KIT-Fakultät für Informatik
Prof. Dr.-Ing. Tamim Asfour

Musterlösungen zur Klausur

Robotik I: Einführung in die Robotik

am 07. April 2022

Name:	Vorname:	Matrikelnummer:
Denavit	Hartenberg	$\frac{\pi}{2}$

Aufgabe 1	von 6 Punkten
Aufgabe 2	von 8 Punkten
Aufgabe 3	von 7 Punkten
Aufgabe 4	von 7 Punkten
Aufgabe 5	von 7 Punkten
Aufgabe 6	von 7 Punkten
Aufgabe 7	von 3 Punkten

Gesamtpunktzahl:	45 von 45 Punkten

	Note: **1,0**

Aufgabe 1 *Transformationen*

1. Rotationsachse und Rotationswinkel: 3 P.

   Die Rotationsachse $\mathbf{v}$ wird von der Rotation nicht geändert:

$$R \cdot \mathbf{v} = \mathbf{v}$$

   Für die gegebene Matrix gilt dies für die x-Achse: $\mathbf{v} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ oder $\mathbf{v} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Eine Rotation um die x-Achse ($\mathbf{v} = (1,0,0)^T$) kann folgendermaßen als Rotationsmatrix ausgedrückt werden:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

   Koeffizientenvergleich ergibt:

$$\cos(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \alpha = \frac{1}{4}\pi \quad \vee \quad \alpha = -\frac{1}{4}\pi$$

   Da:

$$\sin\left(-\frac{1}{4}\pi\right) = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$

   ist $\alpha = -\frac{1}{4}\pi$ der korrekte Winkel für Rotationsachse $\mathbf{v} = (1,0,0)^T$.

   Alternative Antwort (Vorzeichen gedreht bei Achse und Winkel):

$$\mathbf{v} = (-1,0,0)^T, \quad \alpha = \frac{1}{4}\pi$$

2. Transformationsmatrix ${}^{BKS}T_{OKS}$: 1 P.

$${}^{BKS}T_{OKS} = \begin{pmatrix} R & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 200 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 400 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 600 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3. Transformationsmatrix ${}^{OKS}T_{BKS}$: 2 P.

$${}^{OKS}T_{BKS} = \begin{pmatrix} R^T & -R^T \cdot \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -200 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{200}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1000}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 2 *Kinematik*

1. Jakobi-Matrix: 4 P.

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \left(\frac{\partial f}{\partial d_1}, \frac{\partial f}{\partial \theta_2}, \frac{\partial f}{\partial \theta_3} \right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial d_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial f}{\partial \theta_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ -3 \cdot \sin(\theta_1) - 5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 3 \cdot \cos(\theta_1) + 5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial f}{\partial \theta_3} = \begin{pmatrix} 0 \\ -5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 \cdot \sin(\theta_1) - 5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) & -5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 1 & 3 \cdot \cos(\theta_1) + 5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) & 5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Jacobi-Matrix für $\boldsymbol{\theta} = (3, \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2})^T$: 2 P.

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 \cdot \sin(\frac{\pi}{2}) - 5 \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + (-\frac{\pi}{2})) & -5 \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + (-\frac{\pi}{2})) \\ 1 & 3 \cdot \cos(\frac{\pi}{2}) + 5 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + (-\frac{\pi}{2})) & 5 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + (-\frac{\pi}{2})) \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 \cdot 1 - 5 \cdot 0 & -5 \cdot 0 \\ 1 & 3 \cdot 0 + 5 \cdot 1 & 5 \cdot 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 1 & 5 & 5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3. Geschwindigkeit $\dot{\boldsymbol{x}}$: 2 P.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = J(\boldsymbol{\theta}) \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 1 & 5 & 5 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 5 \\ 0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1.8 \\ 12 \\ 1.4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 3 *Regelung*

1. Sprungantworten $\boxed{\text{2 P.}}$
   A: PID - stationäre Genauigkeit und schnelle Regelung.
   B: I Regler - keine proportionale (P) und keine schnelle Regelung (D).
   C: PI Regler - schneller Anteil (D) fehlt.
   D: PD Regler - stationäre Genauigkeit (I) fehlt.
   I-Anteil: Regelabweichungen kompensieren (stationäre Genauigkeit)
   D-Anteil: Dynamik (wie schnell)
2. Proportional-Integral-Derivative Controller m $\boxed{\text{2 P.}}$
   $\tau(t) = K_p\Theta_d(t) + K_i \int \Theta_d(t)dt + K_d\dot{\Theta}_d(t)$
   K_p : „virtuelle Feder“, die den Positionsfehler reduziert
   K_d : „virtuelle Dämpfer“, der den Geschwindigkeitsfehler reduziert
   K_i : reduziert Regelabweichungen (Offsets)
3. Tabelle: $\boxed{\text{3 P.}}$

Regelkreisgröße	**Name**
Block 1	Korrektureinrichtung/Regelglied/Regler/Controller
Block 2	Strecke/Plant
w	Führungsgröße/Sollwert/Setpoint/Input
x_d	Regeldifferenz/Differenzgröße/Error
y	Stellgröße
x	Regelgröße/Ausgangsgröße/Output

Aufgabe 4 *Bewegungsplanung*

1. (a) Konfiguration: 1 P.
   - Eine Konfiguration $\mathbf{q} \in C$ beschreibt den Zustand eines Roboters als Gelenkwinkelvektor im Gelenkwinkelraum
   - $\mathbf{q} = (\theta_0, \theta_1, \theta_2)^T$

   (b) Konfigurationsraum : 1 P.
   - Der Konfigurationsraum C eines Roboters R ist der Raum aller möglicher Konfigurationen der Gelenkwinkel von R.

   (c) weitere Freiheitsgrade: 1 P.
   - 3 weitere Freiheitsgrade
   - x, y, yaw (Rotation um Hochachse)

2. (a) Ziel der Bewegungsplanung: 1 P.
   - Finden einer kollisionsfreien Trajektorie von Start zu Ziel

   (b) Änderung der Problemstellung: 1 P.
   - Rendezvous-Problem
   - gesucht ist eine Trajektorie zu einem beweglichen Ziel
     $\rightarrow$ Zielzustand in Ort und Zeit beweglich.

3. (a) Vorverarbeitungsschritt: 1 P.
   - Diskretisierung bzw. Zellzerlegung und Erstellung eines Graphen zwischen benachbarten Zellen.

   (b) Zulässige Heuristik? 1 P.
   - $h_1(p, p_{end}) \rightarrow$ ja
   - $h_2(p, p_{end}) \rightarrow$ ja
   - $h_3(p, p_{end}) \rightarrow$ nein, da die Heuristik die Kosten überschätzt

Aufgabe 5 *Greifen*

1. Greifanalyse vs. Greifsynthese: 2 P.

   (a) Greifanalyse:

      i. Gegeben: Objekt und ein Griff (als Menge von Kontaktpunkten)

      ii. Gesucht: Aussagen zur Stabilität des Griffs unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen

   (b) Greifsynthese:

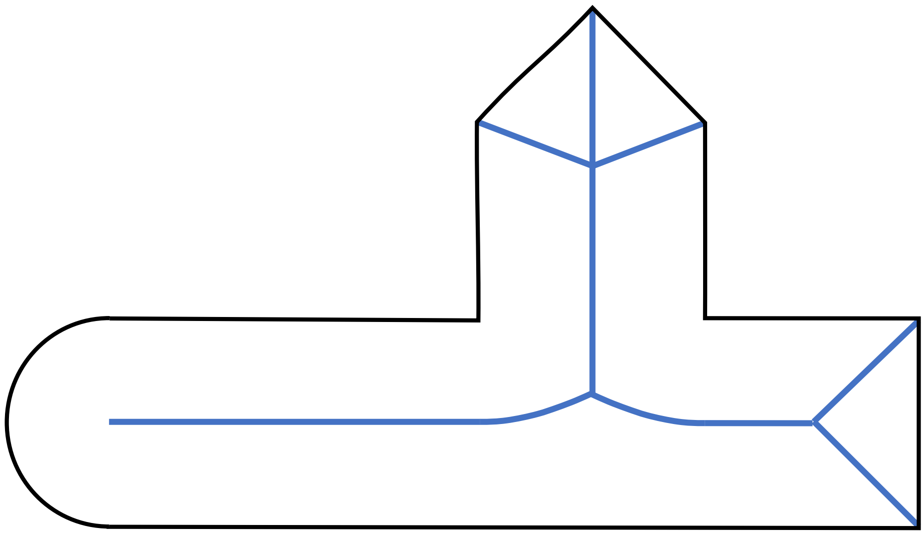
      i. Gegeben: Objekt und eine Menge von Nebenbedingungen

      ii. Gesucht: Eine Menge von Kontaktpunkten (Griff)

2. Definition: 1.5 P.

   - Die mediale Achse ist die Vereinigung der Zentren der maximalen Kugeln in H.

3. Objekthülle: 2 P.



4. Griff: 1.5 P.
   Der Griff kann nicht kraftgeschlossen sein , da keine Kräfte in $-f_y$-Richtung erzeugt werden können (alle f_y-Komponenten der Wrenches sind positiv).

Aufgabe 6 *Bildverarbeitung*

1. Bildrepräsentation: 2 P.

   - HSV/HSI - Durch Abkopplung der Helligkeit (V/I) von den anderen Farbnuancen, kann das Flackern der Kamera gut überbrückt werden
   - Tiefenbild - Tiefenbild-Kameras sind meistens (je nach Funktionsprinzip) in der Lage Helligkeitsänderungen zu verkraften

   Änderung mit Fenster: Änderungen im Spektrum des Sonnenlichts (z.B. durch Wolken) führen auch bei HSV Bildern zu Änderungen in allen 3 Kanälen des Bilds

2. Kamerakalibrierung: Minimale Nummer von Korrespondenzen: 6 Nützliches Objekt: Schachbrett 2 P.

3. Morphologischer Operator *Schließen*: 3 P.

   - Teilschritt 1: Dilatation

$$\begin{pmatrix} 255 & 255 & 255 & 255 & 0 & 0 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 0 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \end{pmatrix}$$

   - Teilschritt 2: Erosion

$$\begin{pmatrix} 255 & 255 & 0 & 0 \\ 0 & 255 & 255 & 255 \end{pmatrix}$$

Aufgabe 7 *Roboterprogrammierung*

1. Viele Antworten können akzeptiert werden, solang das genannte Verfahren tatsächlich ein Roboterprogrammierverfahren ist, und die Begründung überzeugend ist. Beispiele: 2 P.

    (a) Teach-In: Es ist von *einem* Produkt in großen Stückzahlen die Rede, also können die Punkte einfach angefahren und gespeichert werden, wo das Produkt gegriffen werden soll, und wo in der Verpackung es abgelegt werden soll. Industriekontext ist strukturiert genug für solche Anwendungen.

    (b) Programmieren durch Vormachen: Haushaltsszenario ist unstrukturiert und Personen im Haushalt sind sehr wahrscheinlich Laien / keine Programmierer. Intuitive Programmierung erforderlich, die Abstrakt genug ist, sodass eine Generalisierung erfolgen kann.

    (c) Master-Slave: Trajektorien können mit einem kinematisch-äquivalenten Modell eingelernt werden, die auf dem Schwerlast-Roboter abgespielt werden können. Modell geeignet, da Programmierung nicht an Schwerlast-Roboter erfolgen muss (oder kann).

    (d) Textuelle Programmierung: Industriestandard für Produkte wie CNC-Fräsen. Geeignet, da Problem sehr strukturiert ist, und das Programm gegeben eines 3D-Modells des Werkstücks erzeugt werden kann.

2. Mögliche Gründe (nur einer erforderlich) : 1 P.

    (a) Mächtiger Mechanismus zur Komplexitätsreduktion des Suchraums während des Lernens

    (b) Impliziter Mechanismus zum Trainieren von Robotern, der explizites und händisches Programmieren reduziert oder gänzlich überflüssig macht

    (c) Verständnis der Kopplung zwischen Perzeption und Aktion und dem lernen relevanter Beziehungen zwischen diesen