

Aufgabenblätter zur Klausur

Robotik I: Einführung in die Robotik

am 23. Februar 2023

- Beschriften Sie bitte gleich zu Beginn jedes Lösungsblatt deutlich lesbar mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer.
- Diese Aufgabenblätter werden nicht abgegeben. Tragen Sie Ihre Lösung deshalb ausschließlich in die für jede Aufgabe vorgesehenen Bereiche der Lösungsblätter ein. Lösungen auf separat abgegebenen Blättern werden nicht gewertet.
- Außer Schreibmaterial sind während der Klausur keine Hilfsmittel zugelassen. Täuschungsversuche durch Verwendung unzulässiger Hilfsmittel führen unmittelbar zum Ausschluss von der Klausur und zur Note „nicht bestanden“.
- Soweit in der Aufgabenstellung nichts anderes angegeben ist, tragen Sie in die Lösungsblätter bitte nur die Endergebnisse ein. Die Rückseiten der Aufgabenblätter können Sie als Konzeptpapier verwenden. Weiteres Konzeptpapier können Sie auf Anfrage während der Klausur erhalten.
- Halten Sie Begründungen oder Erklärungen bitte so kurz wie möglich. (Der auf den Lösungsblättern für eine Aufgabe vorgesehene Platz steht übrigens in keinem Zusammenhang mit dem Umfang einer korrekten Lösung!)
- Die Gesamtpunktzahl beträgt 45 Punkte.

Viel Erfolg und viel Glück!

Aufgabe 1 Transformationen (7 Punkte)

Der Roboter ARMAR-6 soll mit der rechten Hand eine Flasche greifen. Wie in Abbildung 1 dargestellt ist das Koordinatensystem des Tool-Center-Points (TCP) der rechten Hand durch \mathcal{F}_1 gegeben. Die Orientierung von \mathcal{F}_1 ist durch \mathbf{R}_1 , und die Position des Ursprungs von \mathcal{F}_1 durch \mathbf{t}_1 gegeben. \mathbf{R}_1 und \mathbf{t}_1 sind im Weltkoordinatensystem \mathcal{F}_w gegeben durch:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{t}_1 = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

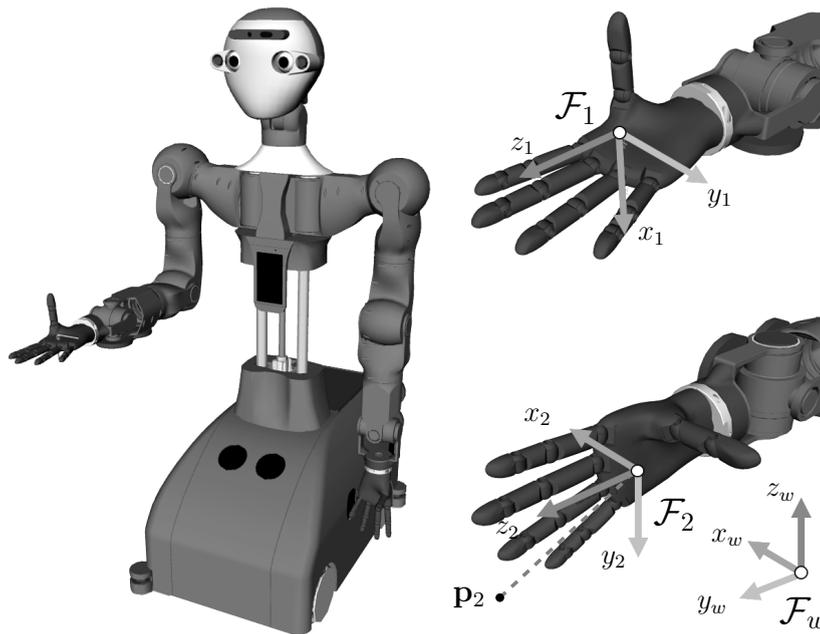


Abbildung 1: Der Roboter ARMAR-6 und die Koordinatensysteme \mathcal{F}_1 , \mathcal{F}_2 und \mathcal{F}_w .

1. Geben Sie die homogene Transformationsmatrix \mathbf{T}_1 an, die \mathcal{F}_1 im Weltkoordinatensystem \mathcal{F}_w beschreibt. 1 P.
2. Um die Flasche zu greifen, dreht der Roboter die Hand um $\theta = -\frac{\pi}{2}$ um die z_1 -Achse, was im Koordinatensystem \mathcal{F}_2 resultiert. Berechnen Sie die Rotationsmatrix \mathbf{R} , welche die Drehung von \mathcal{F}_1 nach \mathcal{F}_2 beschreibt. 1 P.
3. Berechnen Sie die Rotationsmatrix \mathbf{R}_2 , welche die Orientierung des Koordinatensystems \mathcal{F}_2 im Weltkoordinatensystem \mathcal{F}_w beschreibt. 2 P.
4. Die Zielposition des Griiffs ist im Koordinatensystem \mathcal{F}_2 gegeben durch $\mathbf{p}_2 = (-0.1, 0.1, 0.2)^\top$. Berechnen Sie die Zielposition \mathbf{p}_w des Griiffs im Weltkoordinatensystem \mathcal{F}_w . 2 P.
5. Nennen Sie einen Nachteil von Rotationsmatrizen gegenüber Quaternionen zur Repräsentation von Rotationen. 1 P.

Aufgabe 2 *Kinematik*

(8 Punkte)

Gegeben ist ein Roboter mit dem Konfigurationsraum $C \subseteq \mathbb{R}^3$ und dem Arbeitsraum $W \subseteq \mathbb{R}^3$. Die Orientierung des TCPs wird hierbei nicht berücksichtigt. Der Roboter besteht aus einem Translationsgelenk d_1 , einem Rotationsgelenk θ_2 , sowie einem weiteren Translationsgelenk d_3 . Eine Konfiguration wird durch $\boldsymbol{\theta} = (d_1, \theta_2, d_3)^\top \in C$ beschrieben. Die Vorwärtskinematik ist definiert durch:

$$\mathbf{x} = f(d_1, \theta_2, d_3) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 + d_1 + \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) \\ 10 + d_3 \end{pmatrix}$$

1. Geben Sie die Formel für die Jacobi-Matrix $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ an. Berechnen Sie $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$. 3 P.
2. Geben Sie die Formel für die Matrix der Manipulierbarkeit $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ an. Berechnen Sie $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$. 2 P.
3. Bestimmen Sie die Matrix der Manipulierbarkeit an der Konfiguration 1 P.

$$\boldsymbol{\theta}^* = (d_1, \theta_2, d_3)^\top = (5, 180^\circ, 10)^\top \in C.$$

4. Welche Aussage lässt sich über die Beweglichkeit des TCPs an der Konfiguration $\boldsymbol{\theta}^*$ anhand des Ergebnisses im Aufgabenteil 3. treffen? 1 P.
- Hinweis:** Die Eigenwerte einer Diagonalmatrix sind die Einträge auf der Diagonalen.
5. Die Jacobi-Matrix bildet Gelenkwinkelgeschwindigkeiten auf Endeffektorgeschwindigkeiten ab. 1 P.

Wie kann die Beziehung zwischen Kräften und Momenten am Endeffektor und Drehmomenten in den Gelenken durch die Jacobi-Matrix ausgedrückt werden?

Aufgabe 3 *Bewegungsplanung*

(10 Punkte)

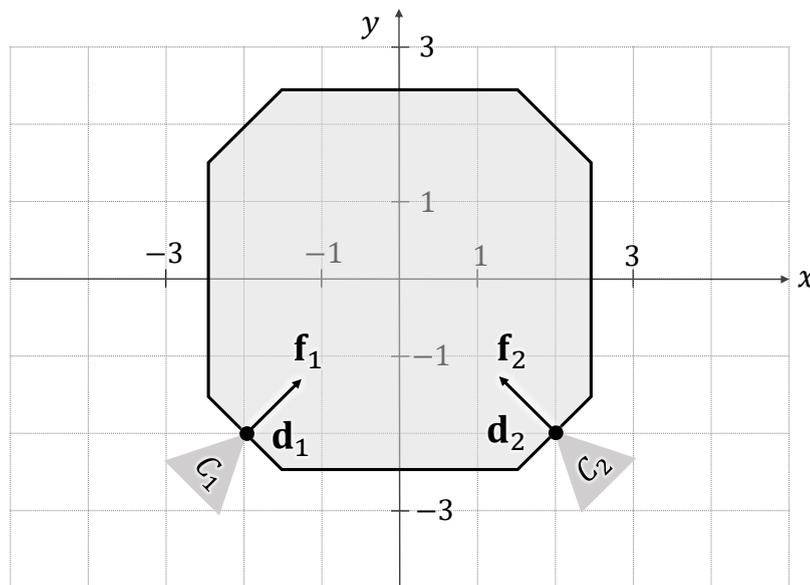
1. Geben Sie jeweils die Definition und ein Beispiel für (1) vollständige sowie (2) probabilistisch-vollständige Algorithmen für die Bewegungsplanung. 3 P.
2. Welche Eigenschaft weisen die Punkte innerhalb einer Region eines Voronoi-Diagramms auf? 1 P.
3. Nennen Sie jeweils einen Vor- und Nachteil des RRT-Algorithmus zur Bewegungsplanung. 1 P.
4. Wozu dient der Rewiring-Schritt des RRT*-Algorithmus? 1 P.
5. Sie haben die Aufgabe, eine kollisionsfreie Bewegungsplanung für einen Roboter zu realisieren. Welchen Algorithmus würden Sie wählen, wenn der Roboter in einer a) statischen Umgebung, und b) in einer dynamischen Umgebung arbeitet? Begründen Sie Ihre Antwort. 2 P.
6. Gegeben ist das Bewegungsplanungsproblem auf dem Lösungsblatt. Zeichnen Sie den kürzesten Weg zwischen Start q_{start} und Ziel q_{ziel} ein, welchen das Sichtgraph-Verfahren mit erweiterten Hindernissen finden würde. 2 P.

Aufgabe 4 Greifen

(7 Punkte)

1. Was unterscheidet Formgeschlossenheit und Kraftgeschlossenheit? 1 P.

2. Gegeben ist der planare Griff $G = \{C_1, C_2\}$ in Abbildung 2 mit Kontaktkräften $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2$ an den Punkten $\mathbf{d}_1 = (-2, -2)$ und $\mathbf{d}_2 = (2, -2)$. Die Kontaktkräfte wirken jeweils in Richtung $(1, 1)$ und $(-1, 1)$. Gehen Sie im Folgenden von starren Punktkontakten **mit** Reibung, einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 1$ sowie einer Einheitskraft $|\mathbf{f}_i| = 1$ aus.

Abbildung 2: Planarer Griff G

(a) Berechnen Sie alle Wrenches $\mathbf{w} = (f_x, f_y, \tau)$, die das Reibungsdreieck **von Kontakt** C_1 (links im Bild) aufspannen. 2 P.

Hinweise: $\tan^{-1}(1) = 45^\circ$, $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = ad - bc$

(b) Geben Sie die minimale obere Schranke für die GWS-Metrik (ε -Metrik) des Griffs G an. Begründen Sie Ihre Antwort. 2 P.

3. Gegeben ist die Hülle eines 2D-Objekts auf dem Lösungsblatt. Zeichnen Sie die mediale Achse des Objekts in die Abbildung auf dem Lösungsblatt. 2 P.

Aufgabe 5 *Bildverarbeitung* (8 Punkte)

1. Gegeben ist ein Bild mit Salz- und Pfefferrauschen. Welches Filter würden Sie verwenden, um dieses Rauschen zu unterdrücken? Begründen Sie Ihre Antwort. 1 P.
2. Was ist der Unterschied zwischen einer Korrelation und einer Faltung im Kontext der Filteroperationen? 1 P.
3. Was versteht man unter *Segmentierung*? Erklären Sie, wie eine Schwellenwertfilterung für die Segmentierung funktioniert. 1 P.
4. Gegeben sei die Kamera eines Roboters, die durch das erweiterte Kameramodell beschrieben werden kann. Die unabhängige Brennweite \mathbf{f} und der Hauptpunkt \mathbf{c} der Kamera sind gegeben durch

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 300 \\ 200 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

- (a) Was ist der Unterschied zwischen dem erweiterten Kameramodell und dem klassischen Lochkameramodell? 1 P.
- (b) Gegeben sind die Punkte \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_2 , deren Koordinaten im Kamerakoordinatensystem definiert sind durch 2 P.

$$\mathbf{p}_1 = (2, 2, 100)^\top, \quad \mathbf{p}_2 = (1, 17, 50)^\top.$$

Bestimmen Sie die Bildkoordinaten von \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_2 .

5. Erklären Sie, wie die Fehlerfunktionen beim (1) positionsbasierten und (2) bildbasierten Visual Servoing jeweils definiert sind. 2 P.

Aufgabe 6 *Roboterprogrammierung* (5 Punkte)

1. Beim *Programmieren durch Vormachen (PdV)* unterscheidet man zwischen dem Lernen auf sub-symbolischer und symbolischer Ebene. Erklären Sie die Unterschiede. Was ist das Ergebnis des jeweiligen Falls? 2 P.
2. Was versteht man unter *Bewegungssegmentierung*? Nennen Sie zwei Kriterien, die Sie dazu verwenden würden? 2 P.
3. *Statechart* stellen einen Formalismus zur graphischen Programmierung von Robotern dar. Nennen Sie zwei Eigenschaften von *Statecharts*, die sie als geeignet für die Roboterprogrammierung machen. 1 P.

Lösungsblätter zur Klausur

Robotik I: Einführung in die Robotik

am 23. Februar 2023

Name:	Vorname:	Matrikelnummer:
-------	----------	-----------------

Aufgabe 1	von 7 Punkten
Aufgabe 2	von 8 Punkten
Aufgabe 3	von 10 Punkten
Aufgabe 4	von 7 Punkten
Aufgabe 5	von 8 Punkten
Aufgabe 6	von 5 Punkten

Gesamtpunktzahl:	
-------------------------	--

	Note:
--	--------------

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

2

Aufgabe 1 *Transformationen*

1. Transformationsmatrix:

2. Rotationsmatrix:

3. Rotationsmatrix:

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

3

4. Zielposition:

5. Nachteil:

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

4

Aufgabe 2 *Kinematik*

1. Jacobi-Matrix:

2. Matrix der Manipulierbarkeit:

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

5

3. Matrix der Manipulierbarkeit:

4. Implikation und Begründung:

5. Beziehung:

Aufgabe 3 *Bewegungsplanung*

1. Definitionen und Beispiele:

(1)

(2)

2. Eigenschaft:

3. • Vorteil:

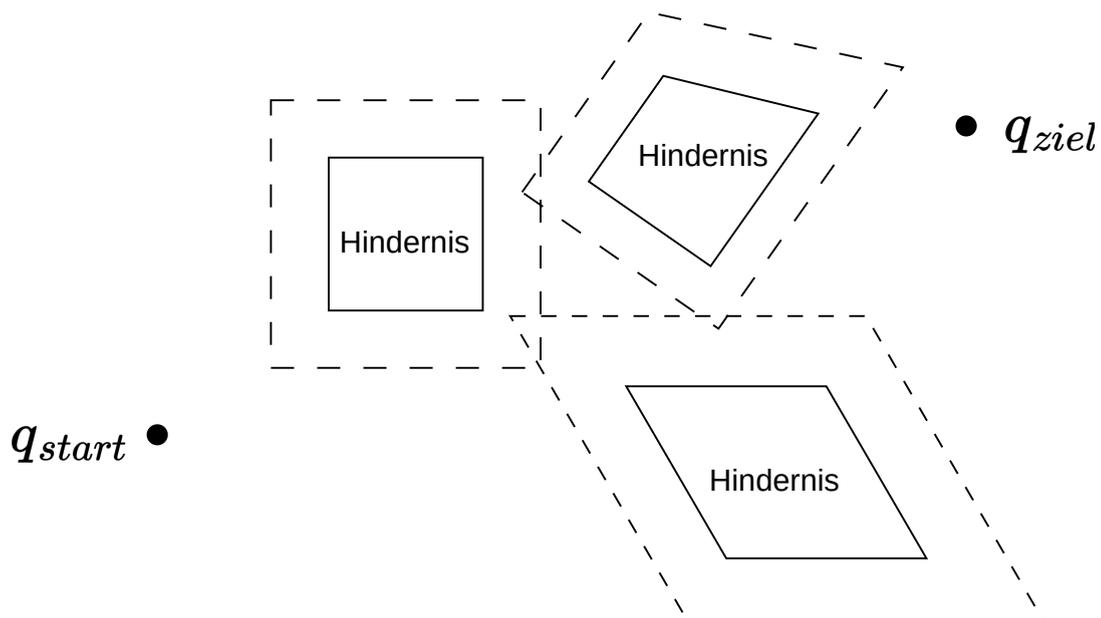
• Nachteil:

4. Rewiring-Schritt:

5. Algorithmus für statische Umgebungen:

Algorithmus für dynamische Umgebungen:

6. Sichtgraph:



Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

8

Aufgabe 4 *Greifen*

1. Unterschied:

2. Griff:

(a) Wrenches:

(b) Schranke und Begründung:

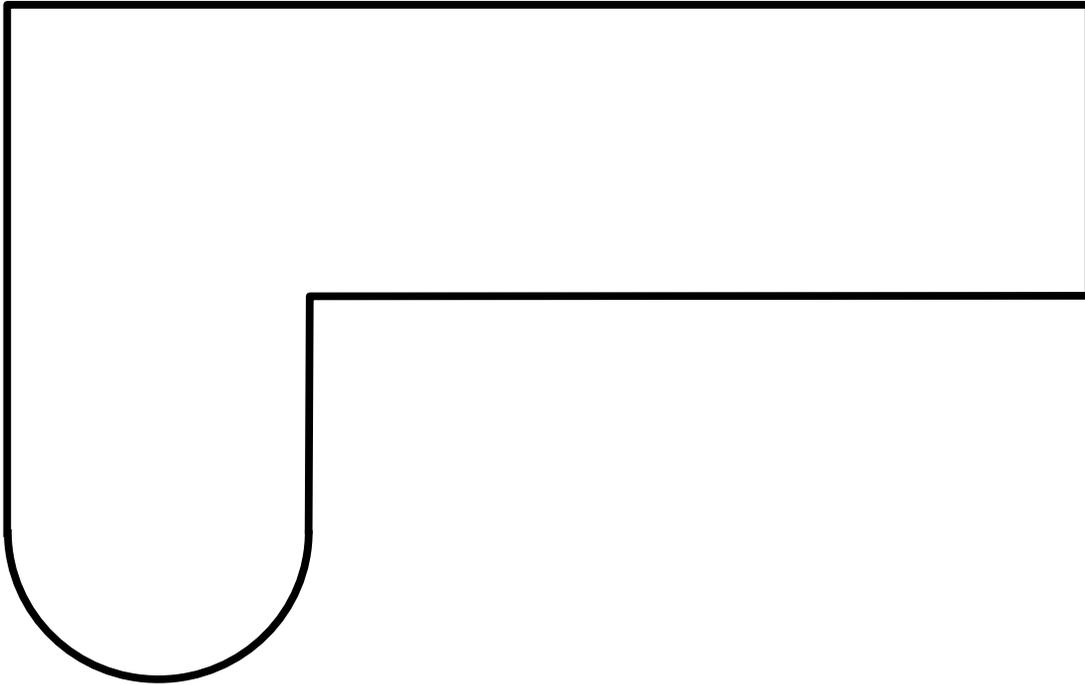
Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

9

3. 2D-Objekt:



Aufgabe 5 *Bildverarbeitung*

1. Rauschunterdrückung:

2. Korrelation vs. Faltung:

3. Segmentierung:

Begriff:

Schwellenwertfilterung:

4. Erweitertes Kameramodell:

(a) Unterschied:

Name:

Vorname:

Matr.-Nr.:

11

(b) Bildkoordinaten:

$\mathbf{px}_1 =$

$\mathbf{px}_2 =$

5. Visual Servoing:

(1) Positionsbasiert:

(2) Bildbasiert:

Aufgabe 6 *Roboterprogrammierung*

1. Symbolisch vs. sub-symbolisch:

2. Bewegungssegmentierung:

3. Eigenschaften: