

Sujet de thèse de doctorat

# Génération de trajectoires avec contraintes temporelles

Alexandre Chapoutot et Pierre-Loïc Garoche

Juin 2022

Dans le cadre du projet FARO (Fondement Algorithmique des RObots en essais) financés par le centre interdisciplinaire pour la sécurité et la défense (CIEDS) de l'Institut Polytechnique de Paris (IP Paris), nous cherchons une personne pour réaliser une thèse sur la planification de trajectoires de robots.

Ce travail est réalisé en coopération entre l'ENSTA Paris et l'ENAC.

## 1 Contexte de la thèse

Le sujet de thèse se place dans le domaine de la navigation robotique autonome. Un robot autonome doit pouvoir réaliser des missions dans des environnements variés pour lesquels les algorithmes de planification de trajectoires sont utilisés pour atteindre une position précise ou pour explorer une zone. Cette planification de trajectoires doit pouvoir prendre en compte les capacités de déplacements du système robotique ainsi que les contraintes liées à l'environnement comme la présence d'obstacles mobiles ou non. De plus, les missions à effectuer sont souvent composées de plusieurs déplacements enchaînés. Dans certains cas, il est important de respecter de contraintes temporelles, par exemple, le robot doit atteindre la position A entre 30s et 50s avant d'aller en position B.

Les algorithmes de planification de trajectoires doivent être capable de générer des trajectoires sûres (sans collision avec les obstacles) tout en garantissant les performances (respect des échéances) nécessaires à la réalisation de la mission. Les architectures de contrôle pour la navigation autonome en robotique mobile décomposent le problème de la génération de trajectoires en plusieurs phases. Une première phase de planification long terme permet de générer une trajectoire globale permettant de réaliser la mission. Cette trajectoire décrite par un ensemble d'objectifs intermédiaires. Chaque objectif intermédiaire est atteint à l'aide d'une seconde phase de planification locale. Plus précisément, cette seconde étape peut être formalisée mathématiquement comme un problème de contrôle optimal. Il existe de nombreuses méthodes pour résoudre ce genre de problèmes et cette thèse s'intéressera aux méthodes de résolution s'appuyant sur les méthodes d'optimisation convexe.

La planification de missions pour des robots autonomes nécessite un formalisme précis pour décrire les différentes tâches à réaliser, en particulier, avec la présence d'échéances temporelles à respecter. Dans le domaine informatique, des formalismes fondés sur des modèles logiques sont utilisés pour décrire précisément des comportements d'un système. Par exemple, dans le cadre de comportements temporels, les logiques temporelles comme LTL ou CTL sont souvent utilisées [1]. Les formules de logiques temporelles permettent de décrire des comportements souhaités pour un système. Dans le cadre de la robotique, ces formules permettent de décrire les comportements attendus d'un robot.

Cette thèse propose de contribuer à la définition de nouveaux algorithmes de planification de trajectoires exprimés sous forme de problèmes de contrôle optimal intégrant des formules de logique temporelles pour décrire les contraintes sur les trajectoires.

## 2 Objectifs

L'objectif des travaux de cette thèse est de développer et d'étendre l'état de l'art des algorithmes de résolution de problème de contrôle optimal fondés sur les techniques d'optimisation convexe pour le calcul de trajectoire en robotique.

D'une part, l'algorithme *SCvx* est très utilisé dans les systèmes spatiaux [2]. Cet algorithme consiste à discrétiser et linéariser, itérativement, la dynamique d'un système et à exprimer le calcul d'une trajectoire optimale comme un problème d'optimisation convexe sous contrainte. Une des problématiques est d'étendre le type des contraintes exprimables et de soutenir la génération de code embarqué pour cette méthode.

D'autre part, la logique STL (*Signal Temporal Logic*) [1] permet d'exprimer des comportements riches sur des fonctions temporelles, comme par exemple la trajectoire d'un robot. Plus spécifiquement, les prédicats de cette logique temporelle sont bornés dans le temps (*bounded horizon*) et sont donc pertinents pour exprimer des propriétés sur des trajectoires bornées comme celles produites par l'algorithme *SCvx*.

L'objectif de cette thèse est ainsi de combiner *SCvx* avec des contraintes exprimées en STL. Il s'agira donc de soutenir l'expression de ces contraintes sous la forme de contraintes convexes ou convexifiées et susceptibles d'être résolues de façon itérative par l'algorithme *SCvx*. Cette thèse s'appuiera sur les travaux préliminaires sur le sujet [3].

La logique STL peut être munie d'une sémantique dite robuste qui associe à chaque formule une valeur réelle. Un prédicat est valide si et seulement si la valeur réelle de sa sémantique robuste est positive. Ces constructions reposent beaucoup sur le calcul de maximum ou minimum entre les valeurs associées aux sous-formules. Une des difficultés est d'exprimer sous forme différentiable et linéarisable ces constructions, par exemple par l'utilisation de variantes différentiables, comme l'utilisation de soft-max.

## 3 Profil de la personne candidate

Deux profils seront considérés pour cette thèse

- Une personne ayant un M2 en automatique et intéressée à développer des compétences en informatique ;
- Une personne ayant un M2 en informatique et intéressée à développer des compétences en automatique ;

Dans les deux cas, la personne devra avoir une appétence pour le développement informatique pour mettre en oeuvre les algorithmes de génération de trajectoires et la formalisation mathématiques.

La personne devra démontrer être autonome avec une capacité de travail en équipe.

Il est indispensable que la personne candidate soit capable de s'exprimer à l'oral et à l'écrit en anglais.

## 4 Informations administratives

- Sélection du candidat ou de la candidate : fin juillet 2022
- Début de la thèse : octobre 2022

Pièces à fournir au dossier :

- Lettre montrant la motivation pour la thèse et la thématique ;
- CV détaillé ;
- Relevés de notes M1 et M2 ou équivalent ;
- Lettre(s) de recommandation si possible.

Le dossier complet est à envoyer par mail à  
— Monsieur Alexandre Chapoutot, alexandre.chapoutot@ensta-paris.fr

## Références

- [1] A. Donzé and O. Maler. Robust satisfaction of temporal logic over real-valued signals. In K. Chatterjee and T. A. Henzinger, editors, *Formal Modeling and Analysis of Timed Systems - 8th International Conference, FORMATS 2010, Klosterneuburg, Austria, September 8-10, 2010. Proceedings*, volume 6246 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 92–106. Springer, 2010.
- [2] D. Malyuta, T. P. Reynolds, M. Szmuk, T. Lew, R. Bonalli, M. Pavone, and B. Açikmese. Convex optimization for trajectory generation. *CoRR*, abs/2106.09125, 2021.
- [3] Y. Mao, B. Açikmese, P. Garoche, and A. Chapoutot. Successive convexification for optimal control with signal temporal logic specifications. In *HSCC '22 : 25th ACM International Conference on Hybrid Systems : Computation and Control, Milan, Italy, May 4 - 6, 2022*, pages 9 :1–9 :7. ACM, 2022.