



HAL
open science

Autonomous Catheter and Guidewire Navigation for Robotic Percutaneous Coronary Intervention

Pierre Schegg

► **To cite this version:**

Pierre Schegg. Autonomous Catheter and Guidewire Navigation for Robotic Percutaneous Coronary Intervention. Computer Science [cs]. Inria Lille Nord Europe - Laboratoire CRISStAL - Université de Lille, 2022. English. NNT: . tel-04293261

HAL Id: tel-04293261

<https://inria.hal.science/tel-04293261>

Submitted on 18 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Université de Lille
Faculté des Sciences et des Technologies
Ecole Doctorale Mathématiques-Sciences du numérique et de leurs interactions

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité **Informatique**

présentée par
Pierre Schegg

AUTONOMOUS CATHETER AND GUIDEWIRE NAVIGATION FOR ROBOTIC PERCUTANEOUS CORONARY INTERVENTIONS

NAVIGATION AUTONOME DE GUIDES ET CATHÉTERS POUR UNE
OPÉRATION EN CARDIOLOGIE INTERVENTIONNELLE ROBOTISÉE

sous la direction d'**Christian Duriez**
ainsi que l'encadrement de **Jérémy Dequidt**,
de **Bruno Fournier**
et de **Philippe Preux**.

Soutenue publiquement à **Lille**, le **25 mai 2022** devant un jury composé de

Prof.	Fernando Bello	Imperial College London	Rapporteur
Dr.	Christos Bergeles	King's College London	Examineur
Prof.	Marie-Odile Berger	Inria Nancy	Présidente du Jury
Dr.	Justin Carpentier	École Normale Supérieure de Paris	Examineur
Prof.	Christian Duriez	Inria Lille	Directeur de thèse
Dr.	Jérémy Dequidt	Polytech' Lille	Encadrant
Dr.	Bruno Fournier	Robocath	Encadrant industriel
Prof.	Philippe Preux	Université de Lille	Encadrant
Prof.	Jérôme Szewczyk	Sorbonne Université	Rapporteur
Prof.	Jocelyne Troccaz	CNRS	Examinatrice

Équipe DEFROST, Univ. Lille, Inria, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 CRISTAL, F-59000 Lille, France



"Mundi placet et spiritus minima", ça n'a aucun sens mais on pourrait très bien imaginer une traduction du type : "Le roseau plie, mais ne cède... qu'en cas de pépin" ce qui ne veut rien dire non plus.

Loth d'Orcanie interprété par François Rollin, Kaamelott, Livre VI, Lacrimosa, écrit par Alexandre Astier.

Remerciements

I would like to start by thanking Professor Bello, Doctor Bergeles, Professor Berger, Doctor Carpentier, Professor Szewczyk and Professor Troccaz for agreeing to be part of the jury.

Je veux ensuite remercier tout particulièrement mes directeur et co-directeurs Christian, Jérémie et Philippe. Merci pour votre patience, votre disponibilité, votre aide, votre confiance et votre soutien. Merci également à Bruno et Laurent, pour votre appui sur les problématiques industrielles. Merci finalement à Rémi pour son accueil dans son service et son expertise médicale.

Je souhaite également remercier Etienne pour son aide précieuse en stage puis sur SofaGym ainsi que pour nos discussions, sur le RL ou non. Je remercie également Bruno M. et Damien pour leur appui inestimable quant à l'utilisation de SOFA. Je remercie finalement Wassim pour sa contribution à l'algorithme de vision. Merci également à Eulalie et Edouard pour leur aide dans ce projet.

Je remercie mes collègues d'Inria pour les moments passés ensemble, tant au bureau qu'en dehors, à la salle d'escalade, sur un vélo ou à parler de permaculture et du monde d'après autour d'une frite. Merci en particulier à Bruno M., Damien et Félix, camarades de vélorution, de grimpe et potagistes aguerris, Olivier, cycliste et grimpeur imbattable, Yinoussa, coach sportif et d'applications mobiles ainsi que tous les collègues de DEFROST et de SCOOL, Anne, Alex K., Alex B., Camille, Christian, Etienne, Eulalie, Jérémie, Gang, Lingxiao, Mahsa, Mathieu, Maxime, Mei, Nathan, Omar, Paul, Quentin, Philippe, Stefan, Tanguy, Thor, Walid, Xuedong, Yannis, Zhongkai...

Special thanks to Ke for being an amazing office mate.

Je veux également remercier mes collègues de Robocath. Benoit, Franck, Ricardo, Sophie, Siham et tou · te · s les autres footeu · x · ses du vendredi, Arthur, Camille et Guillaume, les nageu · r · se · s du mardi, Amélie, Chloé, Gaëtan, Jules, Justine, Michaël, Pierre D., Siham, Simon, Wifried et tou · te · s les grimpeu · r · se · s, Alexis, camarade de bar et de dancefloor et tous les usagers de la cantine SDR117.

Merci à mes parents et à ma famille pour leur soutien et leurs encouragements.

Remerciements

A tous mes colocos au cours des années, Adéla, Antoine B., Antoine P., Antoine V., Arthur, Camille, Célia, Côme, Frédéric, Gaëtan, Janice, Léa, Marion F., Marion H., Maxime, Valérian, Ximena et Zoé, merci pour les bouffes, les soirées, le sport, les blagues et tout ce qu'on a partagé.

Un immense merci également à mes camarades d'ANV COP21 Lille, Alternatiba Rouen et la BASE Rouen pour votre amitié et tous nos beaux projets, passés et à venir.

Enfin, merci Louise pour ton soutien indéfectible, ton inébranlable et contagieuse bonne humeur et toutes tes trop bonnes idées.

Résumé

Cette thèse porte sur la navigation automatique de guides et cathéters dans les artères coronaires. Dans un premier temps, nous introduisons le contexte de la cardiologie interventionnelle et le cas particulier des interventions coronaires percutanées. Nous justifions aussi l'utilité de la robotisation de ces procédures. Nous faisons ensuite le pont entre le problème de la navigation de guides et le contrôle de robots déformables, puis examinons les travaux existants sur le même sujet.

Notre étude commence par la conception de simulations dynamiques réalistes des artères, du coeur et de leur interaction avec les instruments chirurgicaux. Cela a nécessité la collecte de données patient, la compréhension de l'influence du battement cardiaque sur la déformation des artères et comment cette déformation impacte la navigation de guides. Les interventions coronaires percutanées considérées reposent également fortement sur les contacts entre les instruments et les parois artérielles, ce qui est une difficulté supplémentaire au regard du temps de simulation ainsi que de leur précision.

Nous avons ensuite utilisé ces simulations pour formuler le problème de la navigation de guides dans les artères coronaires comme un problème de prise de décision séquentielle. Nous avons défini les espaces d'état et d'action correspondants et conçu une fonction de récompense adéquate. Nous avons testé plusieurs stratégies de contrôle, y compris des méthodes de contrôle basées sur un modèle inverse et des méthodes de recherche arborescente. Nous avons également proposé une nouvelle combinaison de ces méthodes qui atteint de bonnes performances dans les cas de figure testés.

Finalement nous avons conçu un algorithme de vision et un schéma de recallage permettant de transférer les algorithmes de commande sur un robot physique. L'algorithme de contrôle en boucle fermée ainsi constitué a été testé sur deux fantômes en silicone différents sur lesquels l'algorithme atteint un taux de succès comparable à une navigation manuelle et à une navigation en télé-opérant le robot.

Keywords: Robotique Déformable, Prise de Décision Séquentielle, Contrôle par Modèle Inverse, Monte Carlo Tree Search, Contrôle en Boucle Fermée

Abstract

This thesis focuses on automatic navigation of guidewires and catheters in the coronary arteries. We first introduce the context of interventional cardiology and percutaneous coronary interventions. We also justify the use of a robot for those procedures. We then link the guidewire navigation problem to the control of soft robots and review the existing literature.

Our study starts with building realistic, dynamic simulations of the arteries, heart and their interaction with the instruments. This required the gathering of patient data, understanding how the heart beat motion deforms the heart and how these deformations impact guidewire navigation. Percutaneous coronary interventions are also very contact dense which is a challenge for both simulation speed and accuracy.

We then used these simulations to frame the problem of navigating the coronaries as a sequential decision making problem. We determined the corresponding state and action spaces and devised a reward. We tested a variety of control schemes on the navigation problem, including inverse model based control and tree-search based control and proposed a novel combination of both which achieves good performance in navigating the coronaries.

Finally, we design a vision algorithm and registration scheme to transfer the algorithms to a physical robot. The closed loop control scheme was tested on two different silicone phantoms and achieves the same success rate as navigating by hand or by tele-operating the robot.

Keywords: Soft Robotics, Sequential Decision Making, Inverse Model Control, Monte Carlo Tree Search, Closed Loop Control

Copyright 2018-2022, © Pierre Schegg, Inria, Robocath.

