

Soutenance de thèse

Torbjorn CUNIS soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA CSDV et intitulée «*Modélisation, analyse et commande pour la récupération d'un aéronef en situation de décrochage : de la théorie des systèmes au pilote automatique*»

Le 27 septembre 2019 à 15h30, salle des thèses ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Laurent Burlion	Professeur University of New Jersey	Directeur de thèse
M. Mazen Alamir	Directeur de recherche GIPSA Lab	Rapporteur
M. Peter Seiler	Professeur University of Minnesota	Rapporteur
M. Jean-Philippe Condomines	Professeur ENAC	Co-directeur de thèse
Mme Sophie Tabouriech	Directrice de recherche LAAS	
M. Mark Lowenberg	Professeur University of Bristol	

Résumé : Le travail effectué au cours de cette thèse tente d'apporter des solutions algorithmiques à la problématique de reprise au décrochage d'un aéronef. A travers de nombreux exemples d'application sur des modèles aérodynamiques, le lecteur pourra appréhender les concepts abstraits présentés dans cette thèse. Alors que la capacité pour un aéronef à revenir à une situation nominale après une sortie du domaine de vol est un élément clé pour les systèmes de transport aérien du futur, les recherches menées dans ce cadre sont encore peu nombreuses. Pourtant, un tel dépassement conduit généralement à une perte de contrôle (dénommée LOC-I), que l'Association du Transport Aérien International (IATA) a classé dans la catégorie des « risques les plus élevés pour l'aviation ». Dans un premier temps, nous avons montré que les modèles polynomiaux habituellement utilisés en théorie des systèmes ne représentent pas fidèlement l'aérodynamique d'un modèle d'avion sur l'ensemble de son enveloppe de vol. Nous avons donc tout d'abord montré qu'un modèle polynomial par morceaux représente avec exactitude les coefficients aérodynamiques pour les angles d'attaque faibles et élevés. Nous avons alors pu étendre à cette classe de systèmes, des méthodes récentes d'étude de bifurcation et d'analyse de stabilité qui utilisent des techniques de programmation semi-définie basées sur la positivité de polynômes (SOS); nous avons notamment appliqué ces résultats au modèle d'avion de transport générique dénommé GTM. Dans le même esprit, nous avons développé un modèle pour un petit aéronef à voilure fixe basé sur des simulations numériques en mécanique des fluides (CFD). Les coefficients dynamiques n'étant pas déterminés en CFD, nous avons identifié le coefficient d'amortissement du tangage en comparant l'analyse de bifurcation et les données de vol, ce qui nous a permis d'étudier à la fois la dynamique et la stabilité du vol en cas de fort décrochage. Des résultats antérieurs ont montré que les techniques SOS étaient prometteuses pour la certification des lois de commande pour des systèmes non-linéaires, cependant sans avoir été appliqués à l'ingénierie aéronautique. En adaptant ces techniques aux modèles polynomiaux par morceaux, nous avons montré qu'il est désormais possible de les utiliser d'une manière précise mais réalisable sur le plan calculatoire. Ensuite, nous avons synthétisé des lois de commandes linéaires et polynomiales pour la récupération d'un fort décrochage. En outre, nous sommes désormais en mesure d'estimer des régions d'attraction pour des modèles polynomiaux par morceaux; pour cela, nous avons proposé un algorithme amélioré pour l'analyse de stabilité locale des systèmes à commutation, tels que ceux qui sont définis par des splines, rendant ainsi notre travail disponible pour l'analyse et la certification futures de modèles d'avion très fidèles. La commande prédictive basée modèle (MPC) s'est avérée être une approche très efficace lorsque la dynamique du système est fortement non linéaire et soumise à des contraintes d'état qui rendent difficile la récupération après le décrochage. Cependant, pour des systèmes réalistes, il est nécessaire de prendre des précautions afin de prouver rigoureusement la stabilité en boucle fermée. En utilisant la technique SOS, nous avons ainsi montré la stabilité d'une stratégie de récupération d'un fort décrochage visant à minimiser la perte d'altitude. Nous avons aussi montré qu'une telle stratégie de commande permet la récupération d'une spirale

infernale en utilisant le simulateur GTM. Les résultats de cette thèse sont donc prometteurs et fournissent de nouvelles approches théoriques pour la modélisation, l'analyse de stabilité et le contrôle de la dynamique des futurs aéronefs ainsi que pour le développement et la certification de systèmes de commande de vol visant à prévenir les accidents dus à la perte de contrôle.

Mots-clés : commande non linéaire, récupération d'un aéronef, modélisation dynamiques, analyse de stabilité, pilote automatique, théorie des systèmes

Summary: In-flight loss of control (LOC-I) poses a severe threat to civil aviation, where it has remained the foremost cause of fatal accidents for the past three decades. Hence, several researchers have been working towards prevention and recovery of upsets. Based on an extensive literature research, we identified bifurcation theory and sum-of-squares programming as promising tools for the computation of trim conditions and its safe sets. At ENAC, we have designed a small fixed-wing MAV for in-door upset recovery demonstrations as well as a catapult launcher. The MAV, called "EDURA", is equipped with one of the smallest autopilot boards available, WiFi communication, and the Paparazzi UAV autopilot software. The catapult has been optimized for 3D-printing.

Keywords: nonlinear control, upset recovery, aerodynamics modeling, stability analysis, unmanned aircraft, system theory