un robot à partir d'un schéma Simulink.
- Contributeur de acados (`https://github.com/acados/acados`) qui permet de générer du code C permettant la commande prédictive non-linéaire.

Références

[1] Arda Yiğit et al. « Preliminary Study of an Aerial Manipulator with Elastic Suspension ». In : *2020 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020.

[2] Arda Yiğit et al. « Novel Omnidirectional Aerial Manipulator With Elastic Suspension : Dynamic Control and Experimental Performance Assessment ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.2 (2021), p. 612-619. DOI : `10.1109/LRA.2020.3048880`. URL : `https://ieeexplore.ieee.org/document/9312497/`.

[3] Arda Yiğit et al. « Improving Dynamics of an Aerial Manipulator with Elastic Suspension Using Nonlinear Model Predictive Control ». In : *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2021.

[4] Arda Yiğit et al. « Aerial Manipulator Suspended From a Cable-Driven Parallel Robot : Preliminary Experimental Results ». In : *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2021.

[5] Imane Khayour et al. « Improving Disturbance Rejection and Dynamics of Cable Driven Parallel Robots with On-board Propellers ». In : *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020.

[6] Johan Bertrand, Arda Yiğit et Sylvain Durand. « Embedded Event-based Visual Odometry ». In : *2020 International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP)*. IEEE, 2015.

[7] Jacques Gangloff et Arda Yiğit. *teensySHOT*. 2020. URL : `https://github.com/jacqu/teensyshot/`.

[8] Jacques Gangloff, Arda Yiğit et Maximilian Lesellier. *RPIt*. 2020. URL : `https://github.com/jacqu/RPIt/`.