

Amarrage collaboratif automatique et sécurisé d'un robot sur une plateforme mobile

Encadrants de la thèse : Luc Jaulin et Gautier Dreyfus

Laboratoire : Lab-STICC, ENSTA-Bretagne, Brest

Entreprise : FORSSEA, Palaiseau

Bourse : CIFRE

Doctorant candidat : Auguste Bourgois.

Problème

L'amarrage (ou *docking*) dynamique consiste à conduire un robot mobile (terrestre, spatial, aérien, marin, ou sous-marin) à venir se coller en douceur le long d'une plateforme mobile. On se place dans une situation collaborative dans le sens où la plateforme cherche à faciliter l'amarrage et peut communiquer avec le robot, par exemple pour lui transmettre ses données capteurs, comme celles de sa centrale inertielle.

Le problème peut se formaliser [5] de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) && \text{(équation d'évolution)} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} h(\mathbf{x}(t), t) &= 0 && \text{(condition d'amarrage)} \\ h(\mathbf{x}(t), t) &\geq 0 && \text{(contrainte de non-collision)}\end{aligned}$$

où $\mathbf{x}(t)$ est le vecteur d'état du robot et $\mathbf{u}(t)$ le vecteur de commande. La fonction h est une fonction de distance qui est négative en cas de collision et nulle si l'amarrage a eu lieu. Cette fonction dépend du temps car la plateforme se déplace.

L'objectif académique de cette thèse est de construire une méthodologie permettant d'élaborer une loi de commande de la forme $\mathbf{u} = \mathbf{r}(\mathbf{x}(t), t)$ telle que le système bouclé satisfasse les conditions d'amarrage et de non-collision. Pour cela, des méthodes non-linéaires asymptotiques [4] pourront être utilisées afin de trouver un régulateur candidat. Une validation devra ensuite être faite par une méthode ensembliste utilisant le calcul par intervalles [6]. L'approche devra être généralisée dans un contexte incertain, où l'évolution du système est décrite par une inclusion différentielle permettant de modéliser les perturbation extérieures (vagues, vent, ...), et où l'état n'est obtenu que indirectement à travers un observateur d'état utilisant des données capteurs plus ou moins précises.

Application

A titre d'application, nous considérerons, avec l'entreprise FORSSEA, le problème de l'amarrage d'un robot sous-marin en forme de torpille appelé *REMORA* pour le ravitaillement d'un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) en eau profonde. *REMORA* est un véhicule filo-guidé sous-marin capable de guider un ombilical depuis un navire jusqu'à un AUV afin de le recharger et de réaliser un transfert de données haut-débit. FORSSEA a travaillé sur ce concept depuis sa création afin de répondre à des besoins civils et militaires.

La thèse devra permettre de définir les capteurs nécessaires à chacun des scénarios d'approche et d'accroche.

- Approche de REMORA vers l'AUV à l'arrêt (0-800m)
- Approche de REMORA vers l'AUV, REMORA étant tracté. Pour se faire des ailerons seront dimensionné et une loi de commande pilotera l'orientation des ailettes.
- Approche de REMORA avec l'AUV en avant lente sous le navire (profondeur faible 0-50m) afin d'éviter les conditions défavorables en surface

Ainsi, au sein de FORSSEA, les différentes missions pourront recouvrir :

1. **Conception mécanique** : collaboration avec les ingénieurs mécaniques et les techniciens afin de concevoir et dimensionner les ailerons / ailettes qui permettront de stabiliser le mouvement de REMORA. Des simulations numériques seront conduites à partir de logiciels spécialisés et permettront d'intégrer dans le modèle les forces de rappel générées par l'ombilical. Le doctorant devra réaliser un modèle de commande afin de piloter l'approche vers l'AUV à partir des données de profondeur.
2. **Équation robotique**. Définir le modèle cinématique de REMORA et de l'AUV en se basant sur les équations de Fossen [3]. Définir la meilleure répartition de poussée et optimiser la propulsion (nombre et orientation des moteurs)
3. **Filtre de Kalman** : définir les capteurs de navigations cohérent (centrale inertielle, acoustique, vision...) et les intégrer au filtre de Kalman de REMORA. Étudier la faisabilité d'y fusionner des données de surface (cap et vitesse du navire, condition de mer, tension de l'ombilical) afin d'anticiper les mouvements parasites de REMORA. Pour la fusion, on pourra améliorer l'intégrité de la méthode en combinant avec une méthode ensembliste [7].
4. **Navigation autonome et poursuite** : Concevoir les lois de contrôle/commande pour stabilisation de la profondeur puis de la poursuite de REMORA vers l'AUV [2]. Générer les trajectoires de poursuites. Estimer la robustesse et la précision du docking en fonction du bruit intrinsèque des capteurs.

Enfin, il est convenu que compte tenu de son rôle d'ingénieur de recherche au sein de FORSSEA, le doctorant sera le référent scientifique du projet REMORA :

- Coordination avec un industriel (THALES UNDERWATER SYSTEM) pour adaptation à leur drone;
- Gestion de projet (sous-traitant, planning, budget);
- Encadrement d'un stagiaire.

Organisation

La thèse se passera 50% du temps à Brest à l'ENSTA Bretagne et 50% du temps à Palaiseau chez FORSSEA. Elle se déroulera sur trois ans comme suit.

- Étape 1 (6 mois). Le doctorant effectuera une étude bibliographique complète sur les méthodes de modélisation des systèmes sous marin. Il étudiera également les méthodes de contrôle non-linéaires classiques, comme celle de la linéarisation par bouclage [1] et sur les méthodes d'estimation [8]. Les méthodes d'estimation, qu'elles soient ensemblistes ou probabilistes seront utilisées pour la localisation absolue et relative.
- Étape 2 (6 mois). Afin de se familiariser avec ces outils théoriques, il conviendra de réaliser quelques implémentations liées du problème de docking sur un environnement logiciel utilisant un Middleware adapté à la robotique et au milieu sous marin, comme ROS ou MOOS. On utilisera ici des méthodes classiques issues de la littérature.

- Étape3 (6 mois). Proposer des méthodes originales, robustes et intègres pour la résolution du problème de docking. Ces méthodes seront motivées d'une part par la poursuite de l'AUV par REMORA puis par l'opération d'amarrage.
- Étape 4 (6 mois). Valider les méthodes proposées par des expérimentations réelles mais également de façon théorique. Ces validations devront faire l'objet de publication dans des revues internationales et dans des congrès reconnus.
- Étape5 (1 an). Rédiger la thèse en prenant en compte à la fois l'état de l'art, les résultats obtenus, les expérimentations effectuées et les liens avec les besoins de l'entreprise FORSSEA.

References

- [1] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and applications. *International Journal of Control*, (61):1327–1361, 1995.
- [2] T. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, New York, NY, 1995.
- [3] T. Fossen. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.
- [4] L. Jaulin. *Automation for Robotics*. ISTE editions, 2015.
- [5] L. Jaulin. *Mobile Robotics*. ISTE editions, 2015.
- [6] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, and E. Walter. *Applied Interval Analysis, with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*. Springer-Verlag, London, 2001.
- [7] J. Nicola and L. Jaulin. Contractors and linear matrix inequalities. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B. Mechanical Engineering*, 1(3), 2015.
- [8] E. Walter and L. Pronzato. *Identification of Parametric Models from Experimental Data*. Springer-Verlag, London, UK, 1997.