

Fabian Heuer

Flachheitsbasierte Trajektorienplanung und Vorsteuerung in kartesischen Koordinaten für einen redundanten Roboterarm

Masterarbeit

Stand: Juni 2019

© Lehrstuhl für Regelungstechnik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Fabian Heuer

Flachheitsbasierte Trajektorienplanung und Vorsteuerung in kartesischen Koordinaten für einen redundanten Roboterarm

Masterarbeit

Prüfer: Prof. Dr.-Ing habil Thomas Meurer, M.Sc. Manuel Amersdorffer
Abgabedatum: 19.06.2019

Diese Arbeit ist eine Prüfungsarbeit. Anderweitige Verwendung und die Weitergabe an Dritte ist nur mit Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Abstract und Kurzfassung	1
1 Einleitung	3
2 Kinematisches Model	5
2.1 Arbeits-, Konfigurations- und Gelenksraum	5
2.2 Denavit-Hartenberg Transformation	6
2.3 Inverse Kinematik	8
2.3.1 Globale Konfiguration und Armwinkel	8
A Überschrift	11
Literaturverzeichnis	13

Abstract und Kurzfassung

Abstract

English version ... approx. $\frac{1}{2}$ page

Kurzfassung

Deutsche Version ... ca. $\frac{1}{2}$ Seite

Kapitel 1

Einleitung

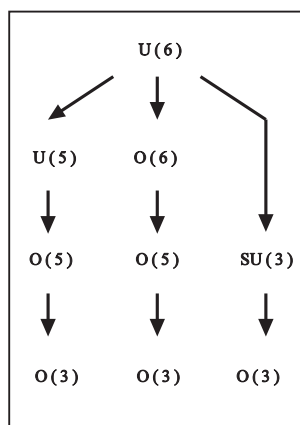


Abb. 1.1: Die Bildunterschrift sollte eine sinnvolle Erläuterung der Darstellung geben und ist immer mit einem Satzpunkt abzuschließen.

Kapitel 2

Kinematisches Model

Im folgenden Kapitel wird das kinematische Model des KUKA LBR iiwa anhand der geometrischen sowie mechanischen Struktur hergeleitet. Der Roboter kann als offene kinematische Kette aus Starrkörpern, welche durch Schub- oder Drehgelenke miteinander verbunden sind [1]. Zur Beschreibung des Endeffektors in kartesischen Koordinaten wird eine Transformation vom Arbeitsraum in den Gelenkraum benötigt. Zur einheitlichen Definition der kartesischen Achsen x, y, z wird die Denavit-Hartenberg-Konvention verwendet.

2.1 Arbeits-, Konfigurations- und Gelenkraum

Ein anthropomorpher Roboter spannt einen kugelförmigen, dreidimensionalen Arbeitsraum $\mathcal{A} = \mathbb{R}^3$, welcher durch das Basis-Koordinatensystem $[x_b, y_b, z_b]^T$ beschrieben wird, auf. Der Konfigurationsraum enthält im Gegenteil zum Arbeitsraum nicht nur die erreichbare Position $p_b^e = [x_b^e, y_b^e, z_b^e]^T$ des Endeffektors im Basis-Koordinatensystem, sondern auch die Orientierung $\phi_b^e = [\varphi_b^e, \vartheta_b^e, \psi_b^e]^T$. Folglich führt die Darstellung im Konfigurationsraum zu

$$x_b^e = \begin{bmatrix} p_b^e \\ \phi_b^e \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Die Darstellung der Rotation vom Endeffektor- in das Basis-Koordinatensystem mittels der Euler-Winkel φ_b^e, θ_b^e und ψ_b^e ist die minimale Form der Orientierungsdarstellung. Durch diese Darstellung können Singularitäten dadurch entstehen, dass zwei der drei Drehachsen parallel zueinander liegen, wodurch das System einen Freiheitsgrad weniger besitzt. Dies wird vermieden, indem die Darstellung durch Einheits-Quaternionen hinzugezogen wird. Die Euler-Winkel

$$\phi_b^e = \arctan \left(\frac{R_{2,3}}{R_{1,3}} \right) \quad (2.2)$$

$$\vartheta_b^e = \arctan \left(\frac{\sqrt{R_{2,3}^2 + R_{1,3}^2}}{R_{3,3}} \right) \quad (2.3)$$

$$\psi_b^e = \arctan \left(\frac{R_{3,2}}{-R_{3,1}} \right) \quad (2.4)$$

können aus der Rotationsmatrix ausgerechnet werden.

Der Gelenksraum $\mathcal{G} = \mathbb{R}^n$ wird durch die n Gelenke aufgespannt. Für den KUKA LBR iiwa beträgt $n = 7$, wobei der Vektor $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T$ die Winkel jedes der sieben Dreh-Gelenke enthält, welcher die Rotation um die z_i -Achse des jeweiligen Gelenks-Koordinatensystem 0_i , mit $i \in 1, \dots, n$ beschreibt. Dies wird Gelenkskonfiguration bezeichnet. Der erreichbare Gelenksraum \mathcal{G}^e stellt dabei eine Einschränkung von \mathcal{G} durch die eingeschränkte Rotation der Gelenke. Daraus folgt

$$\mathcal{G}^e = \{\mathbf{q} \in \mathcal{G} \mid q_{i,min} < q_i < q_{i,max}, \quad \forall i \in 1, \dots, n\}. \quad (2.5)$$

Die direkte Kinematik $\mathbf{k} : \mathcal{G}^e \rightarrow \mathcal{A}$ bildet den Gelenksraum auf den euklidischen Raum ab. Die kartesischen Koordinaten können somit durch

$$\mathbf{x} = \mathbf{k}(\mathbf{q}) \quad (2.6)$$

berechnet werden.

2.2 Denavit-Hartenberg Transformation

Für die Denavit-Hartenberg Transformation, im Folgenden DH-Parameter, wird zwischen den klassischen und den modifizierten DH-Parametern differenziert. Diese unterscheiden sich in der Reihenfolge der translatorischen und rotatorischen Bewegung bezüglich der x und z -Achse. Für die klassischen DH-Parameter wird zuerst die Rotation und Translation um die z_{i-1} -Achse und danach die Translation und Rotation um die x_i -Achse. Im Folgenden werden die klassischen DH-Parameter berücksichtigt.

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	d_{bs}	θ_1
2	0	$\pi/2$	0	θ_2
3	0	$\pi/2$	d_{se}	θ_3
4	0	$-\pi/2$	0	θ_4
5	0	$-\pi/2$	d_{ew}	θ_5
6	0	$\pi/2$	0	θ_6
7	0	0	d_{wf}	θ_7

Tabelle 2.1: Klassische Denavit-Hardenberg Parameter für den KUKA LBR iiwa, wobei d_{bs} die Distanz zwischen der Basis und Schulter, d_{se} zwischen Schulter und Ellenbogen, d_{ew} zwischen Ellenbogen und Handgelenk und d_{wf} zwischen Handgelenk und Werkzeug ist.

Die DH-Parameter des KUKA LBR iiwa sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Die translatorischen Verschiebung in x_i -Richtung ist für alle Gelenke gleich null, da die Links nur mittels Drehgelenken miteinander verbunden sind. Die homogene Transformation

$$H_0^e = \begin{bmatrix} R_0^e & d_0^e \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad R_0^e \in SO(3) \quad (2.7)$$

beschreibt die Transformation vom Endeffektor- ins Basis-Koordinatensystem, wobei R_0^e die Rotation und d_0^e die Translation darstellen. Mit der Rotationsmatrizen Rot_{z_i} und Rot_{x_i} um die z_{i-1} - und x_i -Achse, der translatorische Verschiebungen $Trans_{z_i}$ und $Trans_{x_i}$

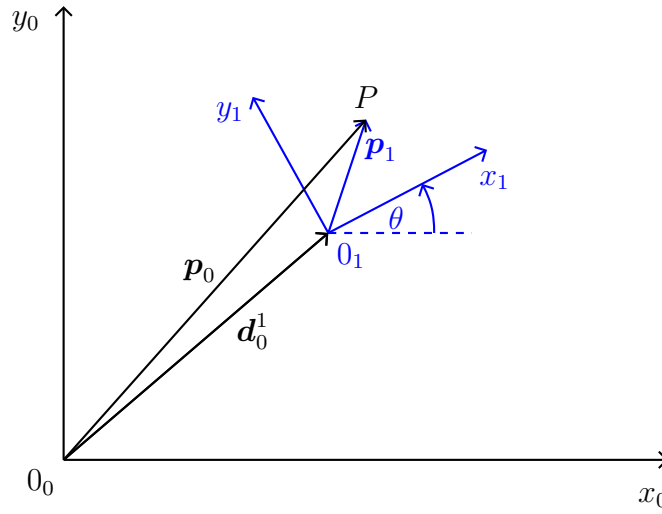


Abb. 2.1: Die Bildunterschrift sollte eine sinnvolle Erläuterung der Darstellung geben und ist immer mit einem Satzpunkt abzuschließen.

$$Rot_{zi} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Trans_{zi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

$$Rot_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Trans_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

kann die Transformation vom i -ten in das $i - 1$ -te Koordinatensystem folgendermaßen

$$H_i^{i-1} = Rot_{zi} Trans_{zi} Trans_{xi} Rot_{xi} \quad (2.10)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i - \sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cos \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i - \sin \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

dargestellt werden. Für den KUKA LBR iiwa mit sieben Gelenken gilt die Abbildung

$$H_0^7 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 H_3^4 H_4^5 H_5^6 H_6^7. \quad (2.12)$$

Zur Bestimmung der Transformation

$$H_b^e = H_b^0 H_0^7 H_7^e \quad (2.13)$$

ist die Vereinfachung

$$H_b^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_7^e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{end} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

zu wählen, da das Basis-Koordinatensystem im 0-ten Koordinatensystem liegt und der Endeffektor in der z_7 -Achse liegt.

2.3 Inverse Kinematik

Die inverse Kinematik beschreibt die Abbildung des Arbeitsraum auf den erreichbaren Gelenksraum $\mathbf{k}^{-1} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{G}$. Die Gelenkskoordinaten können durch

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}^{-1}(\mathbf{x}) \quad (2.15)$$

ermittelt werden. Die Lösung der inversen Kinematik \mathbf{k}^{-1} ist nicht für alle Fälle eindeutig, da der KUKA LBR iiwa sieben Freiheitsgrade besitzt, jedoch für die Position x_b^e nur sechs Freiheitsgrade benötigt werden.

2.3.1 Globale Konfiguration und Armwinkel

Zur eindeutigen Bestimmung der inversen Kinematik muss die globale Konfiguration GK sowie der redundante Armwinkel γ definiert werden. Die globale Konfiguration GK besteht aus drei Variablen, welche die Position der Schulter (GK_2), des Ellenbogens (GK_4) sowie des Handgelenks (GK_6) definiert. Daraus folgt

$$GK_i = \begin{cases} 1, & \text{für } \theta_i > 0 \\ -1, & \text{für } \theta_i < 0 \end{cases}, \forall i \in 2, 4, 6 \quad (2.16)$$

was dem menschlichen Arm nachempfundenen Positionen Schulter links/rechts, Ellenbogen oben/unten und Handgelenk innen/außen entspricht. Der redundante Armwinkel γ wird, wie in Abbildung 2.2 durch die SE^vW -Ebene, definiert. Die Position des virtuellen Ellenbogens wird durch $\theta_3^v = 0$ erreicht, wodurch eine eindeutige Darstellung des Armwinkels γ ohne Singularitäten entsteht [2]. Zur Bestimmung von γ wird die globale Konfiguration vorausgesetzt, da die Konfiguration des Ellenbogens zwischen realen und virtuellen Manipulators unterscheiden können.

Die Position x_b^e wird durch die homogene Transformation H_b^e vorgegeben, welche die Position $\mathbf{p}_b^e \in \mathbb{R}^3$ und den Rotationsanteil $R_b^e \in SO(3)$. Die Vektoren zwischen den Gelenken sind durch

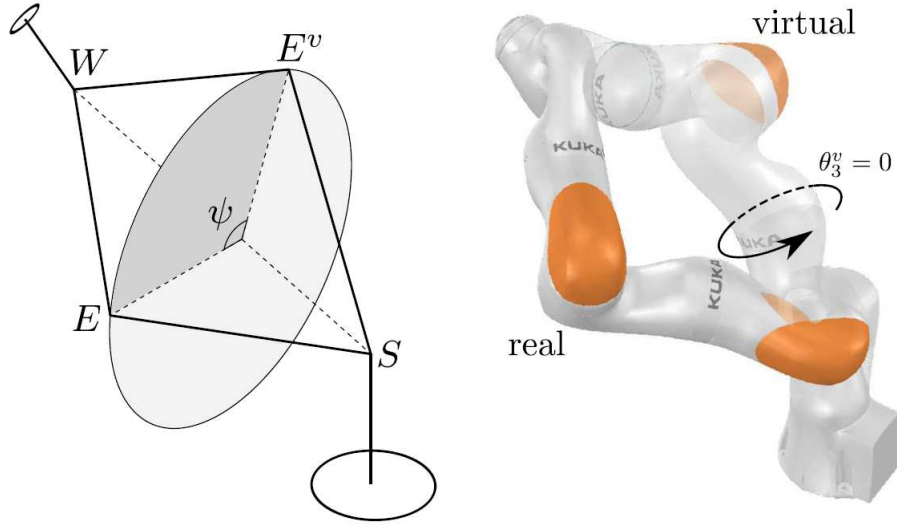


Abb. 2.2: Der reale Manipulator kann die gewünschte Endeffektor Position in unterschiedlichen Positionen annehmen. Der virtuelle Manipulator wird durch $\theta_3^v = 0$ auf sechs Freiheitsgrade reduziert, wodurch für eine globale Konfiguration nur eine Position die gewünschte Endeffektor-Position erreicht. Durch den Unterschied des virtuellen und realen Ellenbogens entsteht ein Winkel γ bei der Projektion auf die Schulter-Handgelenks-Geraden.

$$\mathbf{p}_b^2 = [0 \ 0 \ d_{bs}]^T \quad (2.17)$$

$$\mathbf{p}_2^4 = [0 \ d_{se} \ 0]^T \quad (2.18)$$

$$\mathbf{p}_4^6 = [0 \ 0 \ d_{ew}]^T \quad (2.19)$$

$$\mathbf{p}_6^e = [0 \ 0 \ d_{wf}]^T \quad (2.20)$$

definiert. Zuerst wird der virtuelle Winkel θ_4^v berechnet, wozu nur die geometrische Struktur und der Schulter-Handgelenk-Vektor benötigt wird. Dieser kann wiederum mit der Position x_b^e durch

$$\mathbf{p}_2^6 = \mathbf{p}_0^7 - \mathbf{p}_0^2 - (R_0^7 \mathbf{p}_6^7) \quad (2.21)$$

berechnet werden. Damit folgt

$$\theta_4^v = GK_4 \arccos \left(\frac{|\mathbf{p}_2^6|^2 - d_{se}^2 - d_{ew}^2}{2d_{se}d_{ew}} \right) \quad (2.22)$$

Sofern $\theta_3^v = 0$ gilt, liegen der Schulter-Ellenbogen Vektor \mathbf{p}_2^4 sowie der Ellenbogen-Handgelenk Vektor \mathbf{p}_4^6 in der xy -Ebene auf einer Geraden, sodass der Winkel θ_1^v dafür verantwortlich ist, wie der Vektor \mathbf{p}_2^6 ausgerichtet ist. Im Fall, dass \mathbf{p}_2^6 in der z_1 -Achse liegt, würde eine Singularität auftreten, sodass folgende Fallunterscheidung

$$\theta_1^v = \begin{cases} \text{atan2}(\mathbf{p}_2^6) \end{cases} \quad (2.23)$$

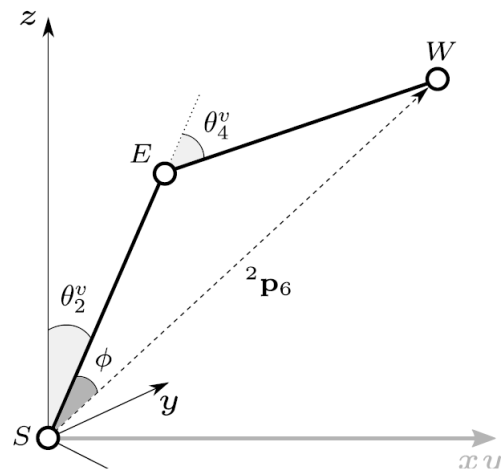


Abb. 2.3: Darstellung der Schulter, des Ellenbogens und dem Handgelenk zur Bestimmung von θ_4^v und θ_2^v .

Anhang A

Überschrift

Falls notwendig ergänzen ...

Literaturverzeichnis

1. Siciliano B, Sciavicco L, Villani L, Oriolo G (2008) Robotics: Modelling, Planning and Control, 1st edn. Springer Publishing Company, Incorporated
2. Zhou D, Ji L, Zhang Q, Wei X (2015) Practical analytical inverse kinematic approach for 7-dof space manipulators with joint and attitude limits. *Intell Serv Robot* pp 215–224

Erklärung

Ich versichere, dass ich die Masterarbeit

Flachheitsbasierte Trajektorienplanung und Vorsteuerung in kartesischen Koordinaten für einen redundanten Roboterarm

selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe und dass ich alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen, wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen, meiner Arbeit besonders gekennzeichnet und die entsprechenden Quellen angegeben habe.

Mir ist bekannt, dass die unter Anleitung entstandene Masterarbeit, vorbehaltlich anders lautender Vereinbarungen, eine Gruppenleistung darstellt und in die Gesamtforschung der betreuenden Institution eingebunden ist. Daher darf keiner der Miturheber (z.B. Texturheber, gestaltender Projektmitarbeiter, mitwirkender Betreuer) ohne (schriftliches) Einverständnis aller Beteiligten, aufgrund ihrer Urheberrechte, auch Passagen der Arbeit weder kommerziell nutzen noch Dritten zugänglich machen. Insbesondere ist das Arbeitnehmererfindergesetz zu berücksichtigen, in dem eine Vorveröffentlichung patentrelevanter Inhalte verboten wird.

Kiel, 19.06.2019

Fabian Heuer