

Soutenance de thèse

Francesco SANFEDINO soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA CSDV et intitulée «*Validation expérimentale d'un système de pointage de grande précision*»

Le 25 avril 2019 à 10H00 amphi 4 - ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

Mme Valérie POMMIER BUDINGER	Professeure ISAE-SUPAERO	Directrice de thèse
M. Daniel ALAZARD	Professeur ISAE-SUPAERO	Co-directeur de thèse
M. Fabrice BOQUET	Ingénieur European Space Agency ESTEC	
M. Luc DUGARD	Directeur de recherche GIPSA-LAB	
M. Philippe CHEVREL	Professeur Institut Mines-Telecom Atlantique	Rapporteur
M. Guglielmo AGLIETTI	Professeur University of Surrey	Rapporteur

Résumé :

L'imagerie satellitaire aide à la surveillance des terrains agricoles, à la cartographie, à la sylviculture et à la surveillance des eaux. Dans des situations de crise, l'imagerie peut contribuer à la conduite d'opérations de sauvetage et à l'atténuation des effets des catastrophes naturelles. Les missions modernes d'observation de la Terre actuelles requièrent de hautes performances en pointage fin qui justifient les nombreuses recherches sur l'atténuation des micro-vibrations et les systèmes de stabilisation de la ligne de visée. Les micro-vibrations sont une classe particulière de vibrations structurelles de petite amplitude (micrométrique) et avec un large contenu spectral. Elles se propagent depuis les sources aux éléments flexibles du satellite et provoquent la dégradation des images collectées et la perte d'une partie de l'information vitale. Dans les plateformes satellites, elles sont causées par différentes sources. Les roues à inertie sont généralement la source principale des micro-vibrations. D'autres composants comme les moteurs d'entraînement des panneaux solaires et des antennes ou les tuyères chimiques peuvent avoir un impact non négligeable. Pour augmenter la précision de pointage, les perturbations peuvent être réduites de manière passive en isolant les sources de vibrations, mais ces solutions sont inefficaces en basse fréquence. Des micro-vibrations résiduelles peuvent se propager dans le satellite et être amplifiées par la flexibilité des divers éléments de structures du satellite. Ce travail de thèse s'appuie sur une architecture basée sur un actionneur qui agit directement au niveau de la charge utile et sur un capteur intégré dans la ligne de visée. Les architectures conventionnelles de contrôle de ligne de visée utilisent des senseurs basse fréquence. Cette thèse propose d'intégrer un senseur de vitesse additionnel sur les éléments structurels les plus sensibles dans le chemin optique afin d'augmenter la bande passante du système actif de contrôle. La première contribution concerne la modélisation de structures flexibles. La méthodologie de modélisation multi-corps appelée «*approche Two-Input Two-Output Port (TITOP)*» est étendue aux cas des structures flexibles avec N ports (N-Input N-Output Port: NINOP). Cette méthodologie est appliquée aux systèmes spatiaux, notamment pour développer un modèle des panneaux solaires déployables, des roues à inertie et des moteurs d'entraînement des panneaux solaires. La versatilité de cette approche permet le co-design de problèmes structure/contrôle à travers l'assemblage de modèles élémentaires associés à chaque sous-structure. Toutes les incertitudes paramétriques peuvent être prises en compte pour mener une analyse de performance robuste avec les techniques modernes fondées sur la valeur singulière structurée. Ces modèles permettent l'analyse des performances de pointage sous l'effet des micro-vibrations et de leurs interactions avec les effets gyroscopiques des roues à réaction et les modes structuraux du satellite variant selon la rotation des panneaux solaires. La deuxième contribution de cette thèse concerne la synthèse des lois de commande.

Après une partie dédiée à la modélisation et l'identification des sous-systèmes de l'architecture de contrôle et à la quantification des incertitudes, une stratégie de contrôle robuste est présentée dans le cadre H_{inf}-structuré pour tenir en compte des incertitudes du système et fournir une preuve formelle des performances garanties dans le pire-cas. La dernière contribution est expérimentale. La confrontation des prédictions théoriques avec les résultats expérimentaux obtenus sur le banc d'essai développé à l'Agence Spatiale Européenne permet de valider l'approche proposée. Les résultats de cette thèse, tant sur le plan des modèles et des matériels expérimentaux, sont suffisamment génériques pour être transposés à diverses missions d'observation de la terre.

Mots-clés : Fast Steering Mirror, Contrôle robuste, Système spatial de Pointage

Summary:

Satellite imagery provides contributions to land surveying, cartography, forestry and water management. In crisis management scenarios imagery can help to carry out rescue operations and to mitigate the results of natural catastrophes.

Modern Space observation missions demand stringent pointing requirements that motivated a significant amount of research on the topic of microvibrations isolation and line-of-sight stabilization systems. Microvibrations are a particular class of structural vibrations of small amplitude (micrometer) and with a large spectral content. They propagate from the sources to the flexible elements of the spacecraft and they cause the degradation of the gathered images and the loss of part of the vital information. There are many sources of micro-vibrations in the spacecraft. Reaction wheels are generally the main ones. Also other components, such as solar array drive mechanisms, antenna stepper motors, antenna trimming mechanisms or chemical thrusters, can have a huge impact.

In order to have better pointing performances, the disturbances can be reduced by mounting some of the noisy equipment on various isolation platforms. However these solutions result ineffective at low frequency. Residual vibrations can still propagate through the spacecraft and be amplified by the flexible structure of the satellite. The present PhD thesis relies on an architecture based on an actuator that directly acts at payload level and on an additional rate sensor integrated in the line-of-sight. The conventional LOS control architectures use low frequency sensors. This work proposes to integrate an additional rate sensor on the most sensitive structural elements in the optical path to raise the bandwidth of the active control system.

The first contribution relates to the flexible structure modeling. The multi-body modeling methodology called "Two-Input Two-Output Port (TITOP) approach" is extended to the case of flexible structures with N ports (N-Input N-Output Port: NINOP). This methodology is applied to Space systems to develop models of deployable solar arrays, reaction wheels and solar array drive mechanisms. The versatility of this framework allows the co-design of a structure/control problem by simple connection of elementary models associated to each sub-structure. All possible parametric uncertainties can be easily taken into account in order to perform robust performance analysis with the modern structured singular value techniques. These models permit the analysis of the pointing performances under the effect of microvibrations and their interactions with the gyroscopic effects of the reaction wheels and the spacecraft structural modes that vary with the solar panels rotation.

The second contribution of this work is about the control laws synthesis. Following a comprehensive model identification and uncertainty quantification part, the robust control strategy is designed in the structured-H_{inf} framework to account for plant uncertainty and provide formal worst-case performance guarantees.

The last contribution is experimental. The comparison of the theoretical predictions and the experimental results obtained on the test bench developed at the European Space Agency permits the validation of the proposed approach.

The results of this thesis, both on the modeling and experimental aspect, are generalized to be scaled to different observation missions.

Keywords: Fast Steering Mirror, Robust Control, Spatial Control System