Aufbau und Regelung eines Ballbots

Florian Müller
Markus Lamprecht
Michael Suffel

Projektseminar – 16. Februar 2018

Betreuer: Dr.-Ing. Eric Lenz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK UND MECHATRONIK rtm

Aufgabenstellung

Für schriftliche Arbeiten (Pro-/Projektseminar, Studien-, Bachelor-, Master-, Diplomarbeiten, etc.) soll Studierenden ein LaTeX-Dokument zur Verfügung gestellt werden, das die Vorgaben aus den *Richtlinien zur Anfertigung von Studien- und Diplomarbeiten* [**?**] umsetzt. Die Dokumentation soll die Funktionen des Dokumentes beschreiben und Hinweise zu ihrer Anwendung geben.

Grundlage ist die `tudreport`-Klasse. Die damit erstellten Arbeiten müssen sowohl zum Ausdrucken geeignet sein als auch für die Bildschirmdarstellung und die elektronische Archivierung als PDF-Datei.

Beginn:	16. Oktober 2017
Ende:	16. Februar 2018
Seminar:	16. Februar 2018

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Dr.-Ing. Eric Lenz

Technische Universität Darmstadt
Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik
Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Landgraf-Georg-Straße 4
64283 Darmstadt
Telefon 06151/16-4167
www.rtm.tu-darmstadt.de

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 16. Februar 2018

Florian MüllerMarkus LamprechtMichael Suffel

Kurzfassung

Das LaTeX-Dokument `sada_tudreport` ist eine Vorlage für schriftliche Arbeiten (Proseminar-, Projektseminar-, Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten, etc.) am Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt. Das Layout ist an die *Richtlinien zur Anfertigung von Studien- und Diplomarbeiten* [**?**] angepasst und durch Modifikation der Klasse `tudreport` realisiert, so dass in der Arbeit die gewohnten LaTeX-Befehle benutzt werden können. Die vorliegende Anleitung beschreibt die Klasse und gibt grundlegende Hinweise zum Verfassen wissenschaftlicher Arbeiten. Sie ist außerdem ein Beispiel für den Aufbau einer Studien-, Bachelor-, Master- bzw. Diplomarbeit.

Schlüsselwörter: Studienarbeit, Bachelorarbeit, Masterarbeit, Diplomarbeit, Vorlage, LaTeX-Klasse

Abstract

The LaTeX document `sada_tudreport` provides a template for student's research reports and diploma theses (" Proseminar-, Projektseminar-, Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten") at the Institute of Automatic Control, Technische Universität Darmstadt. The layout is adapted to the *"Richtlinien zur Anfertigung von Studien- und Diplomarbeiten"* [**?**] and is implemented by modification of the standard `tudreport` class, so that common LaTeX commands can be used in the text. This manual describes the class and dwells on general considerations on how to write scientific reports. Additionally, it is an example for the structure of a thesis.

Keywords: Research reports, diploma theses, template, LaTeX class

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen

Lateinische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
I	Strom	A
R	Widerstand	Ω
U	Spannung	V

Griechische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\mathbf{\Psi}$	Datenmatrix	
σ	Standardabweichung	
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}

Abkürzungen

Kürzel	vollständige Bezeichnung
Dgl.	Differentialgleichung
LS	Kleinste Quadrate (*Least Squares*)
PRBS	Pseudo-Rausch-Binär-Signal (*Pseudo Random Binary Signal*)
ZVF	Zustandsvariablenfilter

1 Einleitung

4 und 3 ballbots

2 Modellbildung und Regelung

2.1 Model

Für die Modellbildung wird der dreidimensionale Ballbot in drei unabhängige planare Modelle aufgeteilt. In jeder Ebene wird das System vereinfacht als Zusammensetzung von drei starren Körpern bestehend aus einer Kugel, ein virtuelles Rad und einen Körper betrachtet und besitzt somit zwei Freiheitsgrade, die sich in eine Translation bzw. Rotation des Balles und eine Rotation des Körpers aufteilen lassen[ETHZ].
Um ein möglichst vereinfachte Modelle der drei Ebenen zu erhalten, werden weitere Annahmen getroffen, die im Folgenden erläutert werden:

- Kein Schlupf: Das System besitzt zwei Kontaktpunkte, in denen ein Schlupf auftreten kann. Hierzu zählt zum einen der Kontaktpunkt von Ball und Boden und zum zweiten der Kontaktpunkt zwischen den Rädern und dem Ball. Damit dies gewährleistet wird, müssen die angelegten Drehmomente begrenzt werden.
- Keine Reibung: Der einzige Vorgang im System, bei dem die Reibung nicht vernachlässigt wird, ist bei der Rotation des Balles um die z-Achse. Bei den anderen Vorgängen, bei der in der Realität auch Reibung auftritt, wird im Modell vernachlässigt.
- Keine Deformation: Bei dem eingesetzten Ball handelt es sich nicht um eine hohle Stahlkugel, sondern um ein elastischen, mit Luft befüllbaren Ball. Deshalb wird die Deformation des Balles in der Modellbeschreibung nicht mit einbezogen, um die Komplexität gering zu halten.
- Schnelle Motorendynamik: Für die Gleichgewichtsstabilisierung des Roboters ist es wichtig, dass die Motoren eine schneller Dynamik als das System aufweisen.
- Horizontale Bewegung: Das System wird für die horizontale Bewegung auf einer flachen Oberfläche ohne starken Neigungen ausgelegt. Somit wird die vertikale Bewegung vernachlässigt.

Mit den getroffenen Annahmen ist es möglich, das Modell des Ballbots aufzustellen.

2.2 Energien

Für das Aufstellen der Bewegungsgleichungen des Systems wird der Lagrange Ansatz angewendet. Dazu müssen im Voraus die potentiellen und kinetischen Energien der einzelnen Körper aufgestellt werden. Dabei ist darauf zu achten,dass die Formeln der potentiellen und kineti-

schen Energien für die yz- und der xz-Ebene identisch sind und dagegen sich sie die Energie xy-Ebene unterscheiden. Deshalb werden im Folgenden die Formeln der yz und xy-Ebenen angegeben.
Zunächst werden die kinetischen und potentiellen Energien des Balles in den entsprechenden Ebenen betrachten. Für die kinetische Energie werden folgenden Formeln der jeweiligen Ebenen angegeben.

$$T_{S,yz} = \frac{1}{2} \cdot m_S \cdot (r_S \cdot \dot{\varphi}_x)^2 + \frac{1}{2} \cdot I_S \cdot \dot{\varphi}_x^2 \tag{2.1}$$

$$T_{S,xy} = \frac{1}{2} \cdot I_S \cdot \dot{\varphi}_z^2 \tag{2.2}$$

Da der Ursprung des Weltkoordinatensystems in den Mittelpunkt des Balles gelegt wird, besitzt das System sowohl in der yz als auch in der yx Ebene keine potentielle Energie.

$$V_{S,yz} = 0 \tag{2.3}$$

Die kinetischen Energien des virtuellen Rades der jeweiligen Ebene werden mit den folgenden Formeln angegeben.

$$T_{W,yz} = \frac{1}{2} \cdot m_W \cdot ((r_S \cdot \dot{\varphi}_x)^2 + 2 \cdot (r_S + r_W) \cdot \cos(\vartheta_x) \cdot \dot{\vartheta}_x \cdot (r_S \cdot \dot{\varphi}_x) + (r_S + r_W)^2 \cdot \dot{\vartheta}_x^2) + \frac{1}{2} \cdot I_W \cdot (\frac{r_S}{r_W} \cdot (\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x)^2 \tag{2.4}$$

$$T_{W,xy} = \frac{1}{2} \cdot I_W \cdot \dot{\Psi}_z^2 \tag{2.5}$$

Die potentielle Energie des virtuellen Rades in der yz Ebene kann folgendermaßen berechnet werden.

$$V_{W,yz} = m_W \cdot g \cdot (r_S + r_W) \cdot \cos(\vartheta_x) \tag{2.6}$$

Die kinetischen Energien für die yz und der xy Ebene für den Roboterkörper sind ähnlich der des virtuellen Rades und werden folgendermaßen berechnet.

$$T_{B,yz} = \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot ((r_S \cdot \dot{\varphi}_x)^2 + 2 \cdot l \cdot \cos(\vartheta_x) \cdot \dot{\vartheta}_x \cdot (r_S \cdot \dot{\varphi}_x) + l^2 \cdot \dot{\vartheta}_x^2) + \frac{1}{2} \cdot I_A \cdot \dot{\vartheta}_x^2 \tag{2.7}$$

$$T_{B,xy} = \frac{1}{2} \cdot I_{W,xy} \cdot \dot{\Psi}_z^2 \tag{2.8}$$

Auch die dazugehörige potentielle Energie ähnelt der des virtuellen Rades. Der Unterschied liegt zum einem im Gewicht des Körpers m_B und der Höhe l von Ballmittelpunkt zum Schwerpunkt des Roboteraufbaus.

$$V_{B,yz} = m_A \cdot g \cdot l \cdot \cos(\vartheta_x) \tag{2.9}$$

2.3 Bewegungsgleichungen

(matlab) Mit den kinetischen und potentiellen Energien können nun die Bewegungsgleichungen des Ballbots für die jeweiligen Ebenen mit Hilfe der LAGRANGEschen Gleichungen zweiter Art hergeleitet werden. Als Beispiel wird hier die Herleitung für die yz-Ebene angegeben.
Zunächst wird aus den einzelnen Summen der kinetischen und potentiellen Energien die LANGRANGEsche Funktion gebildet.

$$L = T - V \tag{2.10}$$

Die Bewegungsgleichungen für den Ballbot resultieren aus dem Lösen der LAGRANGEschen Gleichungen zweiter Art.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}^2}\right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{f}_{NP,yz} \tag{2.11}$$

Mit mathematische Umformungen können diese Bewegungsgleichungen in eine Matrixform überführt werden.

$$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} m_{tot} \cdot r_S^2 + I_S + (\frac{r_S}{r_W})^2 \cdot I_W & -\frac{r_S}{r_W^2} \cdot r_{tot} \cdot I_W + \gamma \cdot r_S \cdot \cos\vartheta_x m_{tot} \\ -\frac{r_S}{r_W^2} \cdot r_{tot} \cdot I_W + \gamma \cdot r_S \cdot \cos\vartheta_x m_{tot} & \frac{r_S^2}{r_W^2} \cdot I_W + I_B + m_b \cdot l^2 + m_W \cdot r_{tot}^2 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{M}_x \in \mathbb{R}^{2\times 2}$$

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} -r_S \cdot \gamma \cdot \sin\vartheta_x \cdot \dot{\vartheta}_x^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{C}_x \in \mathbb{R}^{2\times 1}$$

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \cdot \sin\theta_x \cdot \gamma \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{G}_x \in \mathbb{R}^{2\times 1} \tag{2.12}$$

2.4 Zustandsraumdarstellung

Bei den hergeleiteten Bewegungsgleichungen handelt es sich um nichtlineare Funktionen. Um ein Zustandsraummodell zu erhalten, müssen zunächst die Zustände bzw. der Zustandsvektor festgelegt werden. Als Beispiel wird auch hier die yz-Ebene betrachtet. Mit $\mathbf{x} = [\varphi_x, \vartheta_x, \dot{\varphi}_x, \dot{\vartheta}_x]$ können die nichtlinearen Funktionen in folgende Form überführt werden.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{M_x}^{-1} \cdot (\mathbf{f}_{NP} - (\mathbf{C_x} + \mathbf{G_x})) \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Das Ziel dieser Arbeit ist das Auslegen eines Reglers, damit der Roboter innerhalb eines kleinen Bereiches um den Arbeitspunkt $\mathbf{x}_0 = [0, 0, 0, 0]$ auf dem einen Ball balanciert. Hierzu muss

zunächst das nichtlineare Modell um den Arbeitspunkt mit der Taylor-Reihenentwicklung linearisiert werden, um die lineare Zustandsraumdarstellung

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}+\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}\\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}+\mathbf{D}\cdot\mathbf{u}\end{aligned} \tag{2.14}$$

zu erhalten. Mit den zum Roboter dazugehörigen Parametern und dem eingesetzten Arbeitspunkt lauten die konkreten Matrizen für die Zustandsraumdarstellung der yz-Ebene folgender Maßen:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0.4886 & 0 & 0\\ 0 & 17.1119 & 0 & 0\end{bmatrix}\mathbf{B}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 63.5516\\ -10.6945\end{bmatrix}\qquad \mathbf{C}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\mathbf{D}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$

Damit der Roboter auf einen Ball die eigene Gleichgewichtslage einhalten kann, ist es zunächst nebensächlich, welche Position und Geschwindigkeit der Ball dabei einnimmt, da in dem linearisierten Modell nur geringe Abweichungen um die Ruhelage zulässig sind. Dadurch sind für den späteren Entwurf einer Regelung die Zustände des Roboters von Bedeutung und die Zustände für den Ball müssen nicht für eine Regelung berücksichtigt werden. Mit dem neuem Zustandsvektor ... wird die Ordnung des Modells 2.14 reduziert, das zu folgenden Zustandsraummatrizen führt:

$$\mathbf{A}^*=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 17.1119 & 0\end{bmatrix}\mathbf{B}^*=\begin{bmatrix}0\\ -10.6945\end{bmatrix}\qquad \mathbf{C}^*=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\mathbf{D}^*=\begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix}$$

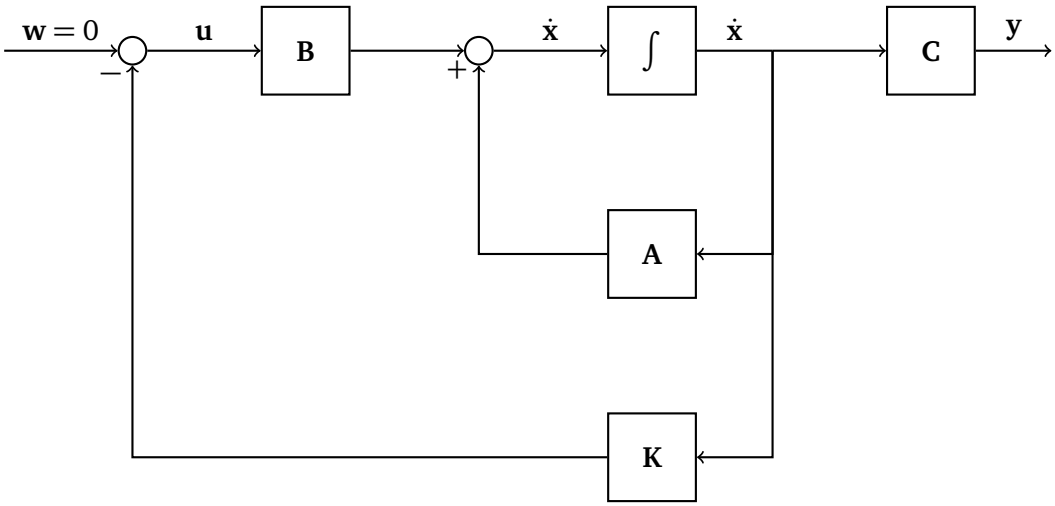
Die Prüfung auf Stabilität der beiden Modellen erfolgt anhand der Lage der Eigenwerte. Das ursprüngliche als auch das reduzierte Modell besitzt folgende Eigenwerte:

$$\lambda=\begin{pmatrix}0\\ 0\\ 4.1367\\ -4.1367\end{pmatrix}\lambda^*=\begin{pmatrix}4.1367\\ -4.1367\end{pmatrix} \tag{2.15}$$

Das ursprünglich Modell besitzt zwei grenzstabilen Eigenwerte $\lambda_{1,2}=0$ auf der Imaginären Achse und einen instabilen Eigenwert $\lambda_3=4.1367$ in der rechten Halbebene des Bildbereiches. Somit ist das System instabil. Bei dem reduzierten Modell handelt es sich ebenfalls um ein instabiles System, da es auch einen Eigenwerte $\lambda_1^*=4.1367$ besitzt.

Die Untersuchung der Steuer- und Beobachtbarkeit erfolgt in beiden Modelle mit den entsprechenden Kriterien von KALMANN. In beiden Fällen besitzen die Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsmatrizen vollen Rang, wodurch beide Modelle vollständig steuer- und beobachtbar sind. Mit diesen Systemeigenschaften ist mit Hilfe eines Reglers möglich, die entsprechende instabile System zu stabilisieren. Das Auslegen eines geeigneten Regler wird nachfolgend erläutert. [ETHZ,MGR]

2.5 Reglerentwurf



Der Entwurf eines geeigneten Regler zur Stabilisierung der Gleichgewichtslage des Roboters wird im Folgenden auf das reduzierte Model beschränkt. Für die beiden Modelle der yz- und xz-Ebene wird jeweils ein linear quadratischer Zustandsregler (LQR) ausgelegt, dessen Funktionsweise in Abbildung **??** dargestellt ist und auf die Minimierung des Gütemaß

$$J = \int_0^\infty \mathbf{x}^T(t) \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t) \tag{2.16}$$

durch einen vorgegebenen Stellgrößenverlauf basiert. In das Güteintegral geht quadratisch zum einen der Trajektorienverlauf $\mathbf{x}(t)$ und der Stellgrößenverlauf $\mathbf{u}(t)$ ein. Dabei handelt es sich bei der symmetrischen und positiv semidefiniten Matrix $\mathbf{Q}$ um eine Gewichtungsmatrix für den Trajektorienverlauf. Für ein rasches Einschwingen eines bestimmten Zustandes dieser entsprechend mit einem größeren Gewicht in der Gewichtungsmatrix versehen werden. Die symmetrische und positiv definite Matrix $\mathbf{R}$ gewichtet dagegen die Stellgröße. Müssen Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigt werden, sind die zugehörigen in dieser Matrix größere Gewichte vorzusehen. Wird insgesamt die Gewichtungsmatrix $\mathbf{Q}$ im Verhältnis zur der Gewichtungsmatrix $\mathbf{R}$ vergrößert, führt das zu einem schnelleren Einschwingen der Zustände mit höheren Stellgrößen. Im umgekehrten Fall stabilisiert sich das System langsamer, da die Höhe der Stellgrößen abnehmen.[AD][Skript]
Das Regelgesetz, dass aus der Minimierung des Gütemaß resultiert, ergibt sich zu

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t) mit \qquad \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P}. \tag{2.17}$$

Die symmetrisch positiv definite Matrix **P** errechnet sich aus dem algebraischen Teil der Riccati-Differentialgleichung[Adamy]

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} - \mathbf{P} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{P} = -\mathbf{Q}. \tag{2.18}$$

Das Lösen der Riccati-Differentialgleichung und somit die Berechnung der Reglermatrix **K** kann mit Hilfe von MATLAB und dem dazugehörigen Befehl lqr durchgeführt werden. Zu Beginn werden die einzelnen Gewichtungen der einzelnen Zustände und Stellgrößen zu

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{R} = 200$$

festgelegt. Mit dieser Konfiguration werden die einzelnen Verstärkungsfaktoren des Regler zu

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -3.3494 & -0.9362 \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

berechnet.
Diese Verstärkungsfaktoren sind nicht ideal für den das System. Durch manuelles Anpassen der Werte kann das Balancieren des Roboters um die Gleichgewichtslage schrittweise angepasst werden, das schließlich auf folgende Reglermatrix

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} ? & ? \end{pmatrix} \tag{2.20}$$

führt.

2.6 Simulation des Modells

Mit dem Aufbau und Durchführung einer Simulation, die mit MATLAB/SIMULINK durchgeführt wird, können sowohl die nichtlinearen Bewegungsgleichungen und somit das dynamsiche Systemverhalten des Ballbots als auch der entworfene Zustandsregler verifiziert werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, sowohl die Versätrkungsfaktoren des Regler zu optimieren, um die Dynamik des Systems zu erhöhen oder Stellgrößen zu beschränken, als auch Grenzsituationen zu testen. Dadurch entfällt das Testen am realen System, das zeitaufwendig und eventuelle Schäden beinhaltet.
Im folgenden wird zunächst die allgemeine Implementierung in MATLAB/SIMULINK erläutert, die dann schrittweise an den realen Gegebenheiten angepasst wird.

2.6.1 Implementierung Modell

3 Implementation

In diesem Kapitel wird zunächst die eingesetzte Entwicklungsumgebung und Programmiersprache vorgestellt.

3.1 Entwicklungsumgebung

Als Entwicklungsumgebung für den Zustandsregler des Ballbots wird die ArduionoIDE eingesetzt, die in Abbildung 3.1 abgebildet ist. Die Hauptbestandteile dieser Entwicklungsumgebung umfasst einen Texteditor für das eigentliche Programm, eine Konsole für Fehler- und Kompilierungsmeldungen und einen seriellen Monitor für das Senden und Empfangen von Daten zwischen Computer und Board. Weiterhin eignet sich die Entwicklungsumgebung für den Einsatz, da ab der Version 1.6.4 diese über eine Bibliothek des eingesetzten OpenCR Board verfügt. Allerdings ist diese Bibliothek nicht vorinstalliert, weshalb diese über den Boardverwalter nachinstalliert werden muss.[Git,Arduino]

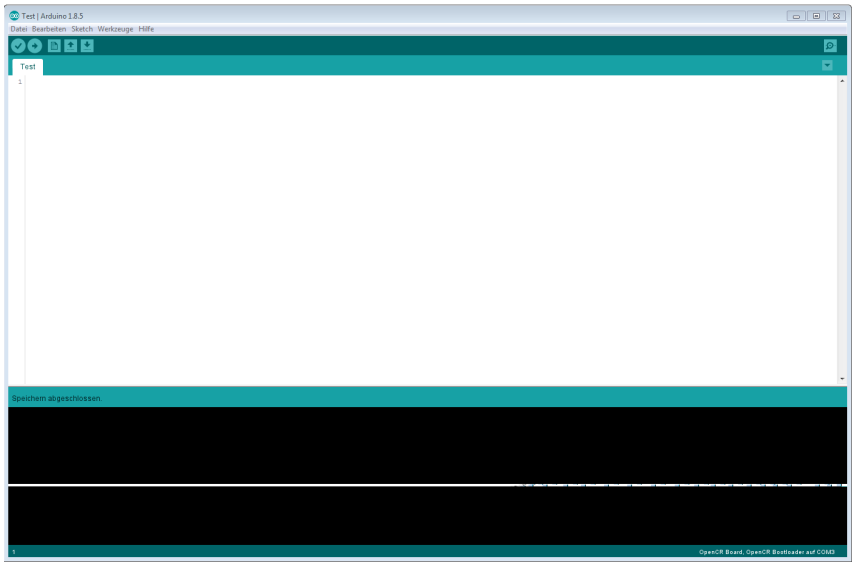


Abbildung 3.1.: Arduino Entwicklungsumgebung

Die Grundstruktur eines Programmes, die im Listing 3.1 dargestellt ist, gliedert sich in zwei Bereichen. In der Setup-Funktionen, die nur einmal beim Start des Board ausgeführt wird, werden verschieden Initialisierungen für den späteren Programmablauf festgelegt. Bei der Loop-Funktion handelt es sich um das eigentliche Programm, die als endlose Schleife durchlaufen wird. Werden für das Programm noch weitere Funktionen bzw. Variablen benötigt, müssen diese am Anfang oder am Ende eines Programmes definiert werden.

```
void setup()    {
        // Diese Funktion wird nur beim Starten
        // des entsprechen Boards einmal ausgeführt
}

void loop() {
        // Diese Funktion in einer endlosen Schleife
        // durchlaufen
}
```

Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, können Funktionen und Klassendefinitionen in seperate Dateien ausgelagert werden und im Hauptprogramm eingebunden werden.

4 Konstruktion

5 Simulation

Die Simulation des Ballbot's wurde mittels Gazebo realisiert und kann mittels eines globalen ROS launch files gestartet werden. Sie steht frei zur Verfügung und der Programmcode kann über [**?**] abgerufen werden. Zudem gibt es ein Youtube Video [**?**] das zeigt, wie man die Simulation auf einem Ubuntu-Betriebssystem mit ROS-Kinetic und Gazebo7 testen kann.

5.1 3D Simulatoren

Für eine 3D Simulation des Ballbot's bieten sich grundsätzlich zwei 3D Simulatoren an: Gazebo und V-Rep. Die Unterschiede dieser beiden Simulatoren sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Auf dem Up-level Computer (dem UP-Board) des Ballbots soll ROS[1] laufen. Aus diesem Grund wurde der Gazebo Simulator gewählt, denn dieser ist der standart Simulator von ROS und daher besser integriert als V-REP.[**?**, S. 1]

5.2 Simulation von omnidirektionalen Rädern

Bei der Simulation des Ballbot's in Gazebo stellt sich zunächst die Frage wie man die omnidirektionalen Räder simulieren soll. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten:

Die erste Möglichkeit besteht darin, das Omnidirektionale Rad ohne freidrehende kleine Räder zu simulieren. Um die freidrehenden kleinen Räder zu simulieren gibt man dem Rad zwei verschiedene Reibungskoeffizienten für die unterschiedlichen Reibungsrichtungen vor. Die Reibungskoeffizienten werden in gazebo mu1 und mu2 genannt. Der erste Reibungskoeffizient muss hierbei so gewählt werden, dass er der Reibung des Balls entspricht. Der zweite Reibungskoeffizient muss zu 0 gewählt werden, denn dieser simuliert die freidrehenden kleinen Räder des Omnidirektionalen Rades. Zusätzlich muss man noch den fdir1 parameter von gazebo setzen. Dieser gibt an in welche Richtung des aktuellen Gelenks (Joints) der mu1 parameter zeigen soll.

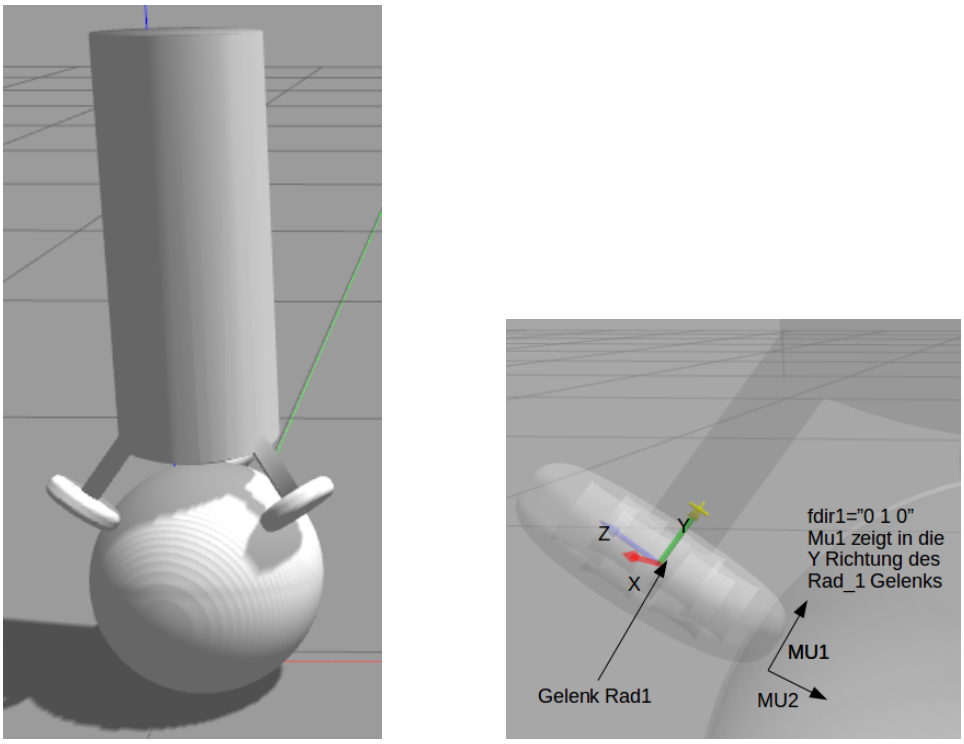
In Abbildung 5.1 a) ist die einfachste Modellierungs-Möglichkeit eines Ballbot's dargestellt. In dem Ausschnitt in Abbildung 5.1 b) sieht man, wie man die Reibungskoeffizienten Mu1 und Mu2 sowie den fdir1 Parameter für dieses Rad einstellen müsste, um unendlich viele freie

[1] Das Robot Operating System (ROS) ist eine Open Source Middelware. ROS hat eine rießige Community und ermöglicht es die verschiedenen Komponenten eines Roboters (Sensoren und Aktoren) geschickt miteinander zu verbinden. So ist es möglich einen Roboter sehr elegant zu simulieren und mittels eins UP-Level Computers zu steueren.

Tabelle 5.1.: Unterschiede zwischen den 3D Simulatoren V-REP und Gazebo.

Kriterium	Gazebo-Simulator	V-Rep-Simulator
Lizenz	Open Source Programm	Kommerzielle und kostenlose Version
ROS Integration	Gazebo ist der Standart Simulator von ROS. Gazebo wird als ein ROS Node behandelt und kann daher sehr gut in ROS integriert werden.	V-REP hat keine direkte Anbindung an ROS. Es läuft neben ROS in einem extra Terminal. Jedoch existiert ein Plugin mit dem auf ROS Topics und Services zugegriffen werden kann.
Plugins für Sensoren	Gazebo stellt bereits einige Plugins für Kameras, Laser Scanner etc. bereit. Diese können in einem xml file definiert werden.	V-REP stellt eine sehr benutzerfreundliche graphische Methode zur Verfügung um ein Modell mit Sensoren auszustatten.
CPU Auslastung	Gazebo lastet die Hardware sehr stark aus und ist bis zu 20% langsamer als V-REP.	V-REP hat im Gegensatz zu Gazebo eine konstante CPU Auslastung beim Zugriff auf ROS Nodes.
Community	Gazebo hat eine rießige Community die sehr viele Plugins für neue Sensoren selbst entwickelt und zur Verfügung stellt. Fragen gestellt werden.	V-REP ist nicht ganz so bekannt und hat lediglich 2570(01.2018) Forenmitglieder. Gazebo hat dagegen 3200.

Räder zu simulieren. Leider hat diese einfache Modellierungsmöglichkeit beim Testen nicht funktioniert, da in Gazebo7 der fdir1 Parameter nicht richtig funktioniert (siehe [**?**]).[2]



(a) Übersicht des gesamten Aufbau's des Ballbots.

(b) Simulation der freien Räder des Omnidirektionalen Rades.

Abbildung 5.1.: Die einfachste Simulations Möglichkeit eines Ballbots in Gazebo7.

Die zweite Möglichkeit ist sehr viel aufwendiger, denn sie besteht darin, das echte Omnidirektionale Rad mit allen kleinen Rädern zu simulieren. Hierfür muss zunächst das Omnidirektionale Rad ohne die freilaufenden kleine Subräder in die Gazebo Simulation geladen werden. Anschließend müssen die Subräder mit richtiger Orientierung und Position ebenfalls in die Simulation geladen werden. Das Omnidirektionale Rad sowie ein einzelnes Subrad wurde hierfür zunächst in Solid Edge konstruiert und anschließend als .stl exportiert. Diese .stl Dateinen werden dann mittels einer .xml Datei in die Gazebo Simulation geladen.

Für die finale Ballbot Simulation wurde die zweite Möglichkeit benutzt, denn sie ist der Realität sehr viel Näher als die Modellierung von unendlich vielen kleinen Subrädern. Nachteilig bei der Simulation aller 30 Subräder ist jedoch, der deutlich größere Berechnungsaufwand, der in unserem Falle die Simulation auf einen RealTime Faktor von 0.2 verlangsamt hat. Das heißt die Simulation lief fünf mal langsamer als sie in Echtzeit laufen würde.

[2] Seit Gazebo8 sollte der fdir1 Parameter wieder richtig funktionieren. Dies wurde jedoch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

5.3 Simulations Aufbau

Dieses Kapitel zeigt zunächst exemplarisch die Kommunikation zwischen ROS und Gazebo. Anschließend wird näher auf die verwendeten Plugins eingeganen. Zudem wird auf dynamische Eigenschaften der Simulation wie etwa die Steifigkeit einzelner Elemente eingeganen. Zum Schluss wird noch auf zwei Visualisierungsprogramme (RVIZ und PlotJuggler) eingegangen.

5.3.1 Kommunikation zwischen ROS und Gazebo

Die Simulation mittels Gazebo wurde komplett in ROS aufgebaut. Sie besteht aus mehreren Nodes (Teilprogrammen) die alle durch ein globales ROS launch file gestartet werden. Beim Ausführen der Simulation sind sehr viele Teilprogramme(Nodes) aktiv die untereinander über sogenannte Topics Nachrichten austauschen. Abbildung 5.2 zeigt den sogenannten

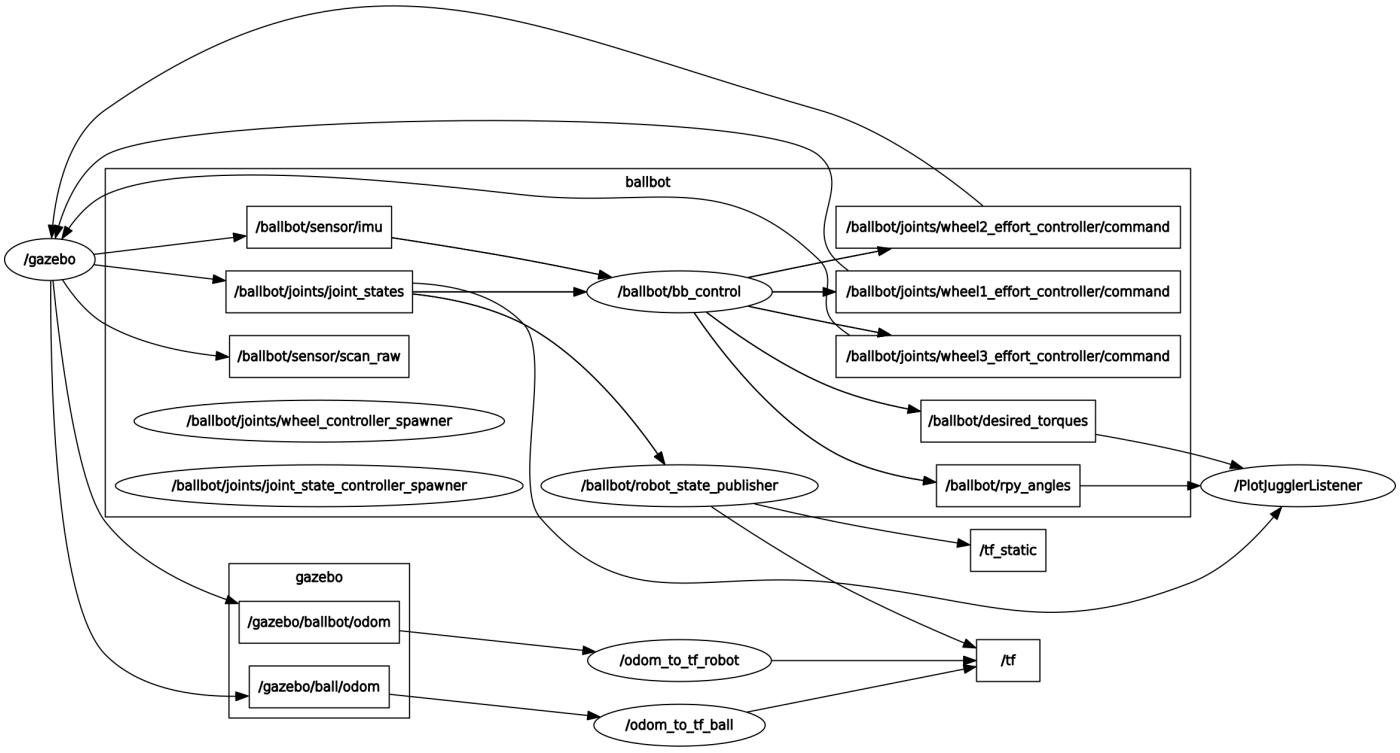


Abbildung 5.2.: Übersicht aller Teilprogramme(Nodes) und deren Topics, die beim Starten der Simulation aktiv sind und Nachrichten austauschen. Hierbei sind die Nodes mit Ellipsen und die Topics mit Rechtecken gekennzeichnet. Das Bild wurde mit dem ROS Programm rqt_graph erstellt.

ROS Graph der aktiven Nodes und deren Topics nach dem Starten des globalen ROS launch files. In der Mitte dieser Abbildung sieht man das den Node /ballbot/bb_control des namspaces

ballbot. Dies ist das Teilprogramm das die Regelung des simulierten Ballbots beinhaltet. Hierfür liest(subscribt) es Nachrichten der Topics /ballbot/joints/joint_states[3] und /ballbot/sensor/imu ein, berechnet damit die entsprechenden Drehmomente für die einzelnen Räder und veröffentlicht (published) die Nachrichten mit den berechneten Drehmomenten auf den Topics /ballbot/wheelx_effort_controller/command. Der Node /gazebo wiederum liest diese Drehmoment Befehle der einzelnen Omnidirektionalen Räder ein und dreht entsprechend in der sichtbaren Simulation die Räder.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass es möglich ist Gazebo mit ROS zu synchronisieren. Möchte man zum Beispiel einen Regler implementieren, der eine sehr große Update Frequenz (bzw. eine geringe Sample Time) aufweißt, die Berechnung der Verstärkungsfaktoren dieser Regelung jedoch länger dauert als die Sample Time, so muss die Regelung mit Gazebo synronisiert werden. Hierfür gibt es die Möglichkeit, Gazebo pausiert zu starten und auch die ganze Zeit pausiert zu lassen. Ist nun die Berechnung der Regelung fertig, schickt man einen rosservice call an gazebo um die Simulation einen Schritt weiterlaufen zu lassen. Anschließend wird der nächste Regelunswert berechnet. Bei dem simulierten Ballbot wurde eine Update Frequenz von 100Hz benutzt. Die Verstärkungsfaktoren der 2D Regelung wurden jedoch mit mindestens 1000Hz berechnet. Daher musste Gazebo nicht mit dem entsprechendem ROS Node, der die Regelung darstellt (/ballbot_controll) synronisiert werden.

5.3.2 Plugins der Simulation

Die Sensoren des Ballbot's können in Gazebo durch Plugins simuliert werden. Abbildung 5.3 zeigt die simulierten Sensoren und deren Plugin Bibliotheken. Hierbei wurde die IMU mit einer update_rate von 200Hz sowie mit einem Gaußschen Rausschen von 0.01 simuliert. Als Motoren Interface wurde das Joint Effort Interface verwendet, welches über das ros_control Paket[4] zur Verfügung steht. Die Motoren wurden dabei mit einem PID Regler simuliert. Dabei wurden die Verstärkungsfaktoren zu P=100, I=0.01 und D=10 gewählt. Für weitere Details zur Implementierung der Real-Sense Kamera sowie des LDS Laser Scanners sei auf den Programmcode [**?**] verwiesen.

5.3.3 Simulierte Dynamik-Eigenschaften

In Gazebo kann man für jedes Gelenk(Joint) ein maximales Drehmomentlimit und ein maximales Geschwindigkeislimit setzen. Dieses maximale Drehmomentlimit kann für die in echt verwendeten Dynamixel XM430-W350-R Motoren aus dem Datenblatt [**?**] entnommen werden.

[3] Dieses Topic enthält eine Nachricht die die aktuellen Rad Drehmomente, Geschwindigkeiten [rad/sec] und deren absolute Positionen enthält. Für die Regelung der Odometrie werden jedoch nur die Rad Drehgeschwindigkeiten verwendet.

[4] Dieses Paket ist standardmäßig bei der ROS-Kinetic Version dabei. Weitere Informationen zu diesem Paket gibt es hier: http://wiki.ros.org/ros_control .

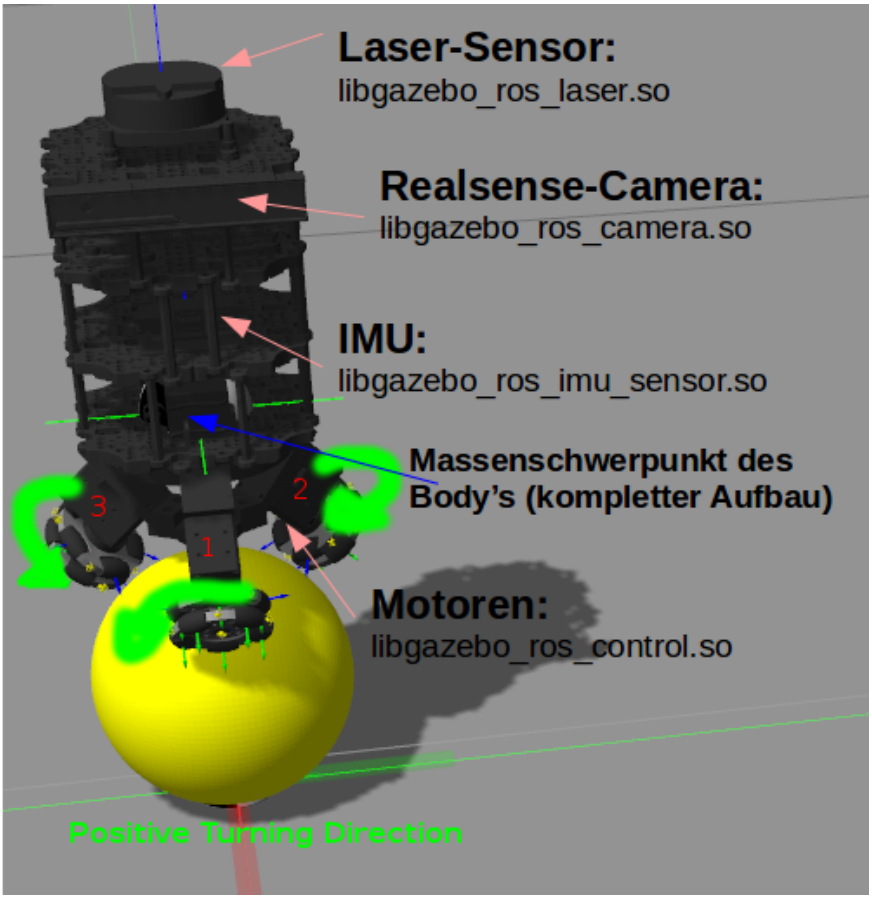


Abbildung 5.3.: Der Simulierte Ballbot mit den simulierten Sensoren und deren Plugin Bibliotheken.

Tabelle 5.2.: Dynamische Parameter der Bindeglieder der Gazebo Simulation.

Parameter Name	Beschreibung	Beispiel
mu1	Der erste Coulombsche Reibungskoeffizient.	0.6 (Holz)
mu2	Der zweite Coulombsche Reibungskoeffizient.	0.7 (Gummi)
kp	Steifigkeit im Kontaktpunkt, festglegt gemäß ODE für Festkörper Kontaktpunkte.	1+e5...1+e15
kd	Dämpfungskonstante im Kontaktpunkt, festglegt gemäß ODE für Festkörper Kontaktpunkte.	1...100

Betrachtet man zusätzlich, dass eine Batterie von 11.1 Volt verwendet wurde, so beträgt das maximale Drehmomentlimit: 3.8 Nm und das maximale Geschwindigkeitslimit: 4.5 rad/sec. Diese beiden Begrenzungswerte wurden ebenfalls in der Simulation verwendet.

Für jedes Bindeglied (link) kann man in Gazebo dynamische Eigenschaften festsetzen[5]. Die wichtigsten dieser dimensionsloser Größen sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Diese dynamischen Größen müssen speziell für den Ball, die Subwheels (die kleinen freilaufenden Räder der Omnidirektionalen Räder) sowie den Untergrund festgelegt werden. Das Einstellen dieser Größen gestaltet sich als sehr kompliziert, da Gazebo diese Parameter nicht ausführlich dokumentiert hat. In [**?**] heißt es lediglich, dass von zwei zusammenstoßenden Objekten immer der kleinste Coulombsche Reibungskoeffizient benutzt wird. Aus diesem Grund wurden die mu1 und mu2 Konstanten für die Subwheels, den Ball und den Untergrund alle auf den gleichen Wert von 0.7 gesetzt. Dieser Wert entspricht einem Reibkoeffizient von Asphalt oder Gummi.

In den Annahmen (siehe TODO kapitel flo) wurde erläutert, dass der Ball optimaler weise so hart wie möglich sein sollte. Aus diesem Grund wurde der kp Parameter des Balls auf 1+e15 und der kd Parameter zu 1.0 gewählt.

Die dynamischen Parameter kp und kd der Subwheels wurden erfahrungsbasiert zu $kp_{subwheel} = 5$ und $kd_{subwheel} = 1 + e10$ gewählt. Dies entspricht einem realtiv hartem und nur sehr gering dämpfendem Rad.

5.3.4 Visualisierungsprogramme

RVIZ, RQT-Multiplot

[5] Gazebo stellt verschiedene Physics Engine's zur Verfügung. Je nach Physics Engine haben die dynamischen Parameter unterschiedliche Namen. In diesem Projekt wurde der Standard Physics Engine der Open Dynamics Engine (ODE) verwendet.

6 Auswertung

A Parameterliste

NICHT AN DIESER TABELLE orientieren.

Parameter	Variable	Wert	Quelle
Masse Ball	m_S	0,3280 kg	Gemessen
Masse Motor	m_M	0,0820 kg	Datenblatt
Masse omnidirektionales Rad	m_{OW}	0.0520 kg	Gemessen
Masse virtuelles Rad	m_W	0,4020 kg	Gemessen
Masse Roboterkörper (mit Motoren/Räder)	m_B	1,603 kg	Gemessen
Masse Roboterkörper (ohne Motoren/Räder)	m_B	1,2010 kg	Gemessen
Radius Ball	r_S	0,0800 m	Datenblatt
Radius virtuelles Rad	r_W	0,0300 m	Datenblatt
Radius Körper	r_B	0,0703 m	Gemessen
Höhe Massenschwerpunkt	l	? m	SolidEdge
Höhe Körper	h	? m	SolidEdge
Trägheitsmoment Ball	I_S	0,0013 kgm^2	Berechnet
Trägheitsmoment Rotor	I_M	3.8e-8 kgm^2	Datenblatt
Trägheitsmoment omnidirektionales Rad	I_{OW}	2,34e-5 kgm^2	Berechnet
Trägheitsmoment virtuelles Rad (yz-Ebene)	$I_{W,yz}$	0.00357 kgm^2	Berechnet
Trägheitsmoment virtuelles Rad (xz-Ebene)	$I_{W,xz}$	0.00357 kgm^2	Berechnet
Trägheitsmoment virtuelles Rad (xy-Ebene)	$I_{W,xy}$	0.0143 kgm^2	Berechnet
Trägheitsmoment Körper (yz-Ebene)	$I_{B,yz}$	0.0880 kgm^2	SolidEdge
Trägheitsmoment Körper (xz-Ebene)	$I_{B,xz}$	0.0880 kgm^2	SolidEdge
Trägheitsmoment Körper (xy-Ebene)	$I_{B,xy}$	0.0070 kgm^2	SolidEdge
Übersetzungsverhältnis	i	353,5	Datenblatt
Erdbeschleunigung	g	9,81 $\frac{m}{s^2}$	Datenblatt

Literaturverzeichnis