Manipulation d'Objets Sous-marin par une flotte de robots via une structure de Tensegrité Sur-contrainte (MOSTS)

Directeur de thèse : Lionel Lapierre (HDR)

Co-directeur de thèse : Christophe Viel (CR)

Mots clef: multi-agent system, tensegrity formation control, overactuated system and control allocation, underwater manipulation, heavy object manipulation

Description :

La manipulation d'objets lourds sous l'eau est généralement faite à partir de la surface via des bateaux ou des barges mobiles. La dépose de câbles sous-marins, de pipelines de gaz, ou encore des ancrages d'éoliennes flottantes off-shore se font sur ce principe. En archéologie, des caisses précédemment larguées et parfois des épaves entières sont remontées à partir de câbles tirés depuis un ou plusieurs bateaux de surface. Cependant, il n'est pas toujours évident de positionner de manière précise les objets depuis la surface, surtout lorsque les profondeurs sont importantes, et certaines zones sont parfois inaccessibles du fait de la morphologie du terrain ou de la présence de structures existantes (grotte, renfoncement dans la paroi, tête de puits, etc.).

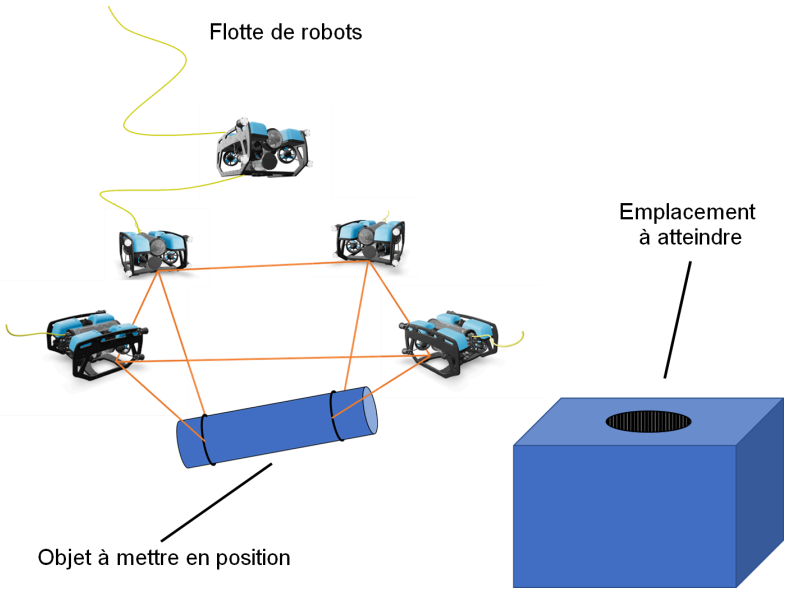

Figure 1: Formation de robots guidant un objet jusqu'à son emplacement à l'aide de câbles

Nous proposons donc d'utiliser une flotte de robots agissant de concert afin de manipuler des objets (lourds et/ou volumineux) pour les remonter/immerger et les accompagner durant toute la

montée/descente de manière à obtenir des trajectoires plus complexes, souples, et un positionnement final plus précis. Le sujet reposant sur le transport d'objets rigides par les robots via des câbles, l'idée est d'effectuer une formation de robot basée sur les structures de tenségrité afin d'équilibrer et de stabiliser la structure globale. Le système peut ainsi être assimilé soit à une flotte de N robots collaboratifs, soit à un système unique à M actionneurs redondants et dont la géométrie est dynamiquement reconfigurable. L'utilisation de plusieurs "petits" robots plutôt qu'un seul "gros" robot permettrait plus de flexibilité dans la manière de saisir l'objet en question (par plusieurs points), des mises à l'eau plus simples, ainsi qu'une gestion active de la redondance d'actionnement pour sur-contraindre le système global et ainsi augmenter sa stabilité, sa robustesse, sa réactivité et globalement les performances de l'opération.

Les principales problématiques sont :

- définir la forme optimale, et ses variantes, de la structure de tenségrité en fonction de l'objet à saisir et de la trajectoire à lui faire suivre,
- définir les commandes pour se mettre en formation, la maintenir de manière stable en déplaçant l'objet, et la faire continûment évoluer en fonction des contraintes environnementales et de l'évolution de la pose de l'objet.
- choisir le mode de communication sous-marin entre les robots et gérer les échanges pour le bon fonctionnement de la commande.

1) <u>Inscription du projet dans les axes prioritaires de la DGA</u>

Notre projet s'inscrit dans l'axe thématique ROBOTIQUE. Comme il sera plus largement décrits dans les prochaines sections, ce projet permet de répondre aux attentes suivantes :

A) SOUS-THÈME 1 : LOCALISATION ET NAVIGATION

- « Résilience de la localisation et de la navigation » : la formation tenségrité permet de garder une forme stable et la commande sur-contrainte une robustesse aux perturbations extérieures (vagues, courants) avec un positionnement précis. La structure avec les câbles et leur mise en tension empêchent également les robots de s'éloigner plus d'une certaine distance, ce qui contribue à déduire des informations sur la forme globale de la structure.
- « Perception et analyse de l'environnement local » : la multitude de robot présent permet une analyse collaborative depuis plusieurs points de vue de la scène grâce aux capteurs embarqués des robots
- « Cobots » : un opérateur guide un des robots de la flotte, et le reste de la flotte s'adapte à lui comme une gigantesque pince téléopérée

B) SOUS-THÈME 2 : ARCHITECTURE DES PLATEFORMES ROBOTISÉES

- « Gestion du contrôle commande bas-niveau (dérapage, glissement, franchissement, etc.) pour la téléopération assistée » : via la formation et la commande sur-contrainte, l'orientation et le positionnement d'objet lourd sous l'eau.
- « Systèmes low cost, Systèmes low tech » : nous proposons d'utiliser une flotte de petits robots moins chers à fabriquer et à déployer que plusieurs bateaux de surface imposant, moins maniables et consommateurs en carburant.

C) SOUS-THÈME 4 : AUTONOMIE

- « Autonomie décisionnelle adaptative et autonomie ajustable » : du fait du grand nombre de robots impliqués, les commandes et décisions devront être distribuées ou à minima décentralisées afin d'obtenir la réactivité souhaitée : il ne sera pas possible de piloter les robots un à un.
- « Allocation dynamique de tâches multicritères » : les robots devront d'eux-mêmes choisir la meilleure formation à adopter afin de répondre à l'orientation et positionnement souhaité de l'objet à déplacer.

Les sections suivantes décrivent les thématiques principales du projet, permettant de mieux comprendre leurs liens avec les axes précédemment décrits.

2) Formation par tenségrité

Les structures de tenségrité, mêlant tension et intégrité, reposent sur l'équilibre délicat entre éléments comprimés (soit rigide, soit compressible avec des ressorts) et des câbles tendus flexible (voir Figure 2). Comparées à l'architecture classique, elles permettent des structures beaucoup plus légères tout en gardant une grande résilience. Depuis une dizaine d'années, ce concept a commencé à être utilisé en robotique pour définir les relations entre agent au sein d'une formation [1,2,3] : au lieu de définir des distances fixes à maintenir entre robot, ceux-ci cherchent un équilibre entre quelques distances fixes («élément rigide»), des distances maximales à ne pas dépasser entre agent («câbles flexibles»), et parfois des distances minimales («ressorts»), comme illustré dans Figure 3.

Figure 2: Exemple de structure par tenségrité. La partie supérieure de la structure est maintenue en l'air uniquement par des câbles flexibles tous en dessous d'elle.

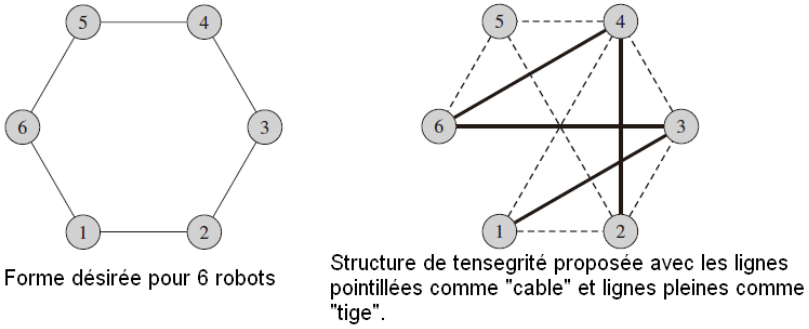

Figure 3: Exemple de formation par tensegrité proposé par [1]

Le sujet de thèse proposé associe les approches de tenségrité pour spécifier la formation optimale et les commandes coordonnées des agents pour réaliser et tenir les contraintes associées. En première approche, l'objet à transporter sera considéré comme un élément rigide, soutenu par des câbles le reliant à la flotte de robots. Les robots pourront être eux aussi reliés physiquement par des câbles pour distribuer les efforts, ou contraints à maintenir un lien «virtuel» dont les propriétés dynamiques seront assurés par les lois de commande distribuées

On note que la structure à déplacer pourra être également principalement soutenue par un navire de surface qui reprend l'essentiel du poids, pendant que la flotte de robots sous-marins assurera le guidage horizontal et en attitude pour la positionner finement. La flotte devient ainsi hétérogène où les rôles de chacun pourront être spécialisés si besoin avec des porteurs, des guideurs et des observateurs.

2) Déplacement de la structure via des câbles

Les robots à câbles, également connus sous le nom de robots parallèles à câbles, utilisent des câbles pour contrôler les mouvements de leur plateforme (voir Figure 4). La conception des robots à câbles implique généralement une structure parallèle, où plusieurs câbles sont attachés à des points stratégiques de la plateforme robotique. Ces câbles, contrôlés de manière précise, permettent des déplacements multidirectionnels avec une grande précision. Les avantages de cette technologie résident dans sa capacité à manipuler des charges lourdes tout en maintenant une grande agilité, ainsi qu'à s'adapter à des environnements variés [4].

Le déplacement de la structure sous l'eau par la flotte de robot ressemble dans un certain sens à une structure de robot à câble mobile, à la différence que nous ne prévoyons pas de mettre de mécanisme d'enroulement sur les robots (mais possible sur un bateau) : la variation de

longueur des câbles sera remplacée par les déplacements relatifs des robots sous l'eau. Les travaux sur les robots à câbles pourront cependant constituer une base pour obtenir un contrôle flexible en rotation et position de l'objet à manipuler.

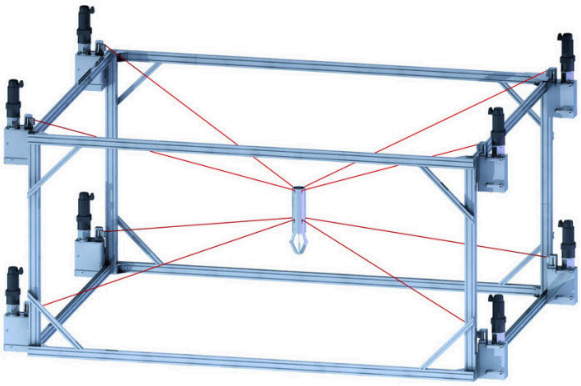

Figure 4: Exemple de robots à câble. La pince au centre est déplacée de manière précise en position et orientation grâce aux huits câbles en tension.

3) Commande sur-contrainte

La commande sur-contrainte représente une approche ingénieuse dans le domaine de l'automatisation, où les systèmes sont délibérément soumis à des contraintes supplémentaires pour optimiser leurs performances. Cette méthode implique la manipulation des variables de contrôle au-delà de ce qui est strictement nécessaire, permettant ainsi de répondre de manière proactive aux variations et aux perturbations. En intégrant la commande sur-contrainte, les systèmes peuvent atteindre une adaptabilité accrue, améliorant leur capacité à maintenir la stabilité et à fournir des positionnements précis même dans des conditions environnementales dynamiques et changeantes, utile dans notre contexte où les courants et les vagues peuvent avoir une grande influence durant la mise en place [5].

La structure obtenue par l'objet à transporter, les câbles et les robots peut être assimilée à un système unique où les robots sont les actionneurs. En ajoutant des robots supplémentaires ,au minimum requis pour déplacer un objet dans l'espace, on peut ainsi obtenir une commande sur-contrainte du système qui permettra de déplacer et positionner de manière précise la structure transportée. Les robots supplémentaires permettent également une redondance des tâches rendant le système résilient en cas de défaillance ou de panne avec la possibilité de re-configurer l'orientation des efforts en cas de besoin.

4) Contraintes particulières sous l'eau : communication et positionnement entre les robots

La communication sous-marine en robotique présente des défis uniques en raison de la propagation limitée des ondes radio sous l'eau. Les systèmes de communication utilisent souvent des signaux acoustiques pour transmettre des données, mais à faible débit. L'autre solution est l'utilisation d'un ombilical, un câble de communication, afin de transmettre à plus haut débit. Cependant, ce câble peut être sujet à des emmêlements et sa gestion doit être effectuée avec soin, surtout en présence d'autres câbles sous-marins.

De la même manière, les ondes GPS ne se propageant que de quelques centimètres sous l'eau, la localisation peut parfois s'avérer difficile. La visibilité faisant souvent défaut pour effectuer un positionnement relatif, l'utilisation de signaux acoustiques est la solution la plus souvent utilisée, mais elle est sujette à des interférences quand trop de systèmes l'utilise de manière simultanée et peut requérir plusieurs secondes de délai.

L'utilisation de câbles entre robots peut être une piste à envisager dans le cadre de cette thèse : ils permettraient d'assurer la communication entre les agents, et en se basant sur les structures de tenségrités ils pourraient permettre de donner des informations sur le positionnement relatif des robots en contraignant ceux-ci dans leur écartements maximaux, afin d'obtenir une formation avec moins d'information en entrée. La gestion des câbles faisant déjà partie des défis des structures en tenségrité, ces câbles additionnels ne seraient pas une contrainte supplémentaire.

5) Plan d'expérience et moyens à disposition

L'ENSTA dispose d'un bassin d'expérimentation de taille 3m x 4m x 3m dans ses locaux, et un nouveau de dimension 21m x 14m x 6m, financé par la région Bretagne, est en cours de construction. Trois robots reliés par câble de type ROV (remotely operated underwater vehicle) modèle BlueROV [6] sont déjà à disposition pour mettre en place une partie expérimentale durant la thèse. La commande et la communication entre ces robots font déjà l'objet d'étude et de tests, ainsi que de premier résultat sur la localisation : leur adaptation à la thèse semble donc aisée. Nous espérons ainsi obtenir des résultats expérimentaux pour appuyer les travaux théoriques, et à défaut un démonstration des méthodes étudiées

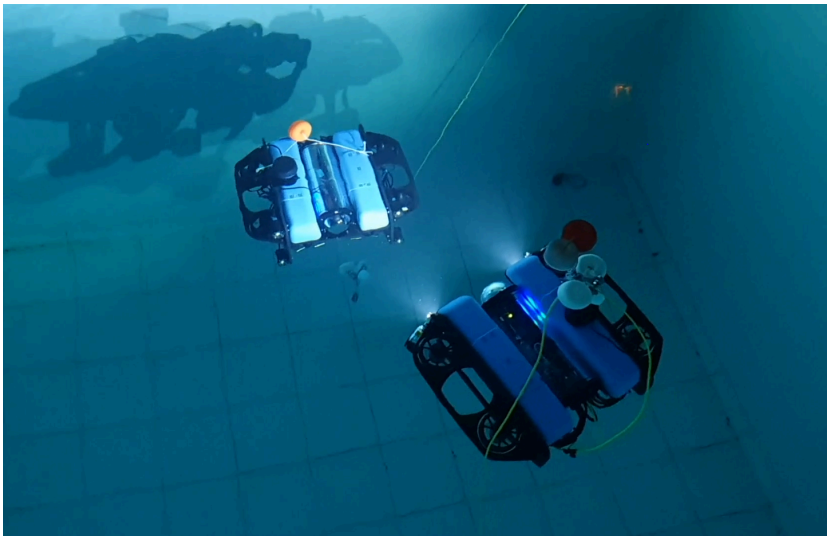

Figure 5 : robots BlueROVs cherchant à se faire face dans la piscine de l'ENSTA Bretagne

De plus, l'école a l'habitude d'emmener ses étudiants sur le lac de Guerlédan pour la réalisation de projets de robotiques : les lieux nous sont bien connus et pourront être utilisés pour des tests dans des conditions plus proche de la réalité qu'en bassin (visibilité réduite sous l'eau, courant marin, présences de sédiments et d'obstacles dans le fond, etc…) mais avec des conditions plus indulgentes que des tests en mer pour des premiers test.

[1] Qingkai, Y., Ming, C., Hao, F., Jie, C., & Jie, H. (2015, July). Distributed formation stabilization for mobile agents using virtual tensegrity structures. In IEEE 2015 34th Chinese Control Conference (CCC) (pp. 447-452).

[2] Lau, S. Y. and Naeem, W. (2015) Co-operative tensegrity-based formation control algorithm for a multi-aircraft system. American Control Conference (ACC) (pp 750--756).

[3] Viel, C., Bertrand, S., Kieffer, M., & Piet-Lahanier, H. (2019). Distributed event-triggered control strategies for multi-agent formation stabilization and tracking. Automatica, 106, 110-116.

[4] Izard, J. B., Gouttefarde, M., Michelin, M., Tempier, O., & Baradat, C. (2012). A reconfigurable robot for cable-driven parallel robotic research and industrial scenario proofing. In Cable-driven parallel robots (pp. 135-148).

[5] Nam, K. S., Lee, D. G., Ryu, J. D., & Ha, K. N. (2019). The basic study of underwater robot control for over actuated systems. *Proc. Eng. Technol. Innov*, *12*, 21-25.

[6] https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/