

David Daney  
Chercheur Inria, HDR  
06 78 30 17 65  
david.daney@inria.fr

Talence, le 22 Novembre 2019

Rapport sur le manuscrit intitulé « **Bracketing largest invariant sets of dynamical systems** » présenté par Thomas Le Mézo, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'ENSTA Bretagne, spécialité Robotique au sein de l'école doctorale 602 Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication. La thèse a été préparée sous la direction de Luc Jaulin, Damien Massé et Benoit Zerr.

Dans sa thèse, Thomas Le Mézo s'intéresse à l'encadrement des plus grands ensembles invariants de systèmes dynamiques. Ce problème est important mais nécessite de se poser la question de la représentation en machine des propriétés d'ensemble de chemin, ceci de façon garantie. Pour cela, le candidat définit un nouveau domaine abstrait appelé « **maze** » et propose d'utiliser des techniques d'analyses par intervalles et de programmation par contraintes pour les caractériser. Ces outils, complètement originaux et pertinents, servent à répondre à de nombreux problèmes concernant les systèmes dynamiques. Enfin, ces travaux sont appliqués aux robots sous-marins dérivant dans les courants océaniques.

Le mémoire de 204 pages, présenté par Thomas Le Mézo, est rédigé en anglais et comprend 6 chapitres dont une introduction et une conclusion générale et recense 97 références.

Une courte **introduction générale** est tout d'abord présentée (pp 5-14) en chapitre 1. Elle présente de façon très claire le contexte et les problématiques en robotique sous-marine. Le candidat pose tout d'abord une question centrale « **Serait-il possible d'utiliser les courants marins comme principale source de propulsion ?** » (à l'image de ce qui se fait pour les satellites grâce à la gravité), ce qui est une réponse astucieuse aux enjeux environnementaux pour notre planète. Il en déduit trois problèmes généraux importants, sous forme interrogative, auxquels cette thèse répond de façon originale, notamment sur le choix de trajectoires sécurisées et garanties et comment un robot peut être conçu pour cela. Les motivations des travaux de la thèse sont alors clairement établies. Les contributions scientifiques et logicielles, ainsi que le plan de la thèse sont ensuite présentés.

Le deuxième chapitre « **Tools to handle dynamical systems** » (pp 15-78) présente un ensemble de domaines, de problématiques et d'outils qui seront considérés tout au long de cette thèse. Tout d'abord, la théorie des systèmes dynamiques est introduite pour modéliser le comportement des robots afin de garantir la sécurité de leur évolution. La thèse s'intéresse alors aux ensembles invariants pour analyser globalement les propriétés de

certains chemins. L'importance et la difficulté de les représenter en machine justifient l'intérêt d'un cadre de travail utilisant les domaines abstraits. Différents types de représentation sont alors discutés. L'utilisation des intervalles pour caractériser des ensembles est privilégiée. Cette question aurait pu être plus approfondie notamment pour préparer aux perspectives de la thèse. Enfin, les techniques de base de la programmation par contraintes, adaptées à l'analyse par intervalles, sont introduites afin d'obtenir un encadrement interne et externe d'ensembles recherchés par pavage. Le candidat montre que, pour caractériser les ensembles invariants, un nouveau type de domaine abstrait est nécessaire. Ce long chapitre montre l'étendue des concepts nécessaires à la mise en œuvre des propositions du candidat. Sa densité peut s'avérer pesante par soucis d'une certaine généralité des propositions de la thèse, mais cela est compensé par un enchaînement logique et bien structuré des sections, entrecoupées par des exemples illustreurs.

Le troisième chapitre « **Mazes: a new abstract domain for paths** » (pp 79-124) est la contribution théorique de la thèse. Le candidat propose une nouvelle représentation pour borner un ensemble de chemins et définit un domaine abstrait spécifique et original, les **mazes** (labyrinthes). Ils permettent, de façon relativement simple mais astucieuse d'inclure dans des polytopes la représentation de l'évolution d'un système dynamique. Les domaines sont décomposés en pavage de boîtes augmentées de portes (**doors**) pour clôturer les routes (**roads**) empruntées par les chemins possibles du robot. Des algorithmes de filtrage de types contractions/inflations, tels qu'utilisés en programmation par contraintes, sont alors adaptés pour traiter ces objets. Ils sont fondés sur la vérification de la consistance des contraintes. Ainsi, une approximation interne et externe des ensembles peut être obtenue par filtrage puis raffinée par subdivision du pavage. Il est à noter l'effort du candidat pour expliquer comment cette nouvelle représentation est implantable en machine et d'avoir mis à disposition un code informatique. Le passage dans des dimensions supérieures est discuté, mais reste difficile à appréhender.

Le quatrième chapitre « **Applications of invariant sets** » (p125-156) illustre par de nombreux exemples l'intérêt des **mazes** pour traiter différentes applications impliquant des systèmes dynamiques. Cinq problèmes sont présentés. Tout d'abord, la détermination du plus grand ensemble invariant positif et négatif est donnée pour un AUV afin de garantir son contrôle en prenant en compte certaines incertitudes. Les exemples suivants montrent comment formaliser sous la forme de **mazes**, trois problèmes classiques des systèmes dynamiques. Enfin, un dernier exemple plus complexe de vérification de trajectoires compatibles avec une séquence donnée de tâches reprend les développements de problèmes précédents. Ce chapitre montre l'étendue des questions qui peuvent être résolues par les propositions de la thèse et renforce son impact potentiel.

Le cinquième chapitre « **Design and control of a low-cost hybrid profiling float** » (p157-190) est la contribution applicative et expérimentale de la thèse. Tout d'abord, il reprend les enjeux liés à l'utilisation des courants marins comme source de propulsion d'un robot. Afin d'y répondre concrètement, une proposition expérimentale est alors présentée. Le candidat montre tout d'abord comment ses stratégies de missions innovantes pourraient

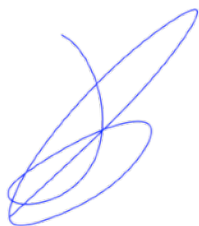
être validées par les **mazes**. Ensuite, de nombreux éléments de conception d'un flotteur bas-coût partiellement actionné sont présentés. Les modèles et le contrôleur sont ensuite déduits. Le travail est important et intéressant. Il montre les nombreuses expertises robotiques additionnelles du candidat, de la modélisation, jusqu'à l'étude des résultats en passant par l'implantation sur le robot. Une dernière section reprend les éléments méthodologiques des chapitres précédents pour valider les lois de commande. Ainsi, ce chapitre démontre que les outils de la thèse peuvent aider à prouver la sécurité des systèmes robotiques.

Le sixième chapitre « **General conclusion and prospects** » (p191-194), reprend les contributions de la thèse et propose des perspectives en matière de développement des **mazes**, mais aussi sur les missions utilisant les courants marins.

**Avis :**

De manière générale, cette thèse est très intéressante et d'une grande cohérence : de la proposition théorique originale répondant de façon appropriée à une problématique générale importante, à sa mise en œuvre informatique, algorithmique, applicative et expérimentale. Le travail réalisé est conséquent, sachant allier théorie et pratique, pragmatisme et pédagogie. Il a été valorisé par trois articles de journaux de premier plan et trois conférences de spécialistes du domaine, mais doit être poursuivi, car il aura, je le pense, un bel impact sur nos communautés. Le manuscrit est bien rédigé et bien illustré, agréable à lire tout en étant d'une grande densité. L'auteur démontre sa solide culture scientifique et sa compétence dans la manipulation de formalismes en informatique, en automatique, en robotique et en théorie des systèmes dynamiques.

Pour la qualité de ce travail, de son intérêt et de son impact scientifique, je suis **très favorable à la soutenance de cette thèse** pour l'obtention du grade de Docteur de l'ENSTA Bretagne.



Fait à Talence, le 22 novembre 2019

David Daney, HDR,

Responsable scientifique de l'équipe-Projet Auctus Inria-Ims