

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Masterarbeit

Im Studiengang Physik

vorgelegt von

Martin Huber

geboren in Frankenthal

2019

# Behavioral Cloning for Autonomous Navigation of Humanoid Robots with Nonlinear Model Predictive Control

Die Masterarbeit wurde von Martin Huber

ausgeführt am

Institut für Optimierung, Robotik und Biomechanik

unter der Betreuung von

Frau Prof. Katja Mombaur

## **Verhaltensklonung zur autonomen Navigation humanoider Roboter mit Nichtlinearer Modellprädiktiver Regelung:**

In dieser Arbeit erkunden wir die Möglichkeiten der Verhaltensklonung zur autonomen Navigation humanoider Roboter durch bloße Bilder. Hierfür wird eine nichtlineare, Modellprädiktive Regelung, die es ermöglicht, stabile Lauftrajektorien in Echtzeit zu erzeugen, implementiert und evaluiert. Es wird demonstriert, dass minimale Veränderung in der Bildverarbeitung genügen, um vielseitige Bewegungsstrategien in vielfältigen dynamischen und statischen Umgebungen zu erlernen. Diese Einfachheit der Lösung wird als passende Ergänzung zur Meidung von Konvexen Hindernissen identifiziert, welche durch Randbedingungen die Lösungen der nichtlinearen Modellprädiktiven Regelung einschränken. Alle Experimente werden an Heicub, einer Variante des iCub, durchgeführt, welcher speziell für Optimalsteuerung in der Fortbewegung am Istituto Italiano di Tecnologia in Genua entwickelt wurde. Die Auswertung von Stabilitätskriterien zeigt weiterhin, dass ein menschlicher Kontrolleur, einem künstlichen Agenten gegenüber, nicht überlegen ist. Um die präsentierte Methode schließlich auf tauschende Aufgaben zu erweitern, vereinfachen wir die wechselnden Umgebungen auf ein gut gelöstes Klassifizierungsproblem.

## **Behavioral Cloning for Autonomous Navigation of Humanoid Robots with Nonlinear Model Predictive Control:**

In this work we investigate the capabilities of behavioral cloning for autonomous navigation of humanoid robots from raw image input. Therefore, a nonlinear model predictive control that allows for real time generation of stable walking trajectories is implemented and evaluated. It is demonstrated that minor modifications in the vision pipeline are sufficient for the learning of versatile motion strategies in various dynamic and static environments. This simplicity is identified as a well suited addition to the avoidance of convex obstacles, which are represented by constraints to the solution of the implemented nonlinear model predictive control. All of the experiments are carried out on Heicub, a descendant of the iCub, which was especially designed for optimal control in locomotion at the Istituto Italiano di Tecnologia in Genova. The evaluation of stability criteria further reveals that there is no superiority of a human controller over an artificial agent. Finally, to extend the proposed approach to changing tasks, we boil the variation of environments down to a well solved classification problem.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Background</b>	<b>6</b>
2.1	Humanoid Walking . . . . .	6
2.1.1	Zero Moment Point . . . . .	7
2.1.2	Linear Inverted Pendulum . . . . .	8
2.1.3	Nonlinear Model Predictive Control . . . . .	9
2.1.4	Interpolating Trajectories . . . . .	10
2.1.5	Kinematics . . . . .	11
2.2	Machine Learning . . . . .	12
2.2.1	Behavioral Cloning . . . . .	13
2.2.2	Reinforcement Learning . . . . .	14
2.2.3	Image Processing . . . . .	15
<b>3</b>	<b>State of the Art</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Methods</b>	<b>17</b>
4.1	Software . . . . .	17
4.2	Implementation . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Experiments</b>	<b>19</b>
5.1	User Controlled Walking . . . . .	19
5.2	Autonomous Walking . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>
<b>I</b>	<b>Appendix</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Lists</b>	<b>22</b>
A.1	List of Figures . . . . .	22
A.2	List of Tables . . . . .	22
<b>B</b>	<b>Bibliography</b>	<b>23</b>

# 1 Introduction

## 2 Background

### 2.1 Humanoid Walking

### 2.1.1 Zero Moment Point

### 2.1.2 Linear Inverted Pendulum



### 2.1.3 Nonlinear Model Predictive Control

### 2.1.4 Interpolating Trajectories

### 2.1.5 Kinematics

## 2.2 Machine Learning

### 2.2.1 Behavioral Cloning

### 2.2.2 Reinforcement Learning

### 2.2.3 Image Processing

### 3 State of the Art



## 4 Methods

### 4.1 Software

## 4.2 Implementation

## 5 Experiments

### 5.1 User Controlled Walking

### 5.2 Autonomous Walking

## 6 Conclusion

# Part I

## Appendix

## A Lists

### A.1 List of Figures

### A.2 List of Tables

## B Bibliography

lorem ipsum. URL [http://la.wikisource.org/wiki/Lorem\\_ipsum](http://la.wikisource.org/wiki/Lorem_ipsum).

Erklärung:

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den (Datum) .....