

Titre du sujet : Pronostic à base de modèles et commande tolérante aux dégradations pour les véhicules aérospatiaux

Nom du directeur de thèse : Tarek RAÏSSI

Email du directeur de thèse : tarek.raissi@cnam.fr

Nom du co-encadrant : Thach Ngoc DINH

Email du co-encadrant : ngoc-thach.dinh@cnam.fr

Description du sujet de thèse

Ce sujet de thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration très active entre l'équipe Laetitia du CEDRIC et l'ONERA (Palaiseau) pour développer des activités de recherche en automatique dédiés aux chaînes fonctionnelles de navigation, guidage et pilotage de systèmes autonomes (avions, lanceurs, robotique aérienne et terrestre, systèmes multi-véhicules, ...) ainsi qu'au développement de méthodes de diagnostic et d'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes aéronautiques. Ce travail fait suite à la thèse de Mme E.I. Robinson soutenue en 2018. Le recrutement de cette dernière en tant que chercheure permanente à la NASA et son obtention du prix IFAC Young Author Award lors de la conférence SAFEPROCESS'2018 (Varsovie, Pologne) attestent de l'importance de ce sujet.

Ce projet de thèse s'inscrit dans ce cadre méthodologique, et vise à exploiter les informations de pronostic au sein de la boucle de commande pour de tels systèmes. Il utilise des données réelles fournies par l'ONERA. Le pronostic consiste à calculer le temps qu'il reste avant qu'un système ne devienne défaillant. Ce temps est appelé durée de vie résiduelle du système (RUL : Remaining Useful Life). Ainsi, grâce au pronostic, les opérations de maintenance du système ne se feront plus de manière systématique selon un planning (maintenance préventive), ni juste après l'apparition d'un défaut pour le corriger (maintenance corrective). Cette maintenance intelligente permettra la disponibilité maximale du système et la minimisation des coûts qui sont élevés dans le cas des maintenances classiques, tout en garantissant un système fiable et sécurisé. Pour effectuer le pronostic d'un système, il faut estimer son état actuel puis le projeter dans le futur afin d'estimer à chaque instant sa RUL. Il existe trois approches principales pour réaliser ces tâches : les approches à base de connaissances (utilisation des informations acquises grâce aux experts et à l'historique des pannes enregistrées sur le système), les approches à base de données (relevé de différentes données sur le système pour extraire des caractéristiques permettant d'évaluer l'état de santé du système), les approches à base de modèles (comparaison entre le fonctionnement réel du système et son modèle mathématique de référence construit à partir des lois de la physique). On se focalise sur cette dernière catégorie de méthodes.

Le pronostic à base de modèles est composé de deux étapes principales : (i) estimation de l'état actuel de la dégradation et (ii) prédiction de son état futur. La première étape, de filtrage, est réalisée à partir du modèle et des mesures disponibles. La seconde étape consiste à faire de la propagation d'incertitudes. Le principal enjeu du pronostic concerne la prise en compte des différentes sources d'incertitude (modèle, mesure, conditions d'opération) pour obtenir une mesure de l'incertitude associée à la RUL prédite. Afin de gérer ces incertitudes et les intégrer au pronostic, des méthodes probabilistes ainsi que des méthodes ensemblistes ont été développées dans une thèse soutenue en 2018. Un algorithme de filtrage particulière a été appliqué sur des données réelles pour la prédiction de la longueur de fissure dans une structure composite [1], associé à la détection d'une variation de chargement [3]. Un nouvel algorithme de filtrage et prédiction à partir d'une modélisation des incertitudes sous forme d'intervalles a également été développé pour les modèles linéaires à temps discret, avec prise en compte d'entrées inconnues [2].

A partir de cet existant, un premier objectif de cette thèse est de développer de nouvelles méthodes d'estimation et de propagation d'incertitude reposant sur les concepts d'estimation ensembliste, il s'agira notamment de développer un observateur ensembliste (observateur par intervalles ou observateur zonotopique) [5][6] applicables aux systèmes non linéaires à temps discret pour le diagnostic et le pronostic. Une piste de travail est la formalisation à l'aide de modèles linéaires à paramètres variants (LPV) afin d'étendre les résultats obtenus pour les systèmes linéaires invariants dans le temps. La possibilité de découpler, voire reconstruire une entrée inconnue, sera également étudiée, les conditions de sollicitation du système n'étant pas toujours connues. On étudiera ensuite les méthodes de propagation d'incertitudes de ces ensembles (satisfaction de contraintes,

inversion ensembliste, contraction [4]) afin d'effectuer l'estimation de la durée de vie résiduelle à partir des estimées fournies par l'observateur.

Un deuxième objectif de la thèse est d'établir une démarche de commande tolérante à la dégradation, celle-ci étant estimée et propagée via le module de pronostic [8]. Il s'agira notamment de garantir la réussite d'une mission donnée en tenant compte de la durée de vie résiduelle des composants et de l'impact rétroactif des sollicitations de la commande sur ces éléments (notamment dans le cadre de la navigation de véhicules aérospatiaux autonomes tels que les lanceurs ou les drones). La commande tolérante aux défauts (Fault Tolerant Control) est une discipline très étudiée [7], notamment d'un point de vue « actif » où un module de diagnostic fournit une estimée du défaut, qui est ensuite compensé explicitement par la loi de commande pour continuer l'opération du système. Cette approche permet donc de réagir immédiatement à une défaillance, mais pas d'anticiper son évolution et ses conséquences sur le système. Quelques travaux récents [9]-[11] ont également porté sur la prise en compte de la fiabilité dans la conception d'une telle commande tolérante, en exploitant des lois de vieillissement. Il s'agit d'aller plus loin dans le cadre des travaux proposés en exploitant en temps réel les estimées de la dégradation des paramètres du système dans son ensemble. Un travail de modélisation sera nécessaire pour lier les différentes dynamiques mises en jeu : le modèle dynamique du système, le modèle d'évolution de la dégradation et enfin la commande en lien avec une mission de suivi de trajectoire par exemple. On pourra s'intéresser au cas test représentatif des lanceurs réutilisables en phase de retour, où les différents sous-systèmes critiques (moteur fusée, structure de l'engin, actionneurs aérodynamiques) sont couplés et nécessitent une attention particulière pour réussir l'atterrissage de l'engin via l'algorithme embarqué de guidage-pilotage. Un travail de modélisation spécifique sera nécessaire pour lier la dégradation ou la perte d'efficacité d'un ou plusieurs sous-système(s) aux performances du modèle de dynamique du vol utilisé pour la commande.

Les méthodes de commande développées pourront s'appuyer sur la commande prédictive, notamment dans ses versions robustes [12][13], qui propage naturellement un modèle dynamique du système et réactualise à chaque instant les informations sur l'environnement. Une autre approche généralement utilisée dans le domaine robotique ou aérospatial consiste à générer une trajectoire en tenant compte de la dynamique du véhicule et des contraintes sur l'état et la commande, puis à réaliser le suivi de cette trajectoire avec une commande plus simple (qui peut être une commande prédictive linéaire par exemple) [14][15]. On étudiera la prise en compte de la dégradation et de la durée de vie résiduelle estimées (notamment avec les outils ensemblistes précédemment développés) dans le cadre de ces différentes approches, afin d'aboutir à une démarche applicable à différents types de véhicules (lanceurs, drones à longue endurance, avions de transport).

Références

- [1] Robinson, E., Marzat, J., and Raïssi, T., Filtering and uncertainty propagation methods for model-based prognosis of fatigue crack growth in unidirectional fiber-reinforced composites. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, (2018).
- [2] Robinson, E., Marzat, J., and Raïssi, T., Interval observer design for unknown input estimation of linear time-invariant discrete-time systems. In *20th IFAC World Congress*, 2017, 50(1), 4021-4026. Toulouse, France.
- [3] Robinson, E., Marzat, J., and Raïssi, T. (2018), Model-based prognosis of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *SAFEPROCESS 2018*, Varsovie, Pologne. [IFAC Young Author Award].
- [4] Herrero, Pau, et al. "An Efficient Implementation of the SIVIA Algorithm in a High-Level Numerical Programming Language." *Reliable computing* 16.1 (2012): 239-251.
- [5] Wang Y., Puig V., Cembrano G., Set-membership approach and Kalman observer based on zonotopes for discrete-time descriptor systems. *Automatica*, 93, 435-443, 2018.
- [6] Combastel C., Zonotopes and Kalman observers: Gain optimality under distinct uncertainty paradigms and robust convergence. *Automatica*, 55, 265-273, 2015.
- [7] Zhang Y., Jiang J., Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 32(2), 229-252, 2008.

- [8] D. W. Brown, A prognostic health management based framework for Fault Tolerant Control, PhD thesis, Georgia Tech, 2011.
- [9] Guenab, F., Theilliol, D., Weber, P., Zhang, Y. M., Sauter, D., Fault Tolerant Control System Design: A Reconfiguration Strategy Based on Reliability Analysis Under Dynamic Behavior Constraints. In Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 2006 (pp. 1312-1317).
- [10] Bicking, F., Weber, P., Theilliol, D., Reliability importance measures for fault tolerant control allocation. IEEE Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 2013 (pp. 104-109).
- [11] Salazar, Jean C., Weber, Philippe, Nejari, Fatiha, Sarrate F., Theilliol D., System reliability aware model predictive control framework. Reliability Engineering & System Safety, 2017, vol. 167, p. 663-672.
- [12] Magni L., Raimondo D. M., Allgöwer F., Nonlinear model predictive control. Lecture Notes in Control and Information Sciences, n° 384, 2009.
- [13] Langson W., Chrysoschoos I., Raković S. V., Mayne D. Q., Robust model predictive control using tubes. Automatica, 40(1), 125-133, 2004.
- [14] S. De Ridder, E. Mooij. "Optimal Longitudinal Trajectories for Reusable Space Vehicles in the Terminal Area", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 48, No. 4, pp. 642-653, 2011.
- [15] Ambrosino G., Ariola M., Ciniglio U., Corraro F., De Lellis E., Pironti A., Path generation and tracking in 3-D for UAVs. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 17(4), 980-988, 2009.

Collaborations extérieures : Julien MARZAT (julien.marzat@onera.fr), ONERA Palaiseau, Département Traitement de l'Information et Systèmes.