Optimization-Based Planning and Control for Multi-Limbed Walking Robots

DISS. ETH NO. 25726

Optimization-Based Planning and Control for Multi-Limbed Walking Robots

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

C. Dario Bellicoso

MSc in Automation Engineering, Università degli Studi di Napoli, Federico II

born on 15 November 1983

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. M. Hutter, ETH Zurich
Prof. Dr. B. Siciliano, Università degli Studi di Napoli, Federico II
Prof. Dr. R. Siegwart, ETH Zurich

2019

ABSTRACT

Walking robots have unique skills that can be exploited when they are deployed in real-world scenarios. They can locomote over rough terrain, negotiate obstacles, deliver payloads and manipulate the environment, which makes them the ideal solution for search and rescue missions, inspection, and exploration. The implementation of the these capabilities, however, presents theoretical and practical challenges that are yet to be solved: Walking robots have high power requirements and must be able to safely navigate in their designated environment while balancing at all times.

This thesis presents motion planning and control algorithms for robotic legged locomotion and manipulation. The design of these algorithms has the goal of pushing what the current state of the art is capable of in terms of dynamic legged locomotion, as well as coordination with manipulation, aiming at executing these algorithms on torque-controlled robots in real-world environments.

Committing to the implementation of modular software and generic algorithms, our work has focused on the development of motion planning and control algorithms for a torque-controlled quadrupedal robot equipped with a robotic arm. Parts of these have been successfully deployed on other robots, including a wheeled quadrupedal robot and an autonomous excavator.

We present a motion planning that is focused on the generation a wide variety of gaits (i.e., contact sequences), including walking, trotting, pacing, jumping, and galloping. Reduced-complexity models have been used in the planning to ensure dynamic stability, to increase the computational efficiency, and to allow the execution in an online fashion. This allows the planner to react to disturbances and unexpected changes the surrounding environment.

To execute these motions, a whole-body controller has been developed which exploits the full system dynamics to track operational-space motion references. The controller computes torque for each actuator by solving a cascade of tasks, each of which is formulated as a constrained Quadratic Programming problem.

Experimental tests have been carried out on ANYmal, a torque-controlled quadrupedal robot developed by the Robotic Systems Lab at ETH Zurich and ANYbotics. Based on the work presented in this thesis,

ANYmal can execute a wide variety of dynamic gaits and maneuvers, both indoors and on challenging terrain. The success of our approach lies in the use of reduced models for fast and reactive online planning, the use of the full rigid-body dynamics for control, and the integration of lessons learned from field testing.

SOMMARIO

Robot che camminano hanno abilità uniche che possono essere sfruttate quando questi sono utilizzati in scenari reali. Possono camminare su terreno complesso, evitare ostacoli, consegnare un carico e manipolare l'ambiente, rendendo questo tipo di robot la soluzione ideale per missioni di ricerca e recupero, ispezione, ed esplorazione. L'implementazione di queste capacità, tuttavia, pone delle sfide sia teoriche che pratiche che devono ancora essere risolte: robot che camminano non solo richiedono elevata potenza, ma devono anche essere in grado di navigare in sicurezza nell'ambiente designato mantenendo l'equilibrio in ogni momento.

Questa tesi presenta algoritmi di pianificazione del moto e di controllo per locomozione e manipolazione robotica. Lo scopo di questi algoritmi è quello di spingere lo stato dell'arte della locomozione robotica, così come la coordinazione di quest'ultima con la manipolazione, con l'obiettivo di eseguirli su robot controllati in coppia in ambienti reali.

Il nostro lavoro è focalizzato sullo sviluppo di algoritmi di pianificazione e controllo per un robot quadrupede equipaggiato con un manipolatore robotico. Parti del nostro software sono state utilizzate con successo su altri robot, incluso un robot quadrupede con ruote ed uno scavatore autonomo.

Presentiamo un software di pianificazione che è in grado di generare una vasta gamma di modalità di locomozione, tra cui cammino statico, trotto, passo, salto, e galoppo. Modelli a complessità ridotta sono stati usati nella pianificazione del moto per assicurare la stabilità del sistema, per aumentare l'efficienza computazionale, e per permettere la rapida esecuzione dell'architettura di pianificazione. In questo modo, il robot puó reagire a disturbi esterni e a cambiamenti inaspettati nell'ambiente circostante.

Per eseguire questo tipo di movimenti, è stato sviluppato un controllore che sfrutta l'intera dinamica del sistema per tracciare riferimenti nello spazio operativo. Il controllore calcola riferimenti di coppia per ciascun attuatore risolvendo una sequenza di task, ognuno dei quali è formulato come un problema di minimizzazione quadratico.

Risultati sperimentali sono stati eseguiti su ANYmal, un robot quadrupede controllato in coppia e sviluppato al Robotic Systems Lab dell'ETH Zurich e da ANYbotics. Grazie al lavoro presentato in questa tesi, ANYmal può eseguire una vasta gamma di movimenti dinamici, sia in ambienti interni che su terreno complesso. Il successo del nostro approccio

risiede nell'uso di modelli a complessità ridotta per pianificazione veloce e reattiva, nell'uso dell'intera dinamica del sistema per il controllo, e nell'integrazione delle esperienze acquisite durante test sul campo.