

Palaiseau, le 17 juin 2022

## **Rapport sur le mémoire de thèse présenté par Monsieur Julien Damers**

### **Lie groups applied to localisation of mobile robots**

Hélène PIET-LAHANIER  
Directeur de Recherche à l'ONERA  
Département Traitement Information et Systèmes  
ONERA

#### **Situation du sujet de thèse**

Le travail présenté par Monsieur Julien Damers en vue de sa soutenance de thèse concerne le développement de méthodes de localisation pour la navigation d'un robot sous-marin autonome.

Le besoin croissant de faire réaliser un certain nombre d'opérations en environnement sous-marin par des véhicules autonomes nécessite que ces robots disposent de moyens de localisation à la fois précis et fiables. Dans le cadre de cette thèse, il est proposé d'élaborer des méthodes originales permettant d'améliorer la précision de prédiction de la trajectoire d'un robot et de sa localisation à partir de l'information issue de capteurs bas coût équipant cet AUV.

Pour ce faire, l'élément clé développé dans cette thèse est une méthode d'intégration garantie exploitant les symétries de Lie et les approches à erreur bornée, qui permet de déterminer l'ensemble des états finaux d'une trajectoire en étant robuste à des incertitudes d'amplitudes importantes sur les conditions initiales de cette trajectoire.

L'approche développée est tout d'abord utilisée pour caractériser l'ensemble atteignable par un système compte tenu de méconnaissances importantes sur son état initial puis au problème de localisation d'AUV qui était à l'origine de ces recherches.

#### **Structure du mémoire**

Le mémoire de thèse de Monsieur Julien Damers est constitué de 6 chapitres, d'un chapitre de conclusion et de deux annexes.

Le premier chapitre consiste en une introduction au problème abordé dans la thèse, où sont rappelés les motivations, le contexte et les objectifs. A l'issue d'une description synthétique des deux domaines méthodologiques sur lesquels vont s'appuyer les développements proposés, la structuration du manuscrit est présentée. Les chapitres 2 à 4 suivants vont tout d'abord permettre d'introduire de façon détaillée les notions de base des domaines évoqués dans l'introduction pour les décliner plus spécifiquement dans le contexte de la thèse : notion d'ensemble d'appartenance, analyse par intervalles, intégration garantie et groupe et symétries de Lie. De nombreux exemples sont utilisés pour permettre d'explicitier les principes fondamentaux de ces représentations sans pour autant avoir recours à un formalisme mathématique trop complexe. Le chapitre 5 intègre l'ensemble des développements présentés précédemment afin d'aboutir à la construction de la méthode d'Intégration garantie de Lie qui est au cœur des contributions de cette thèse. Le chapitre 6 présente ensuite l'utilisation de cette nouvelle méthode à deux problèmes de robotique, qui sont tout d'abord l'analyse de faisabilité d'une mission traduit sous forme de caractérisation d'espace

atteignable pour les états d'un robot et enfin le problème de localisation qui avait déjà été discuté dans l'introduction.

Le dernier chapitre présente les conclusions et perspectives de ce travail. Deux annexes et la bibliographie complètent le manuscrit. Ces annexes présentent successivement des compléments aux chapitres 5 et 6 sous forme de figures et d'illustrations complémentaires et de description d'évolution d'erreur de suivi de trajectoire de robot tondeur de pelouse.

## **Analyse du mémoire**

Le chapitre d'introduction fournit des éléments de contexte sur la problématique de la navigation pour les véhicules autonomes intelligents. L'évolution du besoin en types et niveaux de tâches pouvant être effectuées par des AUVs est clairement exposée ainsi que l'impact de ce besoin en termes de précisions de localisation et d'évolution des trajectoires. Ce chapitre est très synthétique et clair et fournit en quelques pages une description bien structurée des motivations, objectifs et contributions de la thèse.

Le chapitre 2 présente tout d'abord la modélisation de la dynamique des robots mobiles sous forme d'ensemble condition initiale et équation différentielle. La problématique de la prise en compte des incertitudes et méconnaissances diverses lors de la caractérisation de l'évolution de ces systèmes dynamiques est abordée par le biais de l'analyse par intervalle. Après un rappel des principales définitions de base du calcul par intervalles, les problèmes robotiques initialement posés sont traduits sous la forme de problèmes de satisfaction de contraintes. Des exemples qui seront également utilisés dans les chapitres suivants sont présentés afin d'illustrer de façon pédagogique les principaux outils exploités dans l'analyse par intervalle, e. g. les contracteurs et l'inversion d'ensemble par Sivia. Une attention particulière est portée à la notion de trajectoire en tube pour laquelle sont adaptés spécifiquement un certain nombre des outils précédemment cités. Leurs déclinaisons au cas des trajectoires en tube s'accompagnent de la fourniture de fonctions spécifiques décrivant les opérateurs principaux exploitant la librairie CODAC (pour Catalog Of Domains and Contractors) Deux remarques peuvent être faites sur ce chapitre. Tout d'abord, l'introduction des fonctions CODAC dans le texte du chapitre fait perdre de la cohésion dans la lecture et on peut regretter ici l'absence d'une annexe synthétisant ces différentes fonctions qui vont être par la suite également introduites au fil de l'eau dans les chapitres suivants. Il serait plus simple de leur dédier un paragraphe spécifique ou une annexe. D'autre part, il manque un tableau de synthèse permettant de résumer en un seul endroit les différents opérateurs introduits car le souci méritoire d'intercaler des exemples pour illustrer les définitions et propositions fait que l'information est relativement diluée sur plusieurs pages.

Le chapitre 3 est consacré aux approches d'intégration garantie. Il s'agit au préalable de transformer l'équation différentielle de dynamique en une inclusion différentielle en faisant l'hypothèse que l'ensemble des paramètres méconnus de la dynamique sont constants durant le temps d'intégration. Parmi les différentes approches développées pour effectuer une intégration garantie, une attention particulière est portée à l'algorithme de Löhner à base de développement de Taylor et de schéma d'Euler. Cette description détaillée est utilisée pour mettre en évidence les limitations de cet algorithme ce qui permettra par la suite d'évaluer les améliorations apportées par l'approche d'intégration de Lie décrite au chapitre 5. De même que dans le chapitre précédent, les fonctions implantées dans CODAC pour réaliser une intégration garantie par l'algorithme de Löhner ou en exploitant la librairie CAPD sont présentées. Une première évaluation du temps d'exécution en CODAC de l'intégration garantie par Löhner ou par utilisation de CAPD montre que cette dernière approche est beaucoup plus intéressante de ce point de vue. Il faut noter que cette évolution de CODAC est une contribution de cette thèse.

La présentation de ce chapitre est également claire et bien structurée. On peut regretter que l'argumentaire pour la justification du choix de l'algorithme de Löhner dans sa version directe ou améliorée dans CAPD soit un peu succinct. Il aurait été également intéressant de préciser quelles sont les améliorations apportées à l'algorithme de Löhner dans la version CAPD et comment elles se situent parmi celles évoquées au paragraphe 3.4.6

Le chapitre 4 est, quant à lui, consacré à la présentation des groupes de Lie et de leurs applications aux équations différentielles. Comme dans les chapitres précédents, Julien Damers introduit une partie des notions nécessaires en s'abstenant de rentrer dans un formalisme complexe mais en exploitant les exemples illustratifs qu'il a introduits précédemment. Cela lui permet d'aller rapidement vers les propriétés essentielles des groupes de Lie appliqués aux équations différentielles qu'il va exploiter par le biais de l'introduction d'une des contributions majeures de sa thèse que sont les fonctions transport. L'idée est particulièrement intéressante puisqu'elle permet par la décomposition en symétries de Lie de trouver une fonction permettant de transformer un point de référence en un autre point recherché et de permettre ainsi d'effectuer la transformation inverse de façon efficace et rapide. Il aurait peut-être été intéressant d'introduire dès ce chapitre l'exemple robotique du chapitre 5 pour permettre de détailler la notion de fonction transport dans ce cas et décliner les décompositions possibles en symétries de Lie des dynamiques représentatives des robots étudiés.

Ces trois chapitres fournissent ainsi l'intégralité des notions et outils nécessaires pour présenter au Chapitre 5 la méthode d'intégration garantie qui est la contribution majeure de ces travaux. Il s'agit dans ce chapitre de montrer comment une combinaison intelligente de ces outils fournit une approche palliant une grande partie des limitations des méthodes d'intégration garantie sur un domaine étendu de conditions initiales tout en présentant des performances très intéressantes en terme de temps de calcul. L'ensemble des outils ayant été définis précédemment, la présentation de la méthode est relativement brève et une partie du chapitre est consacré à la comparaison des performances obtenues avec celles des algorithmes de Löhner, CAPD et Flow. Un nouvel exemple est introduit pour permettre d'autres comparaisons et illustrer certains points durs de la méthode. La volonté de pédagogie est à souligner ici mais l'utilisation des exemples présente l'inconvénient de masquer en partie la difficulté sous-jacente de cette approche qu'est la recherche de la fonction transport. Néanmoins, comme parmi les exemples proposés figure un cas d'application robotique, ces présentations permettent d'estimer la pertinence de la démarche pour le cas d'application envisagé en priorité dans cette thèse.

A l'issue du Chapitre 5, Julien Damers a fourni une description exhaustive et illustrée par de nombreux exemples de la démarche d'intégration garantie de Lie. Dans le chapitre 6, cette méthodologie va être plus spécifiquement appliquée aux problèmes initiaux présentés dans l'introduction que sont la prédiction de trajectoire et la localisation garantie de robots sous-marins. Avant d'aborder ces deux aspects, le problème de satisfaction de contraintes est redéfini dans le cadre plus général de la représentation en réseau de contraintes. La détermination d'ensembles de solutions de problèmes de ce type nécessite la définition d'un contracteur de réseau auquel est associée une fonctionnalité CODAC. Un complément de cet outil, le contracteur de contracteur de réseau développé dans le cadre de cette thèse, est présenté afin de faciliter la prise en compte de l'évolution des espaces de recherche. La suite de ce chapitre est consacrée à l'évaluation de prédiction de trajectoire et à la localisation sous forme de réseaux de contraintes. Le premier cas d'application est abordé sous l'angle de la détermination d'espaces atteignables compte tenu de méconnaissances et d'incertitudes sur les états initiaux. Cette représentation est efficace et bien adaptée à l'utilisation des outils d'intégration de Lie. Le problème de localisation est étudié dans le

contexte où les seules mesures disponibles sont la distance à une balise identifiée. L'efficacité de la méthodologie développée peut être ainsi démontrée dans un cas notoirement difficile.

Le chapitre 7 présente les conclusions et perspectives de ce travail. Une description synthétique des travaux est fournie soulignant les innovations apportées au domaine de l'intégration garantie dans ce travail de thèse. Il aurait été judicieux de relier les publications de Julien Damers avec ces améliorations. Il serait également nécessaire de rappeler les différentes contributions logicielles de façon plus détaillées afin de souligner la capacité du doctorant à diffuser ses résultats au sein de la communauté scientifique.

Les remarques sont tout à fait pertinentes concernant les améliorations potentielles, court à moyen terme.

Les deux annexes sont relativement courtes. Il aurait pu être envisagé d'intégrer les figures présentées directement dans le manuscrit.

### **Conclusion**

Le travail présenté par Monsieur Julien Damers constitue un apport important dans le développement de méthodes d'intégration garantie pour des systèmes dynamiques avec des méconnaissances et des incertitudes représentés sous forme d'erreur bornée.

Le travail présenté est conséquent et propose une démarche originale qui à partir de la notion de fonction de transport permet de disposer d'une méthode d'intégration capable de traiter des variations importantes des conditions initiales tout en limitant le besoin en ressources de calcul. Le manuscrit est bien construit et le document a été construit dans une volonté très nette de pédagogie en s'appuyant sur un grand nombre d'exemples. Il faut souligner également le souci permanent de rattacher la méthode présentée au contexte applicatif puisque des applications spécifiquement robotiques sont détaillées dans un chapitre dédié. Monsieur Julien Damers a fait preuve de connaissance étendue dans les domaines de l'estimation, de la modélisation et des mathématiques appliquées. Il a proposé une méthodologie originale permettant d'effectuer la prédiction de la trajectoire et la localisation garantie d'un robot mais dont le domaine d'utilisation dépasse largement ce contexte applicatif. Ces travaux ont donné lieu à une publication en conférence et une publication à paraître dans Automatica. En conséquence, je suis tout à fait favorable à la soutenance de sa thèse.



Hélène Piet-Lahanier

Directrice de Recherche ONERA

Adjoint Scientifique Département Traitement de  
l'Information et Systèmes