Entwicklung einer allgemeinen dynamischen inversen Kinematik

Christoph Schmiedecke

Studiendepartment Informatik
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

06. Januar 2010

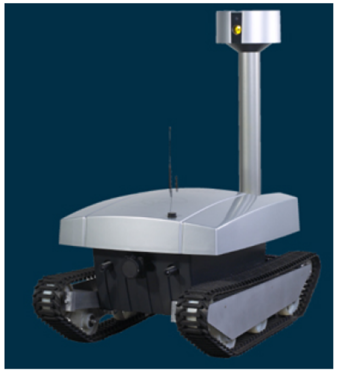
Inhaltsverzeichnis

Motivation

- Themeneinordnung – Kinematik
- Anzahl eingesetzter Roboter steigt stetig
- Aufgabenbereiche dank technischer Möglichkeiten immer vielfältiger

Motivation – Beispiele

- Beispiele bestehender Roboter bzw. Entwicklungen



Motivation – Ziele

- Generelle Auseinandersetzung mit dem Thema
- Assistenzroboter - Arbeit mit dem neuen Roboter (Scitos G5) und dessen Einsatz im Living Place Hamburg
- Allgemeine Kinematik –
  Kinematik für verschiedene Roboter

Inhaltsverzeichnis

Grundlagen – Roboterarm

- Bauteile
  - Sockel
  - Gelenke
    (Dreh-, Kipp-, Translationsgelenke)
  - Verbindungsstücke
  - Endeffektor (Werkzeug / Hand)

- Kinematik

- Freiheitsgrad

Grundlagen – Koordinatensysteme

Roboterarm

- Basiskoordinatensystem (Sockel)
- Werkzeugkoordinatensystem (Endeffektor)
- Gelenkkoordinatensystem

Weitere Koordinatensysteme

- Weltkoordinatensystem
- Werkstückkoordinatensystem

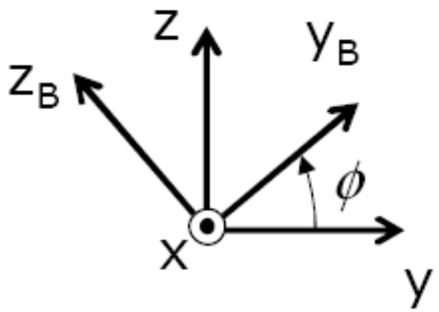
Grundlagen – Rotations- / Translations-matrix

Lokalisierung und Orientierung (Pose)

- Positionsvektor (x, y, z)
- Orientierung (Alpha, Betta, Gamma)

Rotation – Elementardrehungen

- RPY-, Kardan-, Euler-Winkel



$\mathbf{R}_x(\phi)$

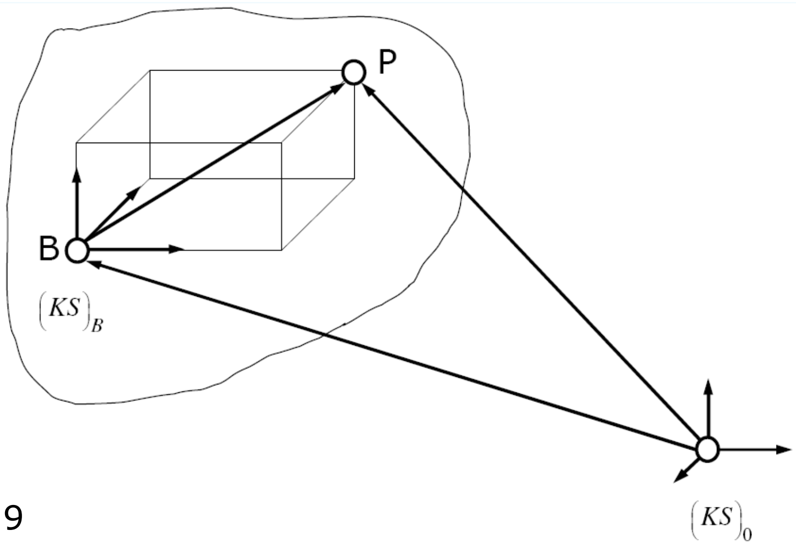
$$\mathbf{R}_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix}$$

Grundlagen – Rotations- / Translations-matrix

Rotation – Elementardrehungen

$$\mathbf{R}_{RPY}(\phi,\psi,\theta)=\mathbf{R}_z(\phi)\cdot\mathbf{R}_y(\psi)\cdot\mathbf{R}_x(\theta)=\begin{bmatrix} c_\phi c_\psi & c_\phi s_\psi s_\theta - s_\phi c_\theta & c_\phi s_\psi c_\theta + s_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\psi & s_\phi s_\psi s_\theta + c_\phi c_\theta & s_\phi s_\psi c_\theta - c_\phi s_\theta \\ -s_\psi & c_\psi s_\theta & c_\psi c_\theta \end{bmatrix}$$

Translation



$$\vec{v} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \qquad \vec{v'} = \vec{v} + \vec{t}$$

Grundlagen – Rotations- / Translations-matrix

Homogene Koordinaten

- Zusammenfassung von wichtigen Transformationen in einfacher Matrixmultiplikation

$$\vec{v}' = R_x \cdot \vec{v} \qquad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Inhaltsverzeichnis

Vorwärtskinematik – Allgemein

- Bewegung aller Gelenke wird vorgegeben
- Berechnung von Werkzeugpose durch vorhandene Gelenkwinkel

$$X = f(\Theta)$$

- Pose immer eindeutig bei gleichen Winkeln

Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

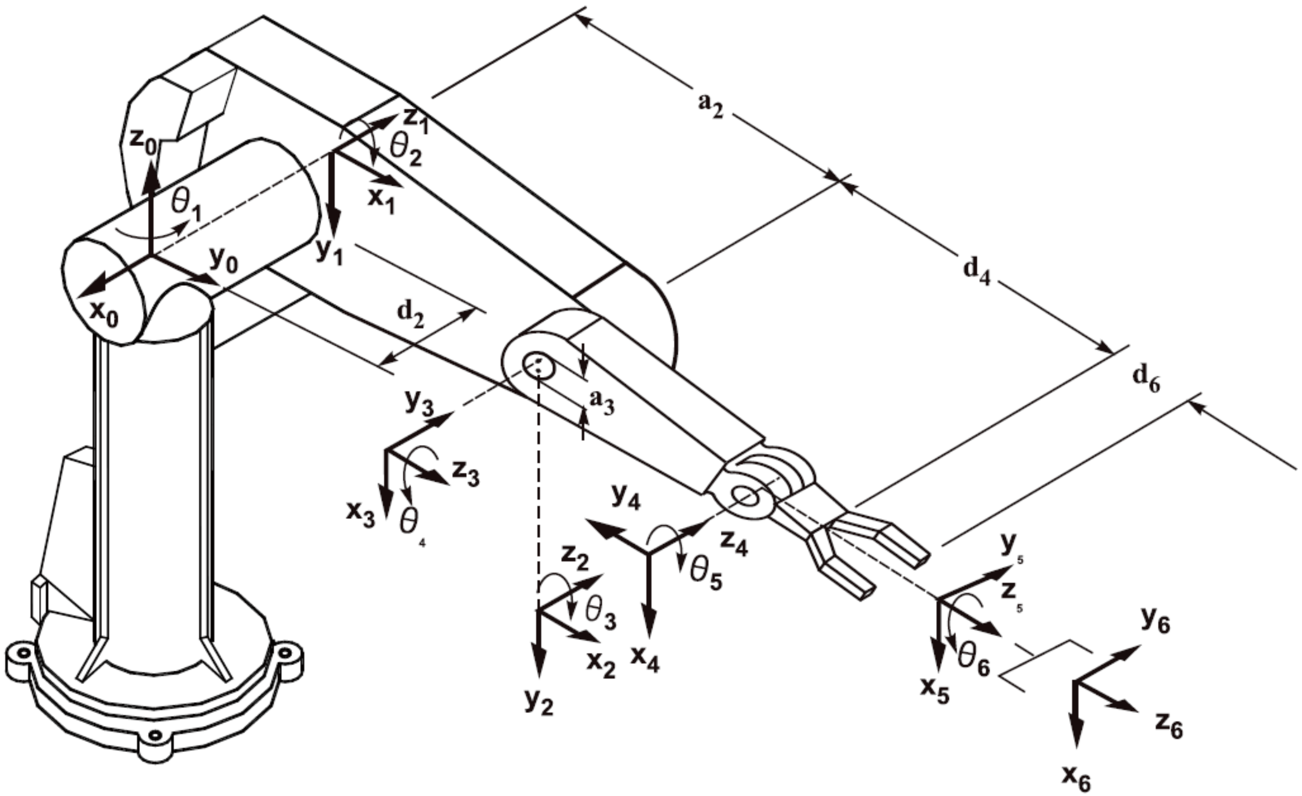
Dient der Erleichterung der kinematischen Vorwärts- und Rückwärtstransformation

Regeln

- 1. DH-Konventionen zur Festlegung der einzelnen Koordinatensysteme K_o bis K_n
- 2. DH-Transformationen zur Erzeugung der Koordinatensysteme
- 3. DH-Parameter aus den Transformationen

Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

1. Koordinatensysteme



Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

2. Transformationen

Jede Transformation besteht aus 2 Translationen und 2 Rotationen

$$
{}^{i-1}\boldsymbol{T}_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

3. Parameter

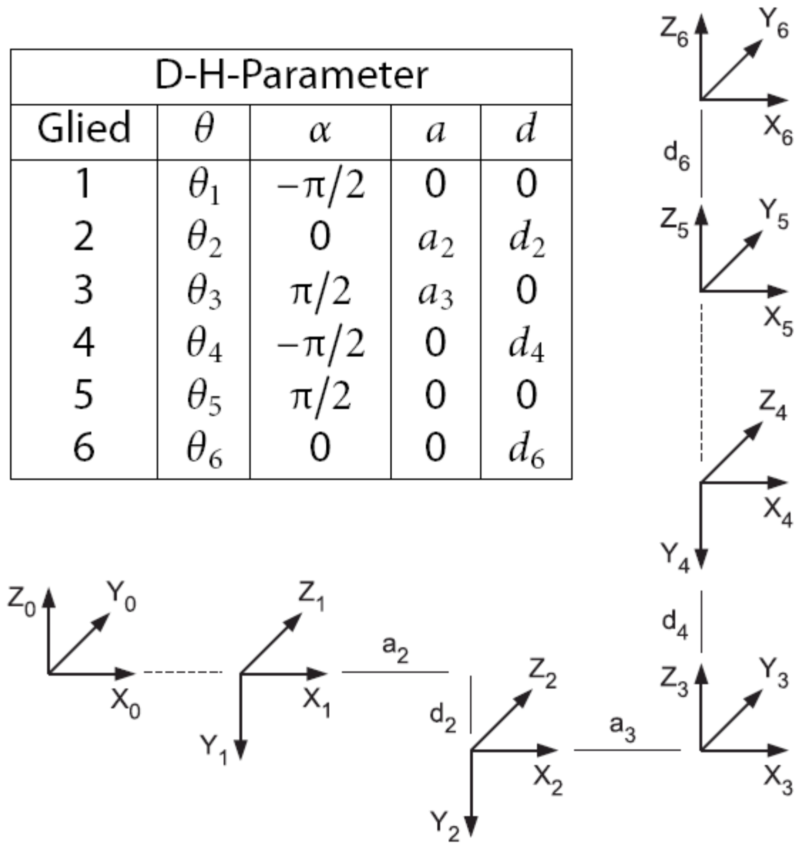
- Theta – (Rotation) Gelenkwinkel um z_{n-1} Achse
- d – (Translation) Gelenkabstand entlang der z_{n-1} Achse
- a – (Translation) Armelementlänge entlang der x_{n-1} Achse
- Alpha – (Rotation) Verwindung um x_n

Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

3. Parameter

- Ausgang ist die Nullstellung des Roboters
- Repräsentieren die Kinematische Kette

D-H-Parameter				
Glied	θ	α	a	d
1	θ_1	$-\pi/2$	0	0
2	θ_2	0	a_2	d_2
3	θ_3	$\pi/2$	a_3	0
4	θ_4	$-\pi/2$	0	d_4
5	θ_5	$\pi/2$	0	0
6	θ_6	0	0	d_6



Vorwärtskinematik – Denavit-Hartenberg Notation

Aufstellen der einzelnen Transformationsmatrizen

$$
{}^{i-1}\boldsymbol{T}_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

$$
{}^{0}\boldsymbol{T}_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

$$
{}^{1}\boldsymbol{T}_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

$$
{}^{0}\boldsymbol{T}_6 = {}^{0}\boldsymbol{T}_1\,{}^{1}\boldsymbol{T}_2\,{}^{2}\boldsymbol{T}_3\,{}^{3}\boldsymbol{T}_4\,{}^{4}\boldsymbol{T}_5\,{}^{5}\boldsymbol{T}_6 = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

$$
{}^{2}\boldsymbol{T}_3 = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & a_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & a_3\sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
$$

Inhaltsverzeichnis

Inverse Kinematik – Allgemein

- Aus vorhandenen Koordinaten Gelenkwinkel berechnen

$$\Theta = f^{-1}(X)$$

- Bei einfachen Aufgaben (Pick and Place) kann der Roboter direkt in seinen Gelenkkoordinaten bewegt werden (TeachIn)

- Bei schwierigen Aufgaben (Bahnschweißen) ist eine Rückwärtstransformation nötig

Inverse Kinematik – Probleme

- Rücktransformation kann keine, eine oder unendlich viele Lösungen haben
- Lösung kann unzulässige Stellung des Roboterarms sein
- Nicht für alle Kinematiken kann Rücktransformation analytisch erfolgen (komplexe Roboter)
- Notwendigkeit numerischer Verfahren
- Zeitliches Problem zwischen Berechung und Bewegung der Gelenke
- Bahnplanung (Hindernisse, Arbeitspunkte etc.)

Inverse Kinematik – Lösungsansätze

- Explizite Rückwärtsrechung
  - Berechnung aus Vorwärtskinematik, einfache Roboter
- Spezielle Rückwärtsrechnung
  - für einfache Roboter (parallele oder rechtwinklig zueinanderstehende Gelenke), arbeitet mit Einschränkungen des Bewegungsraums (Arm, Elbow, Flip)
- Inkrementelle Rückwärtsrechnung
  - Berechnung der Gelenkwinkel erfolgt über eine Reihe von dicht beieinander liegenden Arbeitspunkten
- Hyperredundante Roboter (Schlangenroboter)
  - gleiche Gelenke, Armelemente etc.

Inverse Kinematik – Inkrementelle Rückwärtsrechnung

Problem

- Einfacher Bewegungsbefehl P1 nach P2 würde im Normalfall nicht als Gerade erfolgen

Ansatz

- Sehr kleine Bewegungsinkremente

Inverse Kinematik – Inkrementelle Rückwärtsrechnung

Jacobi Matrix

- Multidimensionale Ableitung der Kinematik $\mathbf{X} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\Theta})$ nach den Kontrollparametern $\boldsymbol{\Theta} = [\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_N]$

$$\boxed{\frac{d\mathbf{X}}{d\boldsymbol{\Theta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta}) \quad \text{mit} \quad J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j}}$$

- Bildet Änderungsgeschwindigkeit des Zustandvektors auf Positions- und Winkelgeschwindigkeiten im kartesischen Raum ab.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta})\dot{\boldsymbol{\Theta}}$$

Inverse Kinematik – Inkrementelle Rückwärtsrechnung

Jacobi Matrix

- Inverse Kinematik $\Theta = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{X})$

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\mathbf{\Theta}} = \mathbf{J}(\mathbf{\Theta}) \quad \Rightarrow \quad d\mathbf{\Theta} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{\Theta})\, d\mathbf{X}$$

- Praxis $f(\Theta)$ häufig nicht invertierbar

- Lösungsansatz: Pseudoinverse

Inverse Kinematik – Inkrementelle Rückwärtsrechnung

- Vorhandene Transformationsmatrix

$$ {}^{W}\boldsymbol{A}_t = \begin{pmatrix} nx_w & sx_w & ax_w & px_w \\ ny_w & sy_w & ay_w & py_w \\ nz_w & sz_w & az_w & pz_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} $$

- Jacobi Matrix

$$ \begin{pmatrix} \mathrm{d}nx_w \\ \mathrm{d}ny_w \\ \mathrm{d}nz_w \\ \mathrm{d}sx_w \\ \vdots \\ \mathrm{d}az_w \\ \mathrm{d}px_w \\ \mathrm{d}py_w \\ \mathrm{d}pz_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial a_{11}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{11}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial a_{11}}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial a_{21}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{21}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial a_{21}}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial a_{31}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{31}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial a_{31}}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial a_{12}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{12}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial a_{12}}{\partial \theta_6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial a_{24}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{24}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial a_{24}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial a_{34}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial a_{34}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial a_{34}}{\partial \theta_6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{d}\theta_1 \\ \mathrm{d}\theta_2 \\ \mathrm{d}\theta_3 \\ \mathrm{d}\theta_4 \\ \mathrm{d}\theta_5 \\ \mathrm{d}\theta_6 \end{pmatrix} $$

Inhaltsverzeichnis

- Motivation
- Grundlagen
  - Roboterarm
  - Koordinatensysteme
  - Rotations-/Translationsmatrix
- Vorwärtskinematik
  - Allgemein
  - Denavit-Hartenberg Notation
- Inverse Kinematik
  - Allgemein
  - Probleme
  - Lösungsansätze
  - Inkrementelle Rückwärtsrechnung
- **Ausblick**

Ausblick

Vorgehen im nächsten Semester

- Kataner: Kinematik, inverse Kinematik, Simulation in Matlab Robotics Toolbox zum kennenlernen
- Scitos G5: Kinematik, inverse Kinematik, Simulation in Matlab, Test in Realität
- Später: Mobilität, Einsatz im Living Place Hamburg

Quellen

- Prof. Dr. Christof Röhrig (FH Dortmund) – Robotik (Vorlesungsfolien)
- Prof. Dr.-Ing. A. Schweikard (Universität zu Lübeck) – Robotik (Vorlesungsfolien)
- Prof. Dr. Sabina Jeschke (RWTH Aachen) – Kinematik und inverse Kinematik (Vorlesungsfolien)
- Dr. Martin Giese (Universität Tübingen) – Animation mit Dynamischen Modellen (Vorlesungsfolien)
- Prof. Dr.-Ing. Bodo Heimann (Leibniz Universität Hannover) – Robotik 1 (Vorlesungsfolien)
- Dipl.Ing. Alexander Krasnych – Optisch geführtes Steuerungskonzept eines Roboters in Echtzeit (Doktorarbeit)
- Bilder: www.kaercher.de, www.robowatch.de, http://bleex.me.berkeley.edu/, http://www.kuka-robotics.com, http://img73.exs.cx/img73/4608/timberjack.jpg, http://www.metralabs.com