

Advancing the Autonomy of Legged Robots: From the Lab to the Real-world

A thesis submitted to attain the degree of
Doctor of Sciences
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Joonho Lee
MSc ETH in Robotics, Systems and Control
born on 31 January 1994

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Marco Hutter
Dr. Vladlen Koltun
Prof. Dr. Sehoon Ha

Abstract

This thesis introduces advancements in the autonomy of quadrupedal robots, particularly focusing on enhancing locomotion and navigation capabilities in the real world. A key objective is to recognize and overcome the inherent limitations of traditional model-based control and planning approaches in legged robotics. These conventional methods, marked by simplified formulations and high computational requirements, have shown limitations in robustness and responsiveness to dynamic real-world environments. This thesis investigates the potential of data-driven approaches to tackle these challenges, aiming to achieve streamlined integration and optimal performance through more responsive and adaptive controllers.

This research is structured around two main topics and several sub topics to further improve scalability and capability of our systems. Firstly, there's a focus on mobility, which involves developing a robust locomotion controller using an approach called 'Privileged Learning'. This method combines the strengths of Reinforcement Learning (RL) and Imitation Learning (IL), significantly improving legged robots' traversability on rough terrains. Secondly, the focus shifts to autonomy, with the development of a highly responsive navigation system using Hierarchical RL. This system seamlessly unifies locomotion control and navigation planning, enabling real-time decision-making and path adaptation crucial for dynamic and unpredictable environments. Lastly, the thesis explores advancements in the application of RL to other robotic problems, introducing permutation-invariant neural networks and constrained RL algorithms. These innovations are designed to boost safety and scalability in real-world applications.

In summary, this thesis delves into the autonomy of legged robots, from low-level locomotion control to high-level navigation planning. The results significantly advance legged machines' deployment in environments unreachable by wheeled, tracked, and traditionally controlled legged robots. The introduced systems open new frontiers for enabling complex robotic systems to effectively navigate the real world, offering solutions to the challenges faced by autonomous mobile robots. Recognized and implemented by industry leaders like Swiss-Mile Robotics and ANYbotics, this work marks a crucial transition from theoretical laboratory research to practical, real-world applications, enhancing the capabilities of legged robots to navigate through complex, unstructured environments.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt Fortschritte in der Autonomie vierbeiniger Roboter vor und konzentriert sich insbesondere auf die Verbesserung der Fortbewegungs- und Navigationsfähigkeiten in der realen Welt. Ein Hauptziel besteht darin, die inhärenten Einschränkungen traditioneller modellbasierter Steuerungs- und Planungsansätze in der Beinrobotik zu erkennen und zu überwinden. Diese herkömmlichen Methoden, die sich durch vereinfachte Formulierungen und hohe Rechenanforderungen auszeichnen, haben Einschränkungen in der Robustheit und Reaktionsfähigkeit gegenüber dynamischen realen Umgebungen gezeigt. Diese Arbeit untersucht das Potenzial datengesteuerter Ansätze zur Bewältigung dieser Herausforderungen mit dem Ziel, eine optimierte Integration und optimale Leistung durch reaktionsfähigere und anpassungsfähigere Controller zu erreichen.

Diese Forschung gliedert sich in drei Hauptthemen. Erstens liegt der Schwerpunkt auf der Mobilität, bei der es um die Entwicklung eines robusten Fortbewegungscontrollers mithilfe eines Ansatzes namens „Privileged Learning“ geht. Diese Methode kombiniert die Stärken von Reinforcement Learning (RL) und Imitation Learning (IL) und verbessert so die Beweglichkeit von Robotern auf unebenem Gelände erheblich. Zweitens verlagert sich der Fokus auf Autonomie, mit der Entwicklung eines äußerst reaktionsschnellen Navigationssystems unter Verwendung von Hierarchical RL. Dieses System vereint nahtlos Fortbewegungssteuerung und Navigationsplanung und ermöglicht eine Entscheidungsfindung und Pfadanpassung in Echtzeit, die für dynamische und unvorhersehbare Umgebungen entscheidend sind. Schließlich untersucht die Dissertation Fortschritte bei der Anwendung von RL auf die Robotik und führt permutationsinvariante neuronale Netze und eingeschränkte RL-Algorithmen ein. Diese Innovationen sollen die Sicherheit und Leistung in realen Anwendungen steigern und bedeuten einen bedeutenden Fortschritt in den Roboterfähigkeiten.

Zusammenfassend befasst sich diese Arbeit mit der Autonomie von Beinrobotern, von der Fortbewegungssteuerung auf niedriger Ebene bis zur Navigationsplanung auf hoher Ebene. Die Ergebnisse bringen den Einsatz von Beinmaschinen in Umgebungen, die für Rad-, Raupen- und herkömmlich gesteuerte Beinroboter nicht erreichbar sind, erheblich voran. Die vorgestellten Systeme eröffnen neue Grenzen für die effektive Navigation komplexer Robotersysteme in der realen Welt und bieten Lösungen für die Herausforderungen, denen autonome mobile Roboter gegenüberstehen. Diese von Branchenführern wie Swiss-Mile Robotics und ANYbotics anerkannte und umgesetzte Arbeit stellt einen entscheidenden

Übergang von der theoretischen Laborforschung zu praktischen, realen Anwendungen dar und verbessert die Fähigkeiten von Beinrobotern, durch komplexe, unstrukturierte Umgebungen zu navigieren.