

Rapport sur le mémoire de thèse de doctorat de M. Joris Tillet, intitulé :

« **Safe Localization and Control of a Towed Sensor** ».

en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Bretagne Occidentale.

Rapporteur : Lionel Lapierre

Maitre de Conférence - HDR, section CNU 61

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier

M. Joris Tillet a effectué sa thèse à l'Université Bretagne Occidentale sous la direction de Luc Jaulin, au sein du laboratoire Lab-Sticc. Les travaux doctoraux de M. Tillet traitent de la commande et de la localisation d'un système robotisé, composé d'un tracteur autonome et d'un capteur tracté dont il faut précisément assurer le positionnement. Le contexte applicatif de ces travaux concerne les opérations de recherche de la Cordelière dans la rade de Brest.

Pour répondre à ces questions scientifiques, Mr. Tillet utilise des approches originales et pertinentes qui sont clairement exposées dans le manuscrit. Avant d'entrer dans le détail de l'analyse du manuscrit, je tiens tout d'abord à souligner la clarté et la juste concision dont l'auteur fait preuve.

Le manuscrit est en anglais, très agréable à lire et organisé de façon très pédagogique. Il comporte 153 pages, est organisé en 6 chapitres et intègre 167 références bibliographiques.

Le premier chapitre introduit les travaux en exposant les problématiques associées à l'archéologie sous-marine et présente l'objectif applicatif : la recherche de La Cordelière, disparue en rade de Brest en 1512. L'intérêt d'utiliser des solutions robotiques dans la recherche de vestiges archéologiques sous-marins est exposé et l'utilisation d'un magnétomètre pour la détection d'épave est justifiée. Ce type de capteur entraîne des contraintes sur le système robotique qui, par le champ magnétique généré par son actionnement, peut perturber les mesures acquises issues du terrain. Ainsi la solution du sonar tracté par un robot autonome est proposée et sa modélisation comme un système nonholonome de type voiture-remorque est proposée, avec l'hypothèse forte que la liaison entre le tracteur et le capteur reste constamment rigide. Ainsi la question de la régulation du système est assimilée à celle du contrôle de la position d'un système passif (la remorque) tracté par un actionnement déporté (le tracteur). Cette problématique peut s'avérer très complexe dans un cas général. Ainsi, les hypothèses d'absence de manœuvre et de vitesse constante du tracteur sont faites. Le cadre de la commande étant ainsi posé, une solution sera proposée dans la suite du document. Elle considèrera certaines contraintes cinématiques du système ainsi défini et leur respect sera démontré par une approche ensembliste.

Le problème de la localisation du capteur est ensuite décrit. L'auteur propose d'enrichir les solutions de type SLAM ensembliste d'une dimension probabiliste qui permet de fusionner des approches complémentaires qui sont généralement considérées comme antagonistes. Il s'agit là d'une contribution importante des travaux de M. Tillet.

Le deuxième chapitre présente les outils théoriques qui seront utilisés dans la suite du document pour construire les solutions aux problèmes précédemment exposés. Concernant la conception de la commande du système, une approche par linéarisation par retour d'état est retenue. Les principes de bases sont exposés et un exemple didactique est donné. L'exposé de la méthode est clair, mais aurait pu être plus succinct. Les principes de l'analyse par intervalle sont ensuite explicités et les outils sont définis. A nouveau les explications sont claires et illustrées de manière pertinente. Enfin, le troisième élément du corpus théorique introduit dans cette partie concerne l'approche par logique floue qui permet une représentation probabiliste des incertitudes. Ainsi l'association avec l'approche précédente est effectuée au moyen des ensembles dénommés ' $\alpha$ -cuts' qui dénotent une appartenance de probabilité supérieure à  $\alpha$ , et une fonction de score qui associe la confiance attribuée à certaines mesures aux garanties conservatives apportées par l'approche intervalliste.

Le chapitre suivant expose la conception de la commande du système. Le modèle retenu est celui d'un système articulé du type voiture-remorque avec liaison rigide. L'approche retenue est celle de la commande linéarisante par retour d'état, dont le critère d'application est celui de la platitude du système, présenté comme un critère de contrôlabilité qu'il faut toutefois restreindre à cette approche de la commande. Un exemple très didactique est introduit sur un modèle de système de type 'unicycle' et généralisé ensuite au système articulé. Il faut noter l'approche originale de l'auteur, qui consiste à utiliser un solveur symbolique pour déterminer l'expression analytique de la loi de contrôle, en fonction d'une dynamique désirée que l'on souhaite donner à la boucle fermée. Cette méthode est appliquée au modèle articulé pour lequel la dynamique désirée est choisie comme celle de l'oscillateur de Van der Pol. Des simulations confirment le comportement du système articulé qui suit effectivement le champ de vecteur désiré et converge vers le cycle limite attendu. La section suivante montre les deux systèmes sur lesquels des validations expérimentales ont eu lieu. La vérification du respect de certaines contraintes d'état peut être exprimée comme la résolution d'un problème inverse (*Set Inversion Problem*), comme la section suivante le montre en considérant l'angle limite entre le tracteur et la remorque et l'évitement d'obstacles.

Le chapitre 4 traite de la question de la localisation sous-marine au moyen de capteurs acoustiques. L'auteur introduit les principes de base, et les limites, de l'utilisation d'ondes acoustiques pour échantillonner l'environnement. La question des 'multi-chemins' et des échos parasites est très bien illustrée. Les différentes approches utilisables avec un sonar profilométrique (couvrant les 360°) et la corrélation faite avec les données connues de l'environnement sont exposées. L'auteur souligne l'importance d'identifier une 'primitive pertinente' (*relevant constraint*) dans les relevés sonars. En effet, les pics détectés dans les 'skyline' du sonar peuvent être dus à de nombreux phénomènes, et quand bien même ils correspondent à des échos de l'environnement, l'incertitude d'identification qui leur est attachée complique le processus de localisation. Ainsi, l'auteur propose très judicieusement d'utiliser les 'silences' des échos sonars qui correspondent de manière certaine à une absence d'obstacles. Ainsi la carte des 'vides' peut être construite et l'allure de l'environnement reconstruite et comparée à la connaissance antérieure pour procéder à la localisation de l'engin. Il s'agit là d'une contribution de ces travaux. De nouveaux contracteurs sont proposés et permettent d'adresser la localisation du système dans un environnement connu comme un problème ensembliste inverse. Des simulations convaincantes sont menées et une validation expérimentale est menée sur le robot BlueRov muni d'un sonar rotatif Micron dans le bassin expérimental du laboratoire.

Le chapitre 5 expose la contribution majeure des travaux de thèse de Mr. Tillet, et propose une association de l'approche intervalliste, dont les résultats sont garantis mais qui requiert des informations certaines, avec l'approche par logique floue, qui permet d'exprimer des incertitudes sur les mesures et d'approcher les résultats de manière probabiliste. L'association est faite au moyen de la fonction de score et des

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier - UMR 5506



161 rue Ada • F - 34095 Montpellier Cedex 05 • Tél : 33 (0)4 67 41 85 85 • Fax : 33 (0)4 67 41 85 00 • [www.lirmm.fr](http://www.lirmm.fr)



ensembles ' $\alpha$ -cuts' précédemment introduits et les outils de l'analyse par intervalle sont employés pour résoudre le problème inverse de localisation. Des simulations sont proposées pour illustrer les performances de la méthode proposée. Ces résultats indiquent clairement une prise en compte conjointe des résultats garantis issus de l'approche intervalliste et d'une distribution probabiliste de certaines mesures. Une application à un robot sous-marin est effectuée. Ici, les mesures d'un sonar profilométrique renvoient une '*skyline*' dans laquelle une majorité d'échos sont dus au parasitage de la surface et au phénomène de multi-chemins. La simulation montre qu'un choix judicieux du paramétrage de la méthode permet de rejeter les données parasites et de résoudre la localisation de l'engin. Une expérimentation réelle en piscine est effectuée et confirme les résultats attendus.

Le dernier chapitre conclut le document et présente les perspectives ouvertes par ces travaux.

Le manuscrit proposé par Mr. Tillet est très agréable à lire, bien rédigé et pertinent sur bien des aspects. Il faut souligner le large spectre de scientifique que représentent les questions traitées par ces travaux.

- La commande d'un capteur tracté par un système autonome est réalisée avec rigueur. On aurait aimé voir des validations expérimentales plus nombreuses et analysées, ainsi que quelques préconisations pour lever les hypothèses faites sur le modèle. Mais comme souvent, un travail scientifique rigoureux ouvre plus de nouvelles pistes qu'il n'en résout.
- La considération conjointe des approches intervalliste et stochastique est une contribution majeure de ces travaux. Elle ouvre des perspectives qui vont bien au-delà de l'application visée par les travaux de M. Tillet.

Ces travaux ont donné lieu à une publication internationale. Ils mériteraient une meilleure diffusion.

En conclusion, le manuscrit proposé par M. Tillet relate de travaux doctoraux de qualité menés avec une rigueur scientifique certaine. Pour toutes ces raisons, je donne un avis très favorable à la soutenance de cette thèse.

Montpellier, le 23/09/2021,



Lionel Lapierre

