

DISS. ETH NO. 30153

WHOLE-BODY PLANNING AND CONTROL
FOR MULTI-CONTACT LOCO-MANIPULATION

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

JEAN-PIERRE SLEIMAN

Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione,
Politecnico di Milano

born on 23.05.1994

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Marco Hutter
Prof. Dr. Russ Tedrake
Prof. Dr. Ludovic Righetti

2024

ABSTRACT

As we advance into an era increasingly characterized by the integration of autonomous systems into our everyday lives, legged mobile manipulators stand at the forefront of this shift, embodying the critical challenge of enhancing the motor skills of physical robots to become useful assistants in various aspects of human life. This dissertation focuses on advancing the planning intelligence and control capabilities of these systems, equipping them with the versatility and robustness to solve complex real-world loco-manipulation tasks involving multiple contact interactions.

Initially, the research delves into Contact-Implicit Optimization (CIO), introducing a multiple shooting scheme and leveraging a fast structure-exploiting solver to efficiently generate multi-contact plans for a robotic arm performing non-prehensile manipulation tasks.

Recognizing the computational challenges associated with CIO when considering high-dimensional systems, the thesis transitions towards an Optimal Control (OC) framework for switched-systems to unify the treatment of dynamic locomotion and manipulation tasks. We demonstrate that by opting for a sufficiently-rich reduced-order model that encapsulates essential dynamic couplings, we achieve a real-time generation of whole-body trajectories for a quadrupedal mobile manipulator. We also elaborate on the underlying Nonlinear Model Predictive Control (NMPC) scheme that was used, and show how it was further enhanced with an Augmented-Lagrangian (AL) approach to enforce various path constraints.

In pursuit of automating the generation of holistic loco-manipulation behaviors with minimal manual guidance, the research introduces a new perspective that is centered around modeling multi-contact loco-manipulation tasks as integrated Task and Motion Planning (TAMP) problems. As a result, a computationally tractable bilevel optimization problem emerges, efficiently solved by a sampling-based bilevel search algorithm that combines the strengths of different planning techniques.

This thesis extends its contributions by focusing on the design of loco-manipulation policies capable of executing these behaviors robustly, withstanding significant modeling mismatches and external disturbances. This effort is based on a task-agnostic unified Markov Decision Process (MDP) formulation, and leverages demonstration-guided Deep Reinforcement Learning (DRL) to achieve this goal.

A series of hardware experiments are conducted that validate the dynamic feasibility and robustness of our proposed methodologies, showcasing their practical applicability across a range of complex loco-manipulation tasks. Through these contributions, the thesis not only advances the state-of-the-art but also lays a foundational framework for future research in multi-contact planning and control for legged loco-manipulation.

R É S U M É

Alors que nous avançons dans une ère de plus en plus caractérisée par l'intégration des systèmes autonomes dans notre vie quotidienne, les manipulateurs mobiles à pattes se trouvent à l'avant-garde de ce changement, incarnant le défi crucial d'améliorer les compétences motrices des robots physiques pour devenir des assistants utiles dans divers aspects de la vie humaine. Cette thèse se concentre sur l'avancement de l'intelligence de planification et des capacités de contrôle de ces systèmes, les équipant de la polyvalence et de la robustesse nécessaires pour résoudre des tâches de loco-manipulation réelles complexes impliquant de multiples interactions de contact.

Initialement, la recherche se penche sur le CIO, introduisant un schéma de tir multiple et exploitant un solveur rapide exploitant la structure pour générer efficacement des plans multi-contacts pour un bras robotique effectuant des tâches de manipulation non préhensile.

Reconnaissant les défis computationnels associés au CIO lors de la prise en compte de systèmes à haute dimension, la thèse se tourne vers un cadre OC pour les systèmes à commutation afin d'unifier le traitement des tâches dynamiques de locomotion et de manipulation. Nous démontrons qu'en optant pour un modèle réduit suffisamment riche qui encapsule les couplages dynamiques essentiels, nous parvenons à générer en temps réel des trajectoires corporelles entières pour un manipulateur mobile quadrupède. Nous élaborons également sur le schéma NMPC sous-jacent qui a été utilisé et montrons comment il a été encore amélioré avec une approche AL pour faire respecter diverses contraintes de chemin.

Dans la poursuite de l'automatisation de la génération de comportements de loco-manipulation holistiques avec un minimum de guidage manuel, la recherche introduit une nouvelle perspective centrée sur la modélisation des tâches de loco-manipulation multi-contacts comme des problèmes TAMP intégrés. En conséquence, un problème d'optimisation biliveau informatiquement tractable émerge, résolu efficacement par un algorithme de recherche biliveau basé sur l'échantillonnage qui combine les forces de différentes techniques de planification.

Cette thèse étend ses contributions en se concentrant sur la conception de politiques de loco-manipulation capables d'exécuter ces comportements de manière robuste, en résistant à d'importants écarts de modélisation et à des

perturbations externes. Cet effort est basé sur une formulation MDP unifiée agnostique de la tâche et tire parti de l’DRL guidé par démonstration pour atteindre cet objectif.

Une série d’expériences matérielles sont menées qui valident la faisabilité dynamique et la robustesse de nos méthodologies proposées, démontrant leur applicabilité pratique à travers une gamme de tâches de loco-manipulation complexes. À travers ces contributions, la thèse avance non seulement l’état de l’art mais pose également un cadre fondamental pour la recherche future dans la planification et le contrôle multi-contacts pour la loco-manipulation sur pattes.