Stabilité non-linéaire d'un moteur de fusée régulé en boucle fermée

Jules GIBART[1,2]

PhD Advisors: Hélène PIET-LAHANIER[1], François FARAGO[2]

[1]DTIS, ONERA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, Île-de-France, 91123, France

[2]CNES, Sous-Direction Techniques Systèmes de Transport Spatial, Paris, Île-de-France, 75612, France

Contexte

Moteur pré-réglé autour d'un point de fonctionnement:

- Réglé autour d'un petit nombre de points de fonctionnement connus
- Non-régulé, stabilité montrée avec une linéarisation autour du point de fonctionnement

Moteur régulé:

- Fonctionnement qui suit un scénario avec plus d'un point de fonctionnement
- Maintenir une exigence de stabilité sur une plage continue de fonctionnement

→Trouver une méthode de régulation pour garantir la stabilité et donner un domaine de stabilité du moteur

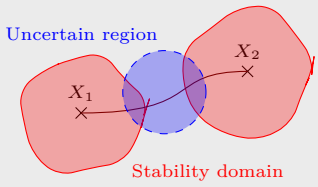

Figure 1:Formulation du problème

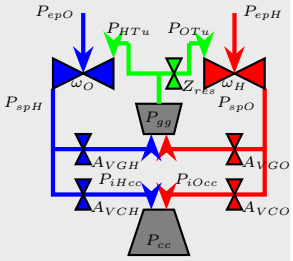

Figure 2:Schema du moteur étudié

Reformulation du système

Port-Hamiltonien:

- Reformuler selon une forme précise
- Permet de séparer les différents domaines physiques
- Obtention d'une fonction de stockage

$$\dot{x} = (J(x) - R(x))\frac{\partial H}{\partial x} \tag{1}$$

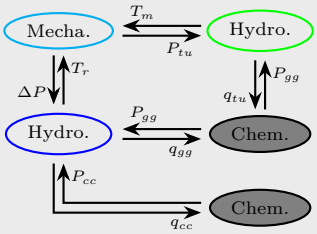

Figure 3:Domaines physiques d'un moteur

Stabilité en Port-Hamiltonien

- Stabilité asymptotique pour différents points de fonctionnement
- Contrôle par passivité
- Meilleure formulation pour la théorie de la contraction

Etude de la stabilité du moteur

Méthodes considérées:

1. **Recherche directe d'une fonction de Lyapunov:** recherche complexe et peu modulable en fonction du modèle
2. **Contraction Theory:** raisonnement sur des trajectoires de système permet une stabilité par rapport à une trajectoire
3. **Reformulation du système:** théorie Port-Hamiltonienne, permet une fonction de stockage pour la passivité simple

Contrôle à ouverture de vanne :

$$\dot{x} = u(f(x) - \frac{1}{u^2}g(x)) \tag{2}$$

Théorie de la contraction

Repose sur l'analyse des trajectoires d'un système : Définition d'un déplacement et d'une vélocité virtuels:

$$\delta\dot{x} = \frac{\partial f}{\partial x}(x,t)\delta x \tag{3}$$

Figure 4:Deux trajectoires voisines

Analyse et définition d'un contrôle

- Système non contractif
- Définition d'un contrôle à effet contractif sur le système
- → Contrôle stabilisant du système autour d'une trajectoire de référence
- → Pas d'élargissement du domaine de stabilité mais confinement du système dans ce domaine

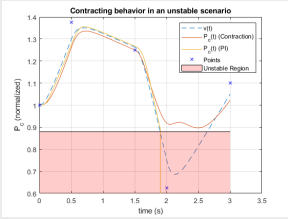

Figure 5:Comportement stabilisant

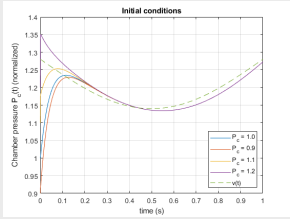

Figure 6:Oubli des conditions initiales

Article "Regulation of a Liquid Propelled Rocket Engine using Contraction Theory" NOLCOS 2023

Application

- Isolement des éléments problématiques
- Ajout de perturbations réalistes
- Application à des scénarios existants