LISTIC

UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Rapport sur le mémoire de thèse de

Benoît DESROCHERS

intitulé

SLAM in unstuctured environments; a set-membership approach

déposé en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bretagne Occidentale

Monsieur Benoît Desrochers a préparé sa thèse au Lab-STICC (Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance) de l'ENSTA Bretagne, sous tutelle de la DGA (Direction Générale de l'Armement), sous la direction de Luc Jaulin. Son travail de recherche se situe dans le domaine du SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) appliqué à la robotique sous-marine. Pour un robot autonome, il s'agit de simultanément construire une carte de son environnement et de s'y localiser pour pouvoir se déplacer par ses propres moyens et réaliser sa mission. Le contexte sous-marin complexifie le problème du SLAM dans la mesure où l'environnement du robot est non-structuré, c'est-à-dire composé de formes généralement non paramétrables en l'absence de repères géométriques naturels.

Pour aborder ce cadre applicatif complexe, Benoît Desrochers propose d'exploiter l'analyse par intervalles et développe de nouvelles méthodes pour gérer des contraintes sur des ensembles incertains. La représentation des incertitudes et leur manipulation dans un contexte ensembliste le conduisent à introduire le concept de « Thick Set », défini comme un intervalle de l'ensemble des parties de $\mathbb{R}^n$ équipé de l'inclusion comme relation d'ordre.

Le manuscrit de thèse comprend deux parties, ciblées respectivement sur :

- l'analyse par intervalles conventionnelle pour la résolution de problèmes dans lesquels les variables sont des vecteurs de $\mathbb{R}^n$,
- l'extension de l'approche ensembliste pour la résolution d'une classe plus large de problèmes dans lesquels les variables sont des sous-ensembles de $\mathbb{R}^n$, appelés formes, dont l'incertitude est représentée par un intervalle de formes.

auxquelles se joignent introduction, conclusion, bibliographie et deux annexes.

La problématique générale du SLAM est formulée dans le chapitre d'introduction où le choix d'une méthodologie de résolution ensembliste est clairement énoncé et justifié par rapport à une approche probabiliste. L'introduction se termine par une présentation de l'organisation du mémoire. La structuration choisie, par la classe de problèmes abordés et non par l'application, permet de mettre en valeur la contribution académique de l'auteur et d'illustrer ses propositions méthodologiques sur différentes composantes d'un système global de SLAM. Les annexes, essentiellement basées sur des publications du candidat, approfondissent certains points développés et constituent une ouverture vers différents domaines scientifiques. Avant de détailler les deux parties évoquées précédemment, j'aimerais souligner la richesse du manuscrit et sa structuration particulièrement pertinente. Grâce à la pédagogie dont fait preuve Monsieur Benoît Desrochers, la thèse est agréable à lire malgré son volume conséquent.

La première partie (chapitres 2 à 4) présente l'utilisation de l'analyse par intervalles pour caractériser un ensemble de $\mathbb{R}^n$ défini par un réseau de contraintes (RC) décrivant le problème à résoudre. Des approximations extérieure et intérieure de cet ensemble sont alors construites pour envelopper au plus juste toutes les solutions du RC avec une représentation ensembliste par pavage.

> Le chapitre 2 présente les notions et opérations élémentaires de la théorie des ensembles et de l'arithmétique d'intervalles ainsi que les concepts de boîtes, de fonctions d'inclusion et de réduction ensembliste (contraction, séparation). En éliminant les portions de boîte qui ne satisfont pas les contraintes, les contracteurs fournissent une approximation extérieure d'un ensemble $\mathbb{X}$. Un contracteur complémentaire consistant avec $\overline{\mathbb{X}}$ permet de fournir une approximation intérieure de $\mathbb{X}$. L'association de ces deux contracteurs permet la formalisation des séparateurs puis leur construction, leur combinaison et leur utilisation dans les algorithmes de pavage. Le chapitre se termine par la présentation de quelques séparateurs construits à partir d'informations de nature différente (système d'inégalités, collection de points, images), d'un contracteur de tube enveloppant une trajectoire temporelle décrite par une équation différentielle et de deux applications en robotique (planificatoin de trajectoire, localisation statique simple).

> Le chapitre 3 est dédié à la construction de séparateurs efficaces fournissant une approximation de qualité tout en limitant le nombre de bissections. Dans cette optique, la recherche de minimalité des contracteurs et séparateurs est essentielle ce qui conduit Monsieur Benoît Desrochers à proposer deux nouveaux théorèmes. Ces derniers aident à la construction de contracteurs minimaux pour l'équation **f**(**x**) = **y** et de séparateurs minimaux consistant avec l'ensemble $\mathbb{X} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbb{Y})$. Ces deux théorèmes sont exploités pour la construction de contracteurs et séparateurs minimaux associés au changement de coordonnées entre représentations cartésienne et polaire fréquemment rencontré en robotique. L'efficacité du séparateur polaire obtenu est illustrée par une application de localisation reconstituée à partir de données acquises lors d'une mission du robot sous-marin autonome VAMA. La simulation d'un problème cumulant incertitudes de localisation initiale et d'association de données met également en évidence l'efficacité d'une technique de propagation de contraintes exploitant le séparateur polaire minimal.

> Le chapitre 4 abandonne la vision ponctuelle des intervalles au profit d'une vision ensembliste en supposant que carte et mesures sont des formes, sous-ensembles de vecteurs réels, parfaitement connues. Un nouveau type de contraintes est alors introduit conduisant à la formulation du problème de «registration» de formes. Etant donnée une transformation paramétrique de formes, il s'agit de caractériser l'ensemble de paramètres satisfaisant une contrainte ensembliste sur la forme transformée. En interprétant ce problème comme une projection ensembliste, un séparateur minimal est obtenu avec l'algèbre de séparateurs. Dans le cas d'une transformation par translation, une implémentation est réalisée avec les opérateurs de Minkowski utilisés en morphologie mathématique. Le chapitre se termine par l'utilisation de la «registration» de formes dans une application de localisation de robot en environnement non-structuré avec carte et mesures sans incertitude.

En résumé, la première partie du manuscrit présente un ensemble très cohérent et particulièrement intéressant de contributions méthodologiques qui enrichissent la «boîte à outils» des séparateurs exploitables efficacement dans les approches par pavage. Les illustrations et applications développées montrent l'intérêt d'une analyse par intervalles avancée pour la résolution de problèmes de SLAM. Enfin, la manipulation de formes fournit la base d'une gestion des environnements non-structurés et ouvre la voie à l'extension proposée en deuxième partie du manuscrit (chapitres 5 et 6) où les formes deviennent incertaines.

Le chapitre 5 introduit le concept d'ensemble épais (incertains) en opposition aux ensembles fins (certains). Au même titre que l'incertude d'un réel est représentée par un intervalle de réels, l'incertitude d'un ensemble est représentée par un intervalle d'ensembles. Cette approche est rendue possible par le fait que l'ensemble des parties de $\mathbb{R}^n$ équipé de l'inclusion possède une structure de treillis complet. Un ensemble épais est alors un intervalle défini par ses bornes ensemblistes inférieure $\mathbb{X}^-$ et supérieure $\mathbb{X}^+$. Ainsi un ensemble épais partitionne $\mathbb{R}^n$ en trois zones : $\mathbb{X}^-$, $\mathbb{X}^+ \setminus \mathbb{X}^-$ (appelé pénombre) et $\mathbb{R}^n \setminus \mathbb{X}^+$. Le concept de séparateur est étendu au cas des ensembles épais et l'algèbre des séparateurs épais est établie. L'inversion ensembliste $\mathbb{X} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbb{Y})$ est également étendue au cas où **f** et $\mathbb{Y}$ sont tous deux incertains. L'ensemble solution n'étant pas en général un ensemble épais, le problème d'inversion incertaine conduit à la recherche du plus petit ensemble épais englobant toutes les solutions. En pratique, l'utilisation de méthodes de résolution ensemblistes est souvent inefficace car confrontées à un problème d'accumulation de bissections dans la pénombre. Cette difficulté est contournée pour certains ensembles de fonctions (à paramétres incertains, intervalle de fonctions) pour lesquels des algorithmes efficaces sont proposés. Pour aborder la «registration» de formes incertaines, la contraction d'ensembles épais est formalisée et la construction de contracteurs minimaux dédiés développée. L'ensemble de ces composants est exploité dans un algorithme de SRAC (Shape Registration And Carving) visant simultanément à réduire l'ensemble de paramètres possibles pour la transformation de forme (registration) et à contracter les formes observées (carving).

Le dernier chapitre décrit le problème générique du SLAM par trois équations (évolution, carte, position initiale) et définit un réseau de contraintes hybride équivalent dans lequel les variables relatives aux observations sont des formes incertaines et les domaines associés des ensembles épais. Un algorithme de résolution générique est proposé dans lequel sont utilisés un contracteur différentiel de tube et le contracteur d'ensembles épais SRAC. En pratique, deux cas de représentation des formes incertaines sont distingués selon la disponibilité d'observations double-côtés ou au contraire la limitation à des observations simple-côté. Chacun des cas est illustré par une application conduisant à des instanciations dédiées de l'algorithme générique. La première concerne la simulation d'une registration inter-temporelle entre deux mesures pour un robot autonome équipé d'un sondeur bathymétrique et d'un système de navigation inertielle. La seconde concerne le SLAM en environnement non-structuré avec mesure omni-directionnelle de distance, transformation invariante en translation et construction de carte.

En résumé, Benoît Desrochers développe une approche nouvelle et originale pour la représentation et la manipulation d'objets ensemblistes incertains. Au delà des aspects théoriques développés, il revisite l'ensemble des outils conventionnels utilisés en analyse par intervalles et en propose une version étendue pour les formes incertaines. L'efficacité de l'approche proposée est illustrée par différentes applications de SLAM en robotique sous-marine autonome.

La vision de Benoît Desrochers sur la représentation ensembliste des incertitudes d'ensembles est très intéressante. Nul doute qu'elle suscitera de nombreux échanges de points de vue entre communautés scientifiques différentes. En particulier, je pense que certains développements récents de la communauté floue sur les interprétations épistémique ou ontique des intervalles (flous) offrent certains points de convergence avec les représentations «épaisses» proposées.

La qualité de la recherche de Benoît Desrochers est attestée par de nombreuses publications dans des revues et conférences de domaines variés. Au delà de contributions à caractère théorique, méthodologique ou applicatif, Benoît Desrochers s'attache à la mise en oeuvre des outils logiciels associés et à leur mise à disposition. L'ensemble de ces élements témoigne du très large spectre de compétences de Benoît Desrochers.

En conclusion, vu l'originalité et la qualité de la recherche présentée par Monsieur Benoît Desrochers , j'émets un avis **très favorable** à sa soutenance de thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Bretagne Occidentale.

A Annecy, le 9 mai 2018

Sylvie Galichet, Professeur des Universités
LISTIC / Polytech Annecy-Chambéry / Université Savoie Mont Blanc