

DISS. ETH NO. 21073

StarlETH & Co. – Design and Control of Legged Robots with Compliant Actuation

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Marco Hutter

Master of Science in Mechanical Engineering
ETH Zurich, Switzerland

Born August 10th, 1985
Citizen of Oberriet-Kriessern SG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Roland Siegwart, ETH Zurich
Prof. Oussama Khatib, Stanford University
Prof. Rolf Pfeifer, University of Zurich
Prof. Jonas Buchli, ETH Zurich

2013

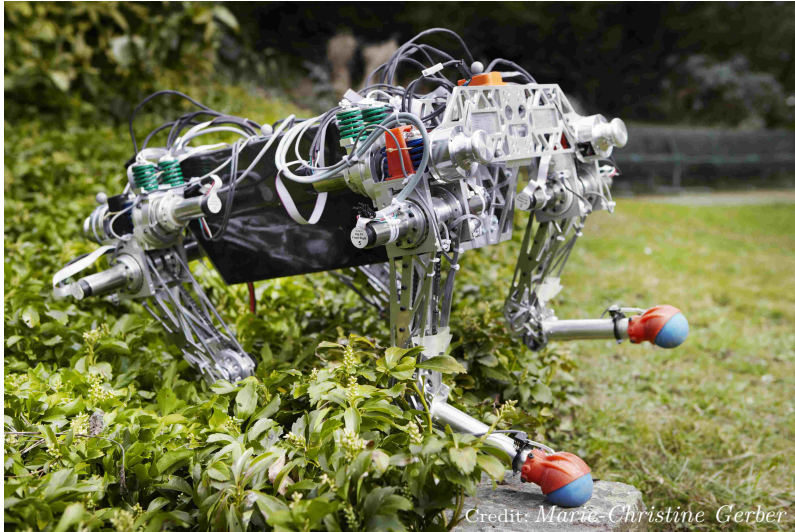
Abstract

The present dissertation addresses the design and control of a quadrupedal robot that achieves locomotion skills ranging from static walking to dynamic running. By combining novel techniques in the field of *system design*, *actuation*, and *control*, this work is a step towards closing the gap between legged robotic devices and their natural counterparts.

Inspired by nature, where elastic elements in muscles and tendons largely contribute to the impressive locomotion capabilities, the quadruped robot StarLETH is built mechanically compliant. In each of the twelve joints, serial springs provide the necessary robustness to perform dynamic maneuvers. They improve energetic efficiency by intermittently storing energy, and they enable precise torque control for elaborate interaction with the environment. We specifically engineer the mechanical properties of the actuators to support the natural dynamics of running gaits and provide low-level control techniques to precisely regulate the joint torque and position.

The performance of the applied design, actuation, and low-level control approach is evaluated in planar single leg hopping experiments. To this end, the motion is generated and stabilized by emulating bio-inspired locomotion templates. Thereby, the leg can passively recover as much as 64% of the energy, while the peak power and speed at the joint are more than four times higher than at the corresponding motor. These findings are highly consistent with different biomechanical studies and the underlying control principles can be directly extended to multi-legged systems.

Legged systems continuously interact with their surroundings through multiple permanently changing contact points in order to keep balance or propel themselves forward. Dealing with the corresponding high-dimensional, nonlinear, non-smooth and underactuated system dynamics represents a very challenging control problem. In this context, we present a hierarchical task-space inverse dynamics framework that is based on projected, support consistent equations of motion. Using prioritized least square optimization, the complex behavior of a robotic system evolves through simultaneous execu-



tion of different motion tasks such as ensuring stability, moving a foot point, or keeping certain posture while optimally distributing the joint torques or contact forces.

The proposed method is evaluated in a series of experiments on the developed quadrupedal robot StarETH. Static locomotion is optimized with respect to energetic efficiency or robustness against slippage while handling position and torque saturation limitations. Even on rough terrain, the robot can robustly walk by exploiting internal force directions. It can smoothly change its contact situation by interpolating between subsequent stance configurations. Building on similar principles as for single legged hopping, the quadruped is able to perform dynamic trotting gaits even under substantial external disturbances such as an unanticipated change in ground elevation or a kick on the main body. The experimental section is concluded with energetic measurements during long term trotting and followed by a discussion and comparison with the biological counterparts.

Keywords: Quadruped Robot, High Compliant Series Elastic Actuation, Hierarchical Operational Space Control, Inverse Dynamics, Dynamic Locomotion

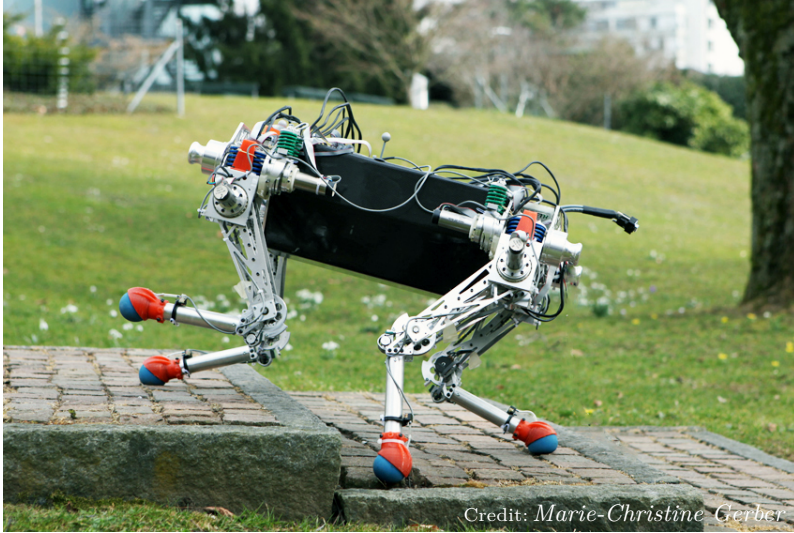
Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion und Regelung eines vierbeinigen Roboters, welcher sich sowohl langsam und statisch in unwegsamem Gelände fortbewegen kann, gleichermassen aber auch fähig ist, dynamisch zu rennen. Durch Einsatz modernster Methoden aus den Bereichen Systemdesign, Antriebs- und Regelungstechnik ist es gelungen, die Laufrobotik einen Schritt näher an die Biologie zu bringen.

Bei der Konzipierung unseres Roboterhundes Star*LETH* liessen wir uns von der Natur inspirieren. Anstelle von Muskeln und Sehnen, welche durch ihre Federwirkungen erheblich zu einer schnellen und energieeffizienten Fortbewegung beitragen, ist Star*LETH* mit Federn in Serie zu den Gelenksmotoren ausgestattet. Dies stellt die nötige Robustheit für dynamische Manöver sicher, erhöht die Energieeffizienz beim Rennen durch zwischenzeitliche Energiespeicherung und ermöglicht eine sehr fortschrittliche Interaktion mit der Umgebung dank präziser Kraftregelung. Die mechanischen Eigenschaften dieser Federn sind so optimiert, dass sie die natürliche Systemdynamik von dynamischen Gangarten maximal unterstützen.

Die Leistungsfähigkeit des mechanischen Designs, der Serie-elastischen Aktuatoren, sowie der Regelstrukturen wurde zuerst in Experimenten mit einem einzelnen Bein evaluiert. Durch Nachbilden einer stark vereinfachten Dynamik des menschlichen Rennens konnten planare Hüpfbewegungen generiert und stabilisiert werden. Dank der Federn wird 64% der Energie passiv rückgewonnen und gleichzeitig werden Spitzengeschwindigkeiten und -leistungen am Gelenk mehr als vervierfacht. Die Resultate zeigen erstaunliche Ähnlichkeiten zu verschiedenen biomechanischen Studien und können direkt auf mehrbeinige Systeme übertragen werden.

Laufroboter interagieren an ständig wechselnden Kontaktpunkten mit der Umgebung um sich fortzubewegen und zu stabilisieren. Für die Regelung dieser hochdimensionalen, nicht-linearen, nicht-glatten und unteraktuierten Systemdynamik haben wir eine Methode entwickelt, welche auf einer Invertierung der Kontakt-konsistenten Systemdynamik basiert. Dazu werden



die verschiedenen Aufgaben wie Balance halten, einen Fusspunkt verschieben, eine gewisse Haltung einnehmen oder auch Kontaktkräfte und Motormomente optimal verteilen als Fehlerquadratminimierungen ausgedrückt und mit unterschiedlichen Prioritäten behandelt.

Diese Regelstruktur wurde folglich in einer Vielzahl von Experimenten mit StarLETH getestet. So kann zum Beispiel eine Gangart auf Motoreffizienz oder Sicherheit gegen Rutschen der Fusspunkte optimiert werden. Gleichzeitig garantiert unser Algorithmus, dass Drehmoment- und Winkel-limitierungen eingehalten werden. Durch das Aufbringen von internen Kontaktkräften ist der Roboter sogar fähig, sich während statischem Gehen auf unebenem Gelände festzuhalten und mittels Interpolation eine kontinuierliche Kraft- und Drehmomentverteilung trotz ständig wechselnden Kontaktpunkten zu erreichen. StarLETH beherrscht nicht nur statische Gangarten, sondern kann auch schnell und dynamisch trotten, selbst unter Einfluss von erheblichen Störungen wie Erhebungen im Boden oder externen Stößen. Der experimentelle Teil wird abgerundet mit Energiemessungen beim Trotten über eine längere Distanz. Schlussendlich werden alle Resultate in der Diskussion nochmals aufgegriffen und mit biomechanischen Studien verglichen.

Stichworte: vierbeiniger Roboter, Serie-elastische Aktuatoren, hierarchische Regelung, inverse Dynamik, dynamisches Laufen