

Soutenance de thèse

Francisco PEDROSA REIS soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA ACDC et intitulée «*Estimation non-linéaire des aéronefs à grand allongement basé sur formulation non-linéaire de déformation*»

Le 13 mars 2025 à 9h30, salle des thèses à l'ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

M. Charles POUSSOT-VASSAL	ONERA	Directeur de thèse
M. Leandro RIBEIRO LUSTOSA	ISAE-SUPAERO	Codirecteur de thèse
M. Bálint VANEK	HUN-REN SZTAKI - Budapest	Rapporteur
M. Flávio SILVESTRE	Technische Universität Berlin	Rapporteur
Mme Xuerui WANG	Delft University of Technology	Examinatrice
M. Rafael PALACIOS	Imperial College London	Examineur

Résumé : Dans la recherche pour l'économie de combustible, une solution possible est la réduction du poids structurel en rendant l'aéronef plus souple. Toutefois, le contrôle des modes structurels d'un aéronef flexible n'est pas trivial. D'habitude ignorés ou traités séparément des modes rigides, ces modes, i.e. structurels et rigides, se rapprochent avec l'augmentation de la souplesse. À partir d'un certain niveau de souplesse, ces systèmes présentent aussi des comportements non-linéaires et peuvent demander le contrôle simultané des modes structurels et rigides. De plus, les modèles de dynamiques aéroélasticités sont très complexes et demandent beaucoup de puissance de calcul.

En outre, le faible risque dû à l'absence d'équipage et aux avancées en électronique et dans la miniaturisation a rendu les UAVs un domaine important de recherche. L'intérêt pour les UAVs très souples a augmenté dans les deux dernières décennies, sur des projets comme le Zephyr d'Airbus et le SunGlider d'AeroVironment. Ces UAVs possèdent des ailes très allongées, ce qui rend les véhicules très souples s'ils ne sont pas renforcés. Comme les estimateurs de forme, indépendants des modèles, temps réel, non-linéaires, sont un domaine peu exploré, le contrôle des modes structurels de ces UAVs est aussi un sujet peu abordé. Ce travail est motivé par l'absence de tels estimateurs.

Cette thèse se concentre sur le développement des estimateurs de forme pour des structures souples, indépendantes des modèles, temps réel, non-linéaires. Cet estimateur doit être non-linéaire pour respecter des dynamiques non-linéaires des ailes très souples. Les algos doivent fonctionner en temps réel pour pouvoir être implémentés sur un logiciel embarqué et indépendant des modèles pour ne pas être sujets à la complexité des modèles aéroélastiques. Des mesures inertielles et magnétiques ont été choisies dû à la complexité et au coût numérique élevé associé aux fibres optiques et aux données visuelles.

Cette étude propose deux estimateurs basés sur l'estimation d'attitude. Nous présentons des preuves de convergence pour chaque estimateur ; ensuite, on propose une méthode pour identifier les caractéristiques linéaires autour des situations d'équilibre. En outre, nous testons ces estimateurs en utilisant des données inertielles et magnétiques expérimentales et nous comparons la performance des estimateurs contre des marqueurs de capture de mouvement. Les résultats montrent une estimation précise avec des retards admissibles. De plus, basé sur une architecture existante d'estimation de forme en utilisant des angles d'Euler, nous proposons un troisième estimateur de forme basé sur une formulation de filtre de Kalman étendu. Cet estimateur peut utiliser divers capteurs pour borner les erreurs d'estimation, comme les accéléromètres, les magnétomètres, les données visuelles ou les données de déformation locales.

Les contributions proposées dans cette thèse permettent de simplifier l'application des estimateurs de forme, et ce, à un coût réduit. Ces résultats permettent le développement des contrôleurs de forme. En outre, ces estimateurs de forme peuvent être utilisés pour observer les modes structurels des aéronefs souples, enregistrant des données de forme pour améliorer la conception, prévenir des défaillances ou estimer la performance aérodynamique. Enfin, ces méthodes peuvent aussi être utilisées dans des domaines qui demandent l'estimation relative d'attitude, comme la robotique souple ou l'estimation de posture humaine non basée sur des systèmes de caméra.

Mots-clés : Automatique, Estimation non-linéaire, Aéronefs à grand allongement

Summary: In the search for fuel efficiency, lowering structural weight by rendering an aircraft more flexible is a valid solution. However, controlling flexible aircraft's structural modes is a considerable challenge. Usually disregarded or treated as separate from the rigid-body modes, these modes, i.e., structural and rigid body, tend to couple with increased flexibility. Beyond a certain flexibility level, these systems present non-linear behavior and may require simultaneous control of structural and rigid body modes. Additionally, aeroelastic dynamic models are complex and require considerable computation power.

Furthermore, the lower risk due to crew absence and advancements in electronics and technology miniaturization made UAVs an important field of research. Interest in very flexible UAVs grew in the past two decades, including projects such as the Airbus' Zephyr and AeroVironment's SunGlider. These UAVs employ very high aspect ratio wings, becoming highly flexible unless built very rigidly. Since non-linear real-time model-free shape estimation for flexible structures is a topic with limited research, controlling the structural modes of these UAVs is rarely considered. The absence of such an estimator motivated this work.

This thesis focuses on developing a non-linear real-time model-free shape estimation for flexible structures. The estimator needs to be non-linear to account for non-linear, highly flexible dynamics, real-time to allow for embedded implementation, and model-free so that the estimator does not require a complex aeroelastic model. Additionally, inertial and magnetic data were chosen because using fiber optics or visual data elevates computational requirements.

This study proposes two shape estimators based on attitude estimation. We present the convergence proof of each estimator; then, we propose a method to extract the estimators' linear properties. Furthermore, we run these estimators using experimental inertial and magnetic data and compare the shape estimators' performance against motion capture measurements. Results obtained show accurate estimation with small delays. Additionally, based on a pre-existing Euler-angle-based framework, we propose a third curvature-based estimator based on an Extended Kalman Filter architecture. This new estimator architecture can employ several error-bounding sensors, including accelerometers, magnetometers, visual data, or strain data.

Contributions made in this thesis significantly facilitate the application of flexible shape estimators at a relatively reduced cost. These results could enable the development of new shape-based controllers and contribute to the domain of very flexible aircraft. Furthermore, shape estimators can be used to observe VFAs structural states, acquiring data for applications such as design improvement, failure prevention, and aerodynamic performance estimation. Alternatively, these methods could also be used in fields that require relative attitude estimation, such as soft robotics or non-camera-based human pose estimation.

Keywords : Automatic control, Nonlinear estimation, High aspect ratio aircraft

