

Seminararbeit

Verbesserung der Pfad- und Trajektorienplanung am UR5

Vorgelegt von:	Nik Julin Nowoczyn
Matrikelnummer:	8529776
Studiengang:	Ingenieurinformatik
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp
Betreuer:	Ludwig Vogt
Ausgabedatum:	01. 10. 2022
Abgabedatum:	31. 03. 2023

Aufgabenstellung

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	I
Kurzfassung	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Räumliche Beschreibung (optional ??)	1
1.1 Koordinatensysteme	1
1.2 Translation	1
1.3 Rotation	1
1.4 Homogene Transformationsmatrix	1
2 Direkte Kinematik	3
2.1 DH-Konvention	3
2.2 Unified Robot Description Format	6
2.3 Beschreibung des UR5	6
2.4 Geschwindigkeitskinematik	7
3 Inverse Kinematik	9
3.1 Analytische Lösung	9
3.2 Geometrische Lösung	9
3.3 Singularitäten	15
4 Pfadplanung	17
4.1 Konfigurationsraum	17
4.2 Berechnungsmethoden	18
4.2.1 Kürzester Weg	18
4.2.2 Zellendekomposition	18
4.2.3 Sampling-Verfahren	19
4.3 Constraints und Praxisbezug	20
5 Trajektorienplanung	21
5.1 Profile	21

5.2	Synchronität	21
5.3	Mehrsegment-Trajektorien	21
6	Fazit und Ausblick	23
	Literatur	25

Abbildungsverzeichnis

2.1	Denavit-Hartenberg-Konvention (DH-Konvention) zwischen zwei Gelenken [4]	5
2.2	Achsen des UR5-Roboters mit Angabe der DH-Parameter (links) und Visualisierung der Nullposition (rechts) [5]	7
3.1	Berechnung von θ_1 , Betrachtung von Gelenk eins bis fünf [5]	11
3.2	Berechnung von θ_5 , Betrachtung von allen Gelenken [5]	11
3.3	Berechnung von θ_6 mit Sphärischen Koordinaten, für Koordinatensystembeschreibung siehe Abbildung 2.2 [5]	12
3.4	Berechnung von θ_4 durch Vereinfachung als zweidimensionales System und Bestimmung der Transformation zwischen Gelenk 1 und Gelenk 4 [5]	13

Tabellenverzeichnis

2.1	DH-Parameter des UR5e Roboters von Universal Robots [7]	7
2.2	Beschreibung der dynamischen Eigenschaften des UR5e Roboters von Universal Robots [7]	8

Abkürzungsverzeichnis

DH-Konvention Denavit-Hartenberg-Konvention

URDF Unified Robot Description Format

ROS das Robot Operating System

RRT Rapidly Exploring Random Tree

1 Räumliche Beschreibung (optional ??)

ggf kürzen und/oder am Ende ergänzen ??

1.1 Koordinatensysteme

1.2 Translation

1.3 Rotation

Euler / current frame, Fixed Frame, Axis-Angle, Quaternion

1.4 Homogene Transformationsmatrix

2 Direkte Kinematik

Die direkte Kinematik ist dafür verantwortlich aus den verschiedenen Winkeln und Positionen der Gelenke die Rotation und Position des Endeffektors im Raum zu berechnen. Dazu wird zunächst in jedem Gelenk ein Koordinatenursprung gelegt, der eine Nullstellung jedes Gelenks beschreibt. Um alle Gelenke in einer kinematischen Kette abzubilden, kann mit einem Parameter in den Freiheitsgraden des entsprechenden Gelenks eine Rechenvorschrift aufgebaut werden, um den Roboter zu beschreiben und die Position des Endeffektors schnell bestimmen zu können.

Zur Beschreibung von Transformationen wird in dieser Arbeit auf die Homogene Transformationsmatrix zurückgegriffen. Diese besteht aus einer Rotationsmatrix $R_{a,b}$, die die Rotation von System a in System b beschreibt und einem Translationsvektor $P_{a,b}$, der die Translation zwischen den zwei Systemen entspricht [1, S. 28]. Um eine Inverse Transformation von System b in System a zu erhalten, kann die Inverse der Transformationsmatrix $T_{a,b}$ oder die Regel aus Gleichung 2.2 verwendet werden. Bei der Multiplikation zweier geeigneter Matrizen können mehrere Transformationen in einer Matrix dargestellt werden. Ein Beispiel hierfür findet sich in Gleichung 2.3.

?? verschieben in Abschnitt 1.4 ??

$$T_{a,b} = \begin{bmatrix} R_{a,b} & P_{a,b} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$T_{b,a} = (T_{a,b})^{-1} = \begin{bmatrix} R_{b,a} & -R_{b,a}P_{a,b} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$T_{a,b} \cdot T_{b,c} = T_{a,c} \quad (2.3)$$

2.1 DH-Konvention

?? Quelle

Die Konvention, die in der Regel verwendet wird, um Rotation und Translation eines Gliedes der kinematischen Kette darzustellen ist die sog. DH-Konvention oder DH-Transformation. DH-Konvention beschreibt, wie die Koordinatensysteme basieren auf dem vorherigen Koordinatensystem beschrieben werden [2, 1]. Um nun ausgehend von Gelenk $n - 1$ das Koordinatensystem von Gelenk n zu beschreiben, müssen die folgenden Regeln befolgt werden:

1. Achse z_n liegt entlang der Bewegungsachse des Gelenks n
2. Achse x_n liegt auf der kürzesten Verbindung zwischen Achsen z_{n-1} und z_n .
3. Die y_n Achse wird rechtshändig ergänzt.

Dabei sind die Ursprünge der Gelenkkordinatensysteme oftmals nicht im Gelenksprung, was Komplexität für die Berechnung von Transformationen verringert. Aus der Beziehung der zwei Koordinatensysteme können die DH-Parameter abgeleitet werden (siehe auch Abbildung 2.1):

- θ_n Winkel zwischen x_{n-1} und x_n mit Rotationsachse z_{n-1}
- d_n : Kleinster Abstand zwischen x_{n-1} und x_n
- a_n : Abstand zwischen den Achsen z_{n-1} und z_n
- α_n Winkel zwischen z_{n-1} und z_n mit Rotationsachse x_n

Dies entspricht den folgenden Transformationsmatrizen (Gleichungen 2.4, 2.5, 2.6, 2.7):

$$T_{\theta_n} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$T_{d_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$T_{a_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$T_{\alpha_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_n) & -\sin(\alpha_n) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Um nun Koordinatensystem $n - 1$ in Koordinatensystem n zu überführen, kann die Transformationsmatrix $T_{n-1,n}$ verwendet werden (Gleichung 2.8). Für den beweglichen Freiheitsgrad der Gelenke wird dann jeweils eine freie Variable festgelegt (θ_n für translatorische und d_n für rotatorische Gelenke).

$$T_{n-1,n}(\theta_n, d_n) := T_{\theta_n} \cdot T_{d_n} \cdot T_{a_n} \cdot T_{\alpha_n} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n) \sin(\alpha_n) & a_n \cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n) \sin(\alpha_n) & a_n \sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

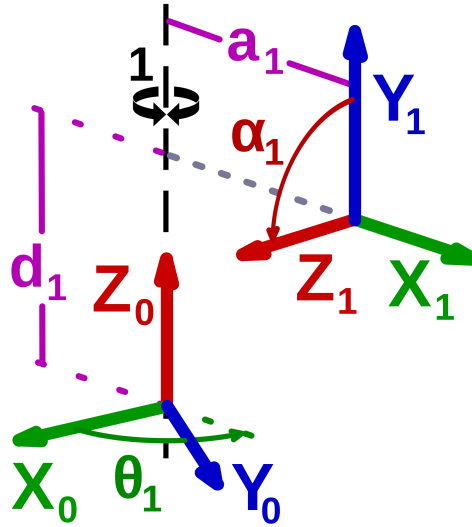


Abbildung 2.1: DH-Konvention zwischen zwei Gelenken [4]

Oftmals wird in der Literatur auch eine alternative, modifizierte Form der DH-Parameter verwendet [1, S. 75]. Um die Vergleichbarkeit mit [5] zu gewährleisten wird in der Rechnung sowie im Code diese alternative Methode eingesetzt. Dabei verändert sich die Transformationsmatrix eines Gelenks auf die Werte aus Gleichung 2.9:

$$T_{n-1,n}(\theta_n, d_n) := \begin{bmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) & 0 & a_{n-1} \\ \sin(\theta_n) \cos(\alpha_{n-1}) & \cos(\theta_n) \cos(\alpha_{n-1}) & -\sin(\alpha_{n-1}) & -d_n \sin(\alpha_{n-1}) \\ \sin(\theta_n) \sin(\alpha_{n-1}) & \cos(\theta_n) \sin(\alpha_{n-1}) & \cos(\alpha_{n-1}) & d_n \cos(\alpha_{n-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.2 Unified Robot Description Format

Unified Robot Description Format (URDF) ist ein Standard entwickelt für das Robot Operating System (ROS), um sowohl die geometrischen als auch physische und visuelle Eigenschaften eines Roboters zu beschreiben. Für die Beschreibung ist eine auf XML basierende Datei nötig, die mit Tags geschachtelt den Roboter mithilfe von sog. „Links“ und „Joints“ beschreibt [6].

Links beschreiben die physischen Verbindungen zwischen zwei Gelenken. Dabei wird unterschieden zwischen visuellen Eigenschaften („visual“), Kollisionseigenschaften („collision“) und Trägheitseigenschaften („inertial“). Jede dieser Kategorien kann so die Geometrie des Links aus verschiedenen Perspektiven unterschiedlich beschreiben

Joints bezeichnen Gelenke, also die Verbindungen zweier Links und beschreiben die mögliche relative Bewegung zwischen diesen. Dabei sind nicht nur translatorische („prismatic“) und rotatorische Gelenke („revolute“) beschreibbar, sondern auch feste („fixed“), schwebende („floating“) und planare Verbindungen („planar“). Für die Beschreibung eines Joints wird der vorhergehende Link als „parent“ und der nächste Link als „child“ bezeichnet. Zudem müssen im Feld „origin“ Translation und Rotation des Ursprungs im Koordinatensystem des Parent Links, sowie im Feld „axis“ je nach Gelenk die Rotationsachse, Translationsachse oder Normale der Bewegungsoberfläche angegeben werden. Desweiteren ist es möglich, Schnittstellen für die Bewegung der Motoren zu definieren und Bewegungslimits für die Gelenke anzugeben, um die Ansteuerung des Roboters und die Bewegungsplanung zu vereinfachen.

Die Schritte zur Berechnung der direkten Kinematik können für das bessere Verständnis im Code ?? (Anhang referenz) direkt nachvollzogen und visualisiert werden.

2.3 Beschreibung des UR5

Der in dieser Arbeit betrachtete Roboter ist der UR5e von Universal Robots. Dieser ist ein vergleichsweise günstiger Roboter mit verringerter Zahl an Singularitäten (siehe Abschnitt 3.3), sechs Gelenken und einer offenen kinematischen Kette. Offiziell wird der Roboter mit den DH-Parametern aus Tabelle 2.1 und dynamischen Eigenschaften der Links aus Tabelle 2.2 beschrieben [7]. Abbildung 2.2 kann zudem die Dimensionierung des Roboters und die Anordnung der Achsen in Nullstellung entnommen werden.

Nach Datenblatt [8] hat der UR5 einen Arbeitsraum mit Radius 85cm (Abstand vom Befestigungspunkt bei ausgestrecktem Arm) und kann sich mit einer Maximalgeschwindigkeit von bis zu 180°/s bewegen.

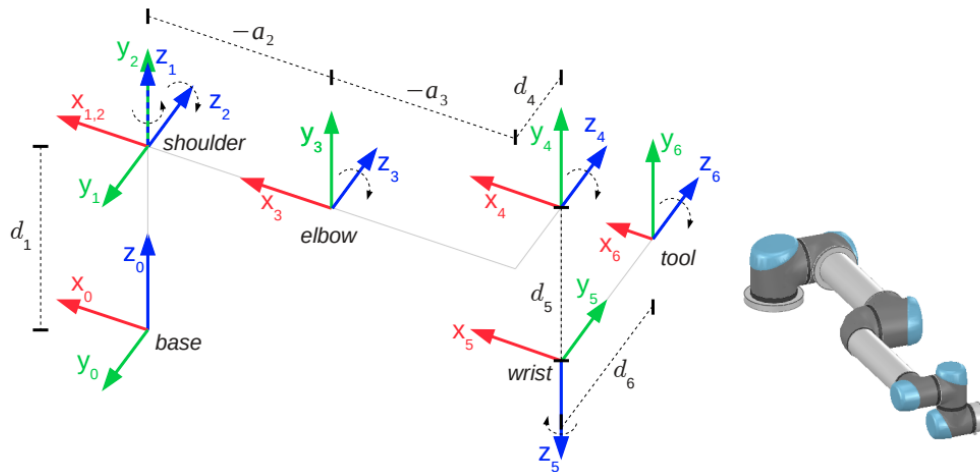


Abbildung 2.2: Achsen des UR5-Roboters mit Angabe der DH-Parameter (links) und Visualisierung der Nullposition (rechts) [5]

Tabelle 2.1: DH-Parameter des UR5e Roboters von Universal Robots [7]

Joint	θ [rad]	a [m]	d [m]	α [rad]
Joint 1	0	0	0.089159	$\pi/2$
Joint 2	0	-0.425	0	0
Joint 3	0	-0.3922	0	0
Joint 4	0	0	0.10915	$\pi/2$
Joint 5	0	0	0.09465	$-\pi/2$
Joint 6	0	0	0.0823	0

2.4 Geschwindigkeitskinematik

Um einen Roboter in Bewegung darzustellen, ist nicht nur die Transformation der Gelenke relevant, sondern auch dessen Kinematik und Dynamik. Dies ist besonders relevant, da in der echten Welt bestimmte Maximalwerte für (Winkel-) Geschwindigkeit und Beschleunigung, sowie Trägheit und Drehmoment eingehalten werden müssen, um den sicheren Betrieb sowie das Verhalten der Masse korrekt abzubilden.

Für die Berechnung der Geschwindigkeit des Endeffektors im Gelenk e kann die Jakobi-Matrix verwendet werden. Dabei gilt für eine Drehung nach DH-Konvention um Achse z_{n-1} für die Geschwindigkeit Gleichung 2.10 und für die Winkelgeschwindigkeit Gleichung 2.11. Für translatorische Gelenke gelten stattdessen Gleichungen 2.12 und 2.13. Die Vektoren z_i entsprechen jeweils der Einheitsvektor der z-Achse $z_i = \frac{Z_{0,i}}{|Z_{0,i}|}$ auf Basis der Transformationsmatrix $T_{0,i} = \prod_{n=1}^i T_{n-1,n}$ (siehe Konvention Gleichung 3.2).

Tabelle 2.2: Beschreibung der dynamischen Eigenschaften des UR5e Roboters von Universal Robots [7]

Link	Masse [kg]	Schwerpunkt [m]
Link 1	3.7	[0, -0.02561, 0.00193]
Link 2	8.393	[0.2125, 0, 0.11336]
Link 3	2.33	[0.15, 0.0, 0.0265]
Link 4	1.219	[0, -0.0018, 0.01634]
Link 5	1.219	[0, 0.0018, 0.01634]
Link 6	0.1879	[0, 0, -0.001159]

$$J_{P_n} = z_{n-1} \times (P_e - P_{n-1}) \quad (2.10)$$

$$J_{\omega_{n+1}} = z_{n-1} \quad (2.11)$$

$$J_{P_n} = z_{n-1} \quad (2.12)$$

$$J_{\omega_{n+1}} = 0 \quad (2.13)$$

Für alle Gelenke ergibt sich dann für die Jakobi-Matrix eines Sechs-Achsen-Roboters wie dem UR5 die folgende Gleichung 2.14 mit jeweils sechs Spalten und Zeilen. Um die Geschwindigkeit des Endeffektors v_6 zu erhalten, muss die Matrix mit der Geschwindigkeit $\dot{\theta}$ multipliziert werden (Gleichung 2.15).

$$J_{0,6} = \begin{pmatrix} J_{P_1} & \dots & J_{P_6} \\ J_{\omega_1} & \dots & J_{\omega_6} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$v_6 = \begin{pmatrix} \dot{P}_{0,6} \\ \omega_6 \end{pmatrix} = J_{0,6} \cdot \dot{\theta} \quad (2.15)$$

3 Inverse Kinematik

In der direkte Kinematik wird aus den Gelenkzuständen Position und Rotation des Endeffektors bestimmt. Der umgekehrte Vorgang, also das Berechnen der Gelenkpositionen bei gegebener Zieltransformation, wird als inverse Kinematik bezeichnet. Dies ist erforderlich, um Aufgaben in der Umgebung des Roboters zu lösen und die angestrebten Zielpunkte zu erreichen. Dabei muss beachtet werden, dass oft mehrere gleichwertige Lösungen für eine Zielstellung des Endeffektors vorliegen. Allerdings kann die inverse Kinematik offener Ketten oft nicht einfach direkt mithilfe einer mathematischen Formel gelöst werden (siehe Abschnitt 3.1). Im Fall des UR5, ist dies allerdings in den meisten Fällen möglich.

Die Lösung des Problems kann geometrisch, analytisch oder numerisch gelöst werden. Auf die ersten beiden Lösungsmöglichkeiten wird im Folgenden näher eingegangen.

3.1 Analytische Lösung

Für eine direkte Lösung muss zunächst die Formel aus Gleichung 2.8 oder 2.9 herangezogen werden. Nach Multiplikation der Transformationsmatrizen müsste die entstehende Gleichung 3.1 nach den freien Variablen θ_1 bis θ_n bzw. d_1 bis d_n aufgelöst werden. Da aufgrund der rotatorischen Gelenke nichtlineare trigonometrische Funktionen verwendet werden, ist diese Funktion bei Industrierobotern überwiegend nichtlinear und in vielen Fällen auch nicht lösbar.

$$T_{0,n}(\vec{q}) = \prod_{i=1}^n T_{i-1,i}(q_i) \quad (3.1)$$

3.2 Geometrische Lösung

Um die Berechnung zu vereinfachen, wird oftmals in den äußeren drei Gelenken eines Sechсарoboters ein Handwurzelgelenk eingeführt, in dem sich die Achsgeraden dieser Gelenke schneiden. Da die Drehung des sogenannten Handgelenks die Position des Handwurzelgelenkes nicht verändert, kann so zuerst die Berechnung der Position des Handwurzelgelenkes mithilfe der Zieltransformation und im Anschluss unabhängig die Berechnung der restlichen Gelenke stattfinden. Dieser Trick ist allerdings im UR5 nicht

verwendbar, da hier wohl aufgrund der größeren Zahl an Singularitäten dieser Technik (siehe Abschnitt 3.3) auf die Verwendung eines Handwurzepunkts verzichtet wurde.

Dennoch kann durch eine Analyse der geometrischen Eigenschaften und der geringen Zahl der Singularitäten des UR5 eine Lösung von \vec{q} bzw. $\vec{\theta}$ gefunden werden. Die Strategie hierbei ist, beim ersten Gelenk zu beginnen und nach und nach die anderen Gelenke mit der Transformation $T_{0,6}$ des Endeffektors zu verknüpfen. Bekannt sind zu Beginn der Rechnung nur die DH-Parameter $(\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i)$ jedes Gelenks i im Ausgangszustand, wobei θ_i als freie Variable jedes Gelenks betrachtet wird (Abschnitt 2.3), sowie die Transformation des Endeffektors $T_{0,6}$. Eine detailliertere Rechnung kann [5] und [3] entnommen werden.

In der folgenden Rechnung gilt stets die untenstehende Konvention aus [1, S. 82] für eine beliebige Transformation $T_{a,b}$ von einem System a in ein System b (Gleichung 3.2), sowie die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Rechenregeln für Transformationsmatrizen:

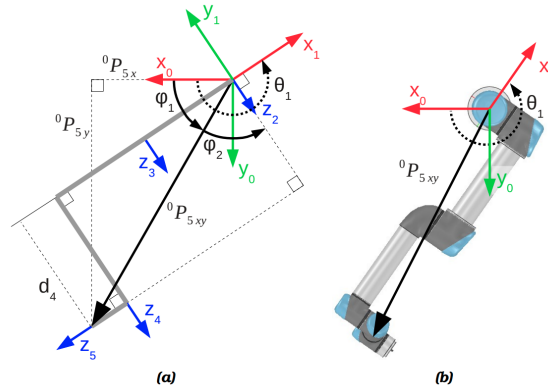
$$T_{a,b} = \begin{bmatrix} X_{a,b} & Y_{a,b} & Z_{a,b} & P_{a,b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{a,bx} & Y_{a,bx} & Z_{a,bx} & P_{a,bx} \\ X_{a,by} & Y_{a,by} & Z_{a,by} & P_{a,by} \\ X_{a,bz} & Y_{a,bz} & Z_{a,bz} & P_{a,bz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

1. Gelenk eins (Basis)

Zunächst wird der Ausgangspunkt $P_{0,5}$ von Gelenk 5 berechnet (Gleichung 3.3 [5, S. 4]) und im Anschluss trigonometrisch Winkel θ_1 bestimmt (Gleichung 3.4 sowie Abbildung 3.1). Dabei entstehen zwei Lösungen, die die Schulter des Roboters entweder links oder Rechts vom Ursprung platzieren.

$$P_{0,5} = T_{0,6} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\theta_1 = \arctan2(P_{0,5y}, P_{0,5x}) \pm \arccos\left(\frac{d_4}{\sqrt{P_{0,5x}^2 + P_{0,5y}^2}}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (3.4)$$

Abbildung 3.1: Berechnung von θ_1 , Betrachtung von Gelenk eins bis fünf [5]

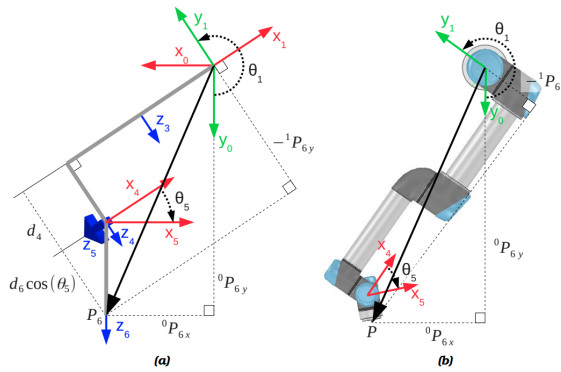
2. Gelenk fünf (oberes Handgelenk)

Im Anschluss kann θ_5 bestimmt werden, da der y-Teil der Position von Gelenk 6 relativ zu Gelenk 1 ($P_{1,6y}$) nur mithilfe von θ_5 und bereits bekannter Parameter $P_{0,6}$, θ_1 und der DH-Parameter berechnet werden kann (siehe Abbildung 3.2). Aus dieser Erkenntnis ergibt sich Gleichung 3.5 $P_{1,6y}$ erhält man durch die Rotation des Ursprungssystems $T_{0,6}$ um die z_1 -Achse (Gleichung 3.6). In Kombination erhält man die Gleichung für θ_5 (Gleichung 3.7). Dabei entstehen wiederum zwei Lösungen, die jeweils das Handgelenk ober- oder unterhalb des Arms platzieren.

$$-P_{1,6y} = d_4 + d_6 \cdot \cos(\theta_5) \quad (3.5)$$

$$P_{1,6y} = -P_{0,6x} \cdot \sin(\theta_1) + P_{0,6y} \cdot \cos(\theta_1) \quad (3.6)$$

$$\theta_5 = \pm \arccos \left(\frac{P_{0,6x} \cdot \sin \theta_1 - P_{0,6y} \cdot \cos \theta_1 - d_4}{d_6} \right) \quad (3.7)$$

Abbildung 3.2: Berechnung von θ_5 , Betrachtung von allen Gelenken [5]

3. Gelenk sechs (Endeffektor)

Nach θ_1 und θ_5 wird θ_6 bestimmt. Dazu wird die Eigenschaft des UR5 herangezogen, die Z-Achsen von Gelenken zwei, drei und vier liegt stets parallel zur Y-Achse von Gelenk 1 stehen (siehe Abbildung 2.2). Deshalb kann die Y-Achse y_1 beschrieben von Gelenk sechs ($Y_{6,1}$) unabhängig von $\theta_{1,2,3,4}$ und kann mithilfe von sphärischen Koordinaten als $-Y_{6,1}(-\theta_6, \theta_5)$ ($-\theta_5$ als Azimuth sowie θ_6 als polaren Winkel) aufgefasst werden (Abbildung 3.3). Eine Umrechnung in kartesische Koordinaten ergibt deshalb Gleichung 3.8, wobei $Y_{6,1}$ mithilfe einer Drehung um θ_1 um z_1 beschrieben werden kann (Gleichung 3.9). Z und X sind hierbei jeweils Einheitsvektoren der Z- und X-Achse des jeweiligen Koordinatensystems. Nach Gleichsetzen der x- und y-Einträge der beiden Gleichungen und anschließendem Umformen erhält man θ_6 (Gleichung 3.10). Dabei kann es genau eine Lösung geben. Falls $\sin \theta_5 = 0$, liegt eine Singularität vor und eine Lösung kann nicht bestimmt werden. Dies tritt auf, wenn neben den Achsen z_2, z_3 und z_4 auch Achse z_6 parallel steht. In diesem Fall kann eine beliebige Lösung gewählt werden, im Regelfall wird $\theta_6 = 0$ gesetzt.

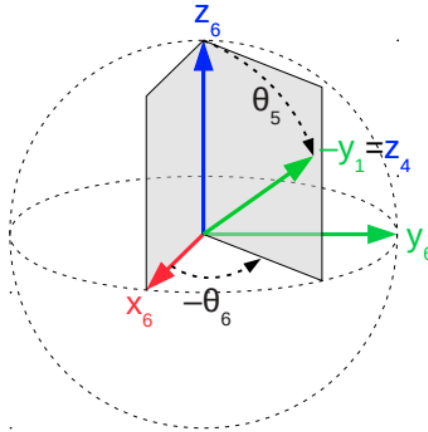


Abbildung 3.3: Berechnung von θ_6 mit Sphärischen Koordinaten, für Koordinatensystembeschreibung siehe Abbildung 2.2 [5]

$$Y_{6,1} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_5 \cdot \cos \theta_6 \\ \sin \theta_5 \cdot \sin \theta_6 \\ -\cos \theta_5 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$Y_{6,1} = -\sin \theta_1 \cdot X_{6,0} + \cos \theta_1 \cdot Y_{6,0} \quad (3.9)$$

$$\theta_6 = \arctan2 \left(\frac{-X_{6,0y} \cdot \sin \theta_1 + Y_{6,0y} \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_5}, \frac{X_{6,0x} \cdot \sin \theta_1 - Y_{6,0x} \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_5} \right) \quad (3.10)$$

4. Gelenk drei (Ellenbogen)

Die verbleibenden drei Gelenke haben alle parallele Achsen und lassen sich dadurch zu einem zweidimensionalen System vereinfachen (siehe Abbildung 3.4, rechts). Um θ_3 zu berechnen kann der Winkel ϕ_3 zu Hilfe genommen werden (siehe Gleichung 3.11). Die Werte a_2 , a_3 sind dabei die DH-Parameter der jeweiligen Gelenke und $|P_{1,4xz}|$ ist der Abstand zwischen Gelenk 1 und Gelenk 4, dessen relative Position bereits bekannt ist. Aufgrund der Geometrie gilt: $|P_{1,4xz}| \in |a_2 \pm a_3|$. Nach der Anwendung des arccos erhält man in der Regel zwei Lösungen, die der Position „Elbow Up“ und „Elbow Down“ entsprechen (Gleichung 3.12).

$$\cos(\theta_3) = -\cos(\phi_3) = \frac{a_2^2 + a_3^2 - |P_{1,4xz}|^2}{2a_2a_3} \quad (3.11)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - |P_{1,4xz}|^2}{2a_2a_3}\right) \quad (3.12)$$

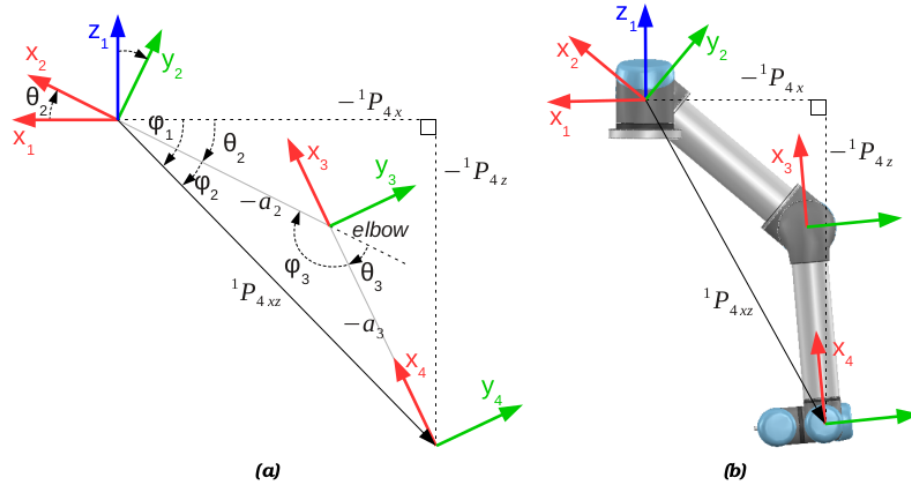


Abbildung 3.4: Berechnung von θ_4 durch Vereinfachung als zweidimensionales System und Bestimmung der Transformation zwischen Gelenk 1 und Gelenk 4 [5]

5. Gelenk zwei (Schulter)

θ_2 kann mithilfe von Abbildung 3.4 ($\theta_2 = \phi_1 - \phi_2$), sowie Gleichung 3.13 und 3.14 bestimmt werden. Nach der Substitution von $\phi_3 = \sin(\pi - \theta_3) = \sin(\theta_3)$ erhält man

eine Lösung für θ_2 (Gleichung 3.15).

$$\phi_1 = \arctan2(-P_{1,4z}, -P_{1,4x}) \quad (3.13)$$

$$\phi_2 = \arcsin\left(\frac{-a_3 \cdot \sin \phi_3}{|P_{1,4xz}|}\right) \quad (3.14)$$

$$\theta_2 = \phi_1 - \phi_2 = \arctan2(-P_{1,4z}, -P_{1,4x}) - \arcsin\left(\frac{-a_3 \cdot \sin \theta_3}{|P_{1,4xz}|}\right) \quad (3.15)$$

6. Gelenk vier (unteres Handgelenk)

Der Winkel des letzten Gelenks ist definiert als der Winkel zwischen den Achsen x_3 und x_4 um Rotationsachse z_4 (siehe Definition DH-Parameter, Abschnitt 2.1). Da alle anderen Winkel bereits bekannt sind, kann der letzte Winkel der ersten Spalte $X_{3,4}$ der Transformationsmatrix $T_{3,4}$ entnommen werden. Mit den ersten beiden Werten dieser Spalte, $X_{3,4x}$ und $X_{3,4y}$, erhält man den Wert von θ_4 (Gleichung 3.16)

$$\theta_4 = \arctan2(X_{3,4y}, X_{3,4x}) \quad (3.16)$$

Zusammenfassung

Mithilfe der Gleichungen 3.17 bis 3.22 kann die Inverse Kinematik eines UR5-Roboters direkt bestimmt werden. Dabei existieren in der Regel acht mögliche Lösungen, jeweils eine für die Gelenke sechs (Endeffektor), zwei (Schulter) und vier (unteres Handgelenk) und jeweils zwei für die Gelenke eins (Basis), drei (Ellenbogen) und fünf (oberes Handgelenk). Falls die Achsen z_2 , z_3 , z_4 und z_6 parallel stehen, kann θ_6 beliebig gewählt werden, sodass eine Singularität mit beliebig vielen Lösungen vorliegt. Neben den DH-Parametern und der gewünschten Transformation des Endeffektors muss für Gleichung 3.17 $P_{0,5}$ (Gleichung 3.1), für Gleichung 3.19 die Transformation T_{60} , für Gleichung 3.20 und 3.20 die Transformation T_{14} und für Gleichung 3.22 die Transformation $T_{3,4}$ mit der Regeln aus Gleichungen 2.1, 2.2 und 2.3 bestimmt werden.

$$\theta_1 = \arctan2(P_{0,5y}, P_{0,5x}) \pm \arccos\left(\frac{d_4}{\sqrt{P_{0,5x}^2 + P_{0,5y}^2}}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (3.17)$$

$$\theta_5 = \pm \arccos\left(\frac{P_{0,6x} \cdot \sin \theta_1 - P_{0,6y} \cdot \cos \theta_1 - d_4}{d_6}\right) \quad (3.18)$$

$$\theta_6 = \arctan2\left(\frac{-X_{6,0y} \cdot \sin \theta_1 + Y_{6,0y} \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_5}, \frac{X_{6,0x} \cdot \sin \theta_1 - Y_{6,0x} \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_5}\right) \quad (3.19)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos \left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - |P_{1,4xz}|^2}{2a_2a_3} \right) \quad (3.20)$$

$$\theta_2 = \phi_1 - \phi_2 = \arctan2(-P_{1,4z}, -P_{1,4x}) - \arcsin \left(\frac{-a_3 \cdot \sin \theta_3}{|P_{1,4xz}|} \right) \quad (3.21)$$

$$\theta_4 = \arctan2(X_{3,4y}, X_{3,4x}) \quad (3.22)$$

Die Schritte zur Berechnung der inversen Kinematik können für das bessere Verständnis im Code ?? (Anhang referenz) direkt nachvollzogen und visualisiert werden.

?? alt methode file:///home/julin/Downloads/MScThesis_Marco_de_Gier.pdf

3.3 Singularitäten

Wie in Abschnitt 3.2 ermittelt, existiert beim UR5 genau eine Position, bei der eine Singularität vorliegt. Singularitäten zeichnen sich dadurch aus, dass es unendlich viele Lösungen für eine bestimmte Zieltransformation gibt. In der Regel tritt dies genau dann auf, wenn zwei Rotationsachsen parallel zueinander stehen und ihre Bewegung durch das Drehen in gegensätzliche Richtungen beliebig ausgleichen können.

In der Praxis tritt dieser Fall allerdings kaum auf, da durch kleine Rundungsfehler bei der Rechnung nur im Extremfall eine exakte Parallelität hergestellt wird. Trotzdem sind Singularitäten problematisch, da beim Durchfahren einer solchen Position extreme Positionsänderungen der verschiedenen Gelenke erforderlich sind. Aus diesem Grund ist es ratsam, diese Positionen möglichst zu vermeiden. Für weitere Informationen zur Pfadplanung, siehe Abschnitt 4.

4 Pfadplanung

Bei der Pfadplanung geht es darum, eine Reihe an Konfigurationen zu berechnen, die den Weg von einer bestimmten Transformation in eine andere beschreiben. Eine einzelne Konfiguration ist im Falle des UR5 ein Tupel mit sechs Winkeln, die die Ausrichtung der sechs Gelenke des Roboters beschreiben.

Die einfachste Form der Pfadplanung ist der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten (Abschnitt 4.2.1), die schnellste Verbindung ist immer der Weg der direkten Kinematik mit maximaler Winkelgeschwindigkeit bei der Bewegung (Abschnitt 2). Komplizierter wird es, wenn Beschränkungen im Arbeitsraum des Roboters, wie Kollisionen mit der Umgebung oder mit sich selbst, vorliegen. In diesem Fall muss ein komplizierteres Berechnungsverfahren herangezogen werden.

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Pfadplanung, sowie einige Algorithmen näher vorgestellt werden.

4.1 Konfigurationsraum

Der Konfigurationsraum C stellt die Grundlage für die Algorithmen in der Pfadplanung dar und beschreibt alle möglichen Konfigurationen, die der Roboter einnehmen kann. Eine Konfiguration des UR5 ist dabei wie in Gleichung 4.1 definiert, wobei die Winkelwerte θ_i durch ihre Maximal- und Minimalwerte des Datenblatts [8] von $\pm 360^\circ$ beschränkt sind. Gleichsam existieren Konfigurationen innerhalb dieser Menge $O \in C$, die Kollisionen beschreiben. Darunter zählen Konfigurationen, bei denen sich der Roboter selbst im Weg steht, sowie welche, bei denen der Untergrund oder statische Hindernisse eine erfolgreiche Ausführung der Bewegung verhindern. Der für die Pfadplanung relevante Bereich ist demzufolge der in Gleichung 4.2 beschriebene Menge C_{free} , der freie Konfigurationsraum, dessen Konfigurationen den Bereich beschreiben, durch den Roboter sich bewegen kann.

$$C = \{(\theta_1, \dots, \theta_6) \in \theta_1 \times \dots \times \theta_6 \mid \theta_i \in [-2\pi, 2\pi]\} \quad (4.1)$$

$$C_{free} = C \setminus O \quad (4.2)$$

Je nach Algorithmus muss der Konfigurationsraum allerdings nicht im vorhinein berechnet werden. Um den Kollisionsraum abzubilden wurde der Roboter in dieser Arbeit

mit Kugeln und Zylindern in den Dimensionen des UR5 approximiert und in fünf-Grad Schritten jede Position auf Eigenkollision getestet, damit Pfadplanungsalgorithmen schneller auf ihre Funktionsweise hin untersucht werden können.

?? Code

??Quelle

<https://www.geometrictools.com/Documentation/DynamicCollisionDetection.pdf>

4.2 Berechnungsmethoden

4.2.1 Kürzester Weg

In dieser Berechnungsmethode werden Position und Orientierung des Endeffektors linear zwischen zwei oder mehr Transformationen T_1 und T_2 verändert. Für die Translation zwischen P_1 und P_2 kann für jeden Schritt ein Faktor $t \in [0, 1]$ multipliziert werden (Gleichung 4.3). Zwischen zwei Rotationen R_1 und R_2 wird in der Regel der sog. Slerp verwendet (Gleichung 4.4). Dabei müssen die Rotationen der allerdings erst in Quaternionen Q_1 und Q_2 umgerechnet werden. Zu beachten sind zudem die Rechenregeln der Quaternionen, die hier nicht näher erklärt werden.

$$P_t = P_0 + (P_1 - P_0) \cdot t \quad (4.3)$$

$$Q_t = Q_1 \cdot (Q_1^{-1} \cdot Q_2)^t \quad (4.4)$$

?? Quelle

4.2.2 Zellendekomposition

?? Quelle

In der Zellendekomposition wird der freie Konfigurationsraum C_{free} in kleinere Felder, sog. Zellen unterteilt. Zwei Konfigurationen liegen genau dann in der gleichen Zelle, falls ein Übergang zwischen den beiden Zuständen kollisionsfrei möglich ist und zwei benachbarte Zellen müssen über einen einfachen Pfad miteinander kollisionsfrei verbunden sein. Dies setzt konvexe Zellen voraus, bei denen jeder Punkt innerhalb der Zelle jeden anderen erreichen kann. Auf Basis dieser Gruppierungen kann dann ein Konnektivitätsgraph oder eine Roadmap erstellt werden. Als Datenstruktur kann ein KD-Tree verwendet werden, der ein Konfigurationsraum als Baum so abbildet, dass Abstände und benachbarte Zellen zügig berechnet werden können. Im zweidimensionalen Raum

werden hierfür die Positionen und Dimensionen von Quadraten sowie dessen Nachbarn gespeichert.

Diese direkte Berechnung der Zellenstruktur ist im sechsdimensionalen Fall des UR5 allerdings nichttrivial und aufwändig. Aus diesem Grund und für die schnellere Berechnung wird deshalb oftmals eine approximierte Lösung aus einem Sampling-Verfahren bevorzugt.

4.2.3 Sampling-Verfahren

?? Quelle

In Sampling-basierten Verfahren wird das Gruppieren aller Konfigurationen in konkave Zellen übersprungen und stattdessen nur einzelne, benötigte Konfigurationen auf Kollision geprüft. Das bedeutet, dass nicht, wie in Abschnitt 4.2.2 alle Lösungen für alle Probleme generalisiert werden sollen, sondern eine einzelne Lösung für ein einzelnes Problem gesucht ist. Bedingung dafür ist allerdings eine Möglichkeit, eine Konfiguration schnell auf Kollisionsfreiheit zu überprüfen. Insofern der Konfigurationsraum wie in Abschnitt 4.1 schon zuvor berechnet wurde, kann alternativ ein Lookup-Table verwendet werden. Dabei kann zwischen Single- und Multi-Query-Verfahren unterschieden werden. Bei Single-Query-Verfahren wird für jede Abfrage ein neuer Weg gesucht, bei Multi-Query-Verfahren werden vergangene Anfragen als Hilfestellung für neue Anfragen genutzt und so eine Roadmap erzeugt. Üblicherweise wird beim Single-Query-Verfahren mit Startkonfiguration q_a und Zielkonfiguration q_b wie folgt vorgegangen:

1. Initialisierung eines Graphens $G(V, E)$ mit Knoten mit $V = \{q_a, q_b\}$ und $E = \{\}$
2. Auswahl eines Expansionsknotens aus V mit einem gewählten Algorithmus
3. Berechnung eines neuen Knotens und einer Kante mit einem gewählten Algorithmus (inklusive Kollisionsüberprüfung)
4. Erweiterung des Graphens mit zuvor gefundenem Knoten und neuer Kante (falls möglich).
5. Prüfe auf Lösung in G (Verbindung von Start und Zielknoten) oder wiederhole ab 2.

Zudem kann der Algorithmus auf zwei oder mehr Suchbäume ausgeweitet werden, die sich nach einiger Zeit in der Mitte treffen. Dazu wird dann in den Schritten 24 der verwendete Baum zufällig ausgewählt.

Der Rapidly Exploring Random Tree (RRT) ist ein häufig verwendeter Suchbaum in diesem Kontext. Hier wird zunächst wie in 3. zufällig eine neue Konfiguration gewählt und dann ab dem nächsten Knoten im Graphen eine Schrittweite in Richtung dieser Konfiguration gegangen. Um einen Bias gegenüber der Zielkonfiguration zu erzeugen, kann zudem mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der zufällig gewählte Knoten mit dem tatsächlichen Zielknoten ersetzt werden. Bei RRT* wird bei der Erweiterung zusätzlich auf andere Verbindungen des Graphens zum neu berechneten Knoten geprüft, was die Länge der kürzesten Verbindung zwischen Start und Ziel noch einmal minimiert. Die kürzeste Verbindung kann beispielsweise mithilfe von A* ermittelt werden.

??

Single-Query Unidirektional vs. Bidirektional RRT biased / unbiased to exploration
Q-space muss nicht vollständig bekannt sein RRT* Multi-Query Probabilistic Roadmaps
Potentialfeldmethode / Gradientenverfahren Genetische Algorithmen

4.3 Constraints und Praxisbezug

Kinematisch (Winkelbegrenzung) Dynamisch (Geschwindigkeit) Einbezug der Constraints in den Algorithmen Praxis: OMPL (MoveIt+ ROS / Copelliasim Plugin)

5 Trajektorienplanung

5.1 Profile

Trapez, 7-Segment

5.2 Synchronität

Vollsynchon, Teilsynchon, Asynchon

5.3 Mehrsegment-Trajektorien

Ggf besser in Pfadplanung ??

Mehrsegment-Trajektorien (z.B. Bezier, Überschleifen)

6 Fazit und Ausblick

Literatur

- [1] John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Third edition, Indian subcontinent adaptation. Chennai: Pearson, 2009. ISBN: 978-81-317-1836-0 (S. 3, 5, 10).
- [2] J. Denavit und R. S. Hartenberg. „A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices“. In: *Journal of Applied Mechanics* 22.2 (1. Juni 1955), S. 215–221. ISSN: 0021-8936, 1528-9036. DOI: 10.1115/1.4011045 (S. 3).
- [3] Kelsey P. Hawkins. *Analytic Inverse Kinematics for the Universal Robots UR-5/UR-10 Arms*. Technical Report. Georgia Institute of Technology, 7. Dez. 2013 (S. 10).
- [4] Jahobr. *Coordinate systems and Denavit-Hartenberg parameters*. 2007. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denavit-Hartenberg-Transformation.svg> (besucht am 24.11.2022) (S. 5).
- [5] Rasmus Andersen. „Kinematics of a UR5“. In: (2018) (S. 5, 7, 10–13).
- [6] ROS.org. *Urdf/XML/Model*. URL: <http://wiki.ros.org/urdf/XML/model> (besucht am 02.12.2022) (S. 6).
- [7] Universal Robots. *Universal Robots - DH Parameters for Calculations of Kinematics and Dynamics*. URL: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics/> (besucht am 02.12.2022) (S. 6–8).
- [8] Universal Robots. *UR5 Technical Specifications*. URL: https://www.universal-robots.com/media/50588/ur5_en.pdf (besucht am 09.12.2022) (S. 6, 17).

Erklärung

Die vorliegende Arbeit habe ich selbstständig ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer oder anderer Prüfungen noch nicht vorgelegt worden.

Augsburg, den 31.03.2023

Nik Julin Nowoczyn