

Vers un retour en force dans le contrôle prédictif

Sébastien Kleff^{1,2}, Ewen Dantec^{2,3}, Guilhem Saurel¹, Nicolas Mansard^{2,3}, Ludovic Righetti^{1,4}

Abstract—En contrôle prédictif (MPC), les forces de contact sont *planifiées* plutôt que *commandées*. Cela s’explique notamment par une incapacité fondamentale du retour d’état classique en position-vitesse, sous l’hypothèse du contact rigide, à contrôler les forces en boucle fermée. Après avoir exposé cette limitation, nous proposons une nouvelle approche permettant d’exploiter les mesures de forces dans un contrôleur prédictif [1]. Notre méthode consiste à considérer les couples articulaires comme des états filtrés, ce qui conduit naturellement à un contrôleur replanifiant des trajectoires optimales en ligne à partir des mesures de position, vitesse *et* de couples. Nous présentons l’implémentation de cette méthode sur le robot humanoïde Talos et des comparaisons avec l’approche classique.

Beaucoup de tâches accomplies tous les jours par les êtres humains requièrent un sens du toucher: par exemple on a besoin de sentir les forces extérieures afin de tenir un objet, de pétrir de la pâte ou de poncer une surface rugueuse. En dépit de l’importance admise des facultés haptiques, les méthodes de contrôle modernes basées sur la commande optimale ont rendu difficile la simulation d’un sens artificiel du toucher. En effet, les solveurs numériques récents ont permis d’implémenter avec succès le contrôle prédictif à haute fréquence sur robots contrôlés en couple mais cette approche révèle sa fragilité lors de contacts physiques avec l’environnement: les politiques sont calculées à partir de modèles simplistes des interactions, ce qui les rend difficilement applicables. Ainsi, ces contrôleurs nécessitent en pratique un temps de réglage expert important, et la question demeure: comment contrôler les interactions de contact dans le contexte du contrôle prédictif?

La formulation classique traite le contact comme une contrainte cinématique, ce qui présente l’avantage de ne pas nécessiter un modèle explicite - potentiellement complexe - décrivant l’évolution des forces. Par ailleurs, cette formulation comme une contrainte s’inscrit opportunément dans le cadre de l’optimisation numérique, où les forces de contacts apparaissent comme les multiplicateurs de Lagrange associés à cette contrainte. Néanmoins, il y a plusieurs raisons de penser que l’introduction des forces dans la boucle du contrôle prédictif peut améliorer la robustesse et la versatilité. Premièrement, la supériorité du MPC sur les méthodes de contrôle instantanées (e.g. dynamique inverse) est admise. Deuxièmement, la recherche en contrôle des interactions (dans laquelle s’inscrit par exemple la commande en impédance) a montré que le contrôle d’une interaction physique nécessite le contrôle du

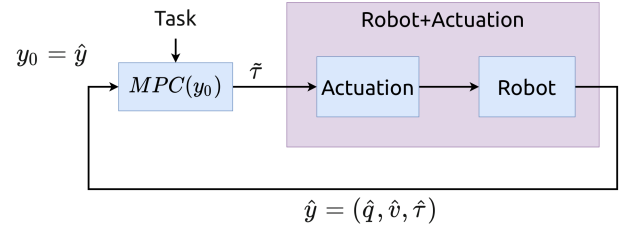


Fig. 1. La loi de commande prédictive proposée exploite un retour d’état augmenté \hat{y} qui inclut les mesures articulaires positions \hat{q} , de vitesses \hat{v} et de couples $\hat{\tau}$. Nos expériences montrent que l’introduction d’un tel retour d’effort améliore les performances pour les tâches de contact.

mouvement *et* des efforts. Enfin, les robots modernes équipés de capteurs de couples rendent possible l’exploitation d’une multimodalité nouvelle en contrôle prédictif.

Nous proposons ainsi d’exploiter les mesures de couples articulaires dans le contrôle prédictif en les traitant comme des états et non plus comme des variables d’entrée. Pour ce faire, la dynamique du robot en contact rigide est augmentée d’un filtre passe-bas reliant des couples non filtrés (entrées du système) à des couples filtrés (états mesurés par des capteurs de couples). Ce nouveau modèle dynamique permet de capturer simplement le comportement linéaire passe-bas des actionneurs. Cette augmentation de l’espace d’état nécessite une reformulation du problème de commande optimale à résoudre ainsi qu’un nouveau schéma de contrôle (Fig. 1). Le problème est transcrit en programme non-linéaire via la programmation dynamique différentielle (DDP). Cette méthode est évaluée en simulation et en expérience réelle sur des robots commandés en couple (Kuka iiwa, Talos). Nous proposons une étude comparative des performances avec le MPC classique (i.e. sans retour d’effort) sur une tâche de ponçage sur plan rigide horizontal puis incliné. Nos expériences montrent que l’introduction du retour de force permet une meilleure performance en suivi de position et de force. Enfin nous discutons les limites de l’approche présentée, et nous présentons des pistes de recherche future.

REFERENCES

- [1] Kleff, S., Dantec, E., Saurel, G., Mansard, N., & Righetti, L. Introducing Force Feedback in Model Predictive Control. Submitted to IROS 2022. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03594295/document>. Video: <https://peertube.laas.fr/videos/watch/541599eb-36ca-4da2-99a3-52b3cf91cbe3>

¹Tandon School of Engineering, New York University, Brooklyn, NY

²LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse

³Artificial and Natural Intelligence Toulouse Institute (ANITI), Toulouse

⁴Max Planck Institute for Intelligent Systems, Tübingen

We would like to thank Pierre Fernbach for his valuable support during hardware experiments.