
Praktikum Teil 3/3

Mit ★ gekennzeichnete Aufgaben sind Vorbereitungsaufgaben. Diese sind vor dem Praktikum schriftlich zu erledigen und Voraussetzung für die Teilnahme. Nicht vorbereitete Gruppen, oder Teilnehmer, dürfen nicht am Versuch teilnehmen. Eine MATLAB-Lizenz können Sie kostenlos über Ihren URZ-Account beziehen.

1 Kraftregelung

1.1 Einführung

Mit der positionsgenauen Regelung des Roboters können weite Anwendungsgebiete abgedeckt werden. So können Gegenstände genauestens platziert und Bahnkurven exakt nachgefahren werden und erlaubt somit die Fertigung hochpräziser Bauteile. In vielen Anwendungen ist eine genaue Kenntnis der Umwelt nicht vorhanden oder unterliegt einer zeitlichen Veränderung. Ein Beispiel stellt das Verschrauben zweier Werkstücke dar. Eine für den Menschen recht einfache Aufgabe stellt für einen Roboter eine große Herausforderung dar. Bedingt durch Fertigungstoleranzen sind die Gewindebohrungen einem Positionsfehler unterworfen. Beim Einschraubvorgang ist nicht bekannt, wann das Gewinde der Schraube greift. Ein vorher fest programmierter Fahrweg in z-Richtung und eine fest programmierte Anzahl an Umdrehungen können keine zuverlässige Schraubverbindung herstellen.

Für eine erfolgreiche Bewältigung von Aufgaben mit ungenauer Umweltkenntnis muss der Roboter die Fähigkeit besitzen mit der Umwelt zu interagieren. Der Roboter sollte also bei Veränderung der Umwelt entsprechend reagieren können. Ein Lösungsansatz dem Roboter einen gewissen Grad an Anpassungsfähigkeit zu verleihen stellt die Kraftregelung dar. Am Beispiel der Verschraubungsaufgabe ist der Roboter nun in der Lage

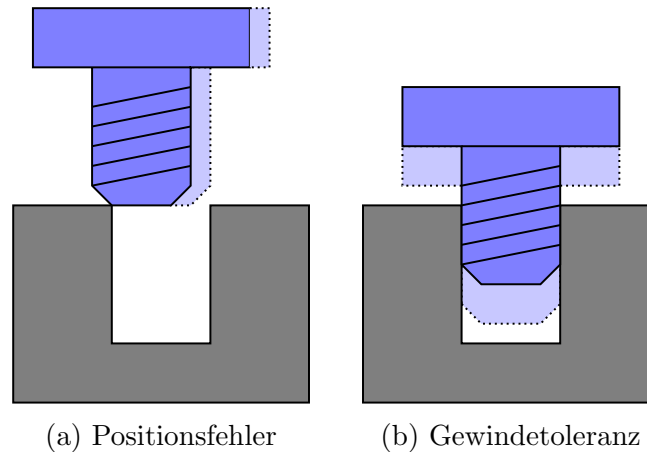


Abbildung 1: Schraubvorgang

von seiner Sollposition durch äußeren Krafteinfluss ausgelenkt zu werden. Ein Versatz während der Positionierung der Schraube würde den Roboter somit durch die entstehenden Kräfte in die richtige Position auslenken. Eine konstante Kraft in z-Richtung und das Erreichen eines vorher definierten Drehmoments beim Verschrauben erlaubt ein sicheres Festziehen der Schraube.

1.2 Regelungsmethoden

Für die Kraftregelung gibt es zwei übergeordnete Regelungskonzepte, nämlich die Impedanzregelung und die direkte Kraftregelung, die sich wiederum jeweils in Regelung im Gelenkraum und kartesische Regelung unterteilen lassen. Beide Regelungskonzepte lassen sich kombinieren (Schraubvorgang).

1.3 Impedanzregelung

Die Impedanzregelung regelt die Impedanz (Widerstand) eines Systems, die ein Gegenstand während der Auslenkung des Manipulators erfährt. Die Impedanz wird mithilfe eines Feder-Dämpfer-Masse-Systems modelliert und stellt das Verhältnis zwischen Auslenkung und der resultierenden Kraft dar.

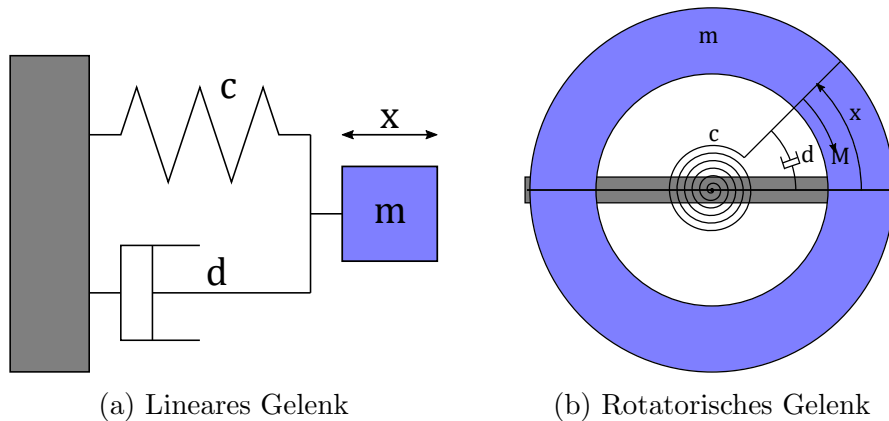


Abbildung 2: Feder-Dämpfer-Masse-System

$$M(x) \text{ oder } F(x) = c \cdot x + d \cdot \dot{x} + m \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

Wobei c die Federkonstante, d die Dämpfung und m die virtuelle Masse beschreiben. Der Roboter verhält sich bei Auslenkung daher wie ein System mit den entsprechenden Feder-, Dämpfer- und Masseparametern. Es wird somit nicht die Position oder Kraft geregelt, sondern die Impedanz. Erst aus der Impedanz wird die entsprechende Gegenkraft bestimmt. Alternativ kann statt des Widerstands auch die Nachgiebigkeit (Admittanz) geregelt werden.

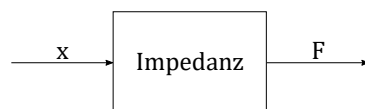


Abbildung 3: Umrechnung von Weg x auf Kraft F

Für die Impedanzregelung wird dem Positionsregler eine unterlagerte Kraftregelung eingesetzt. Dieses Verfahren wird verwendet, wenn die Position eine höhere Priorität haben soll, wie bei der Positionierung der Schraube aus dem vorherigen Beispiel, und wird auch als indirekte Kraftregelung bezeichnet.

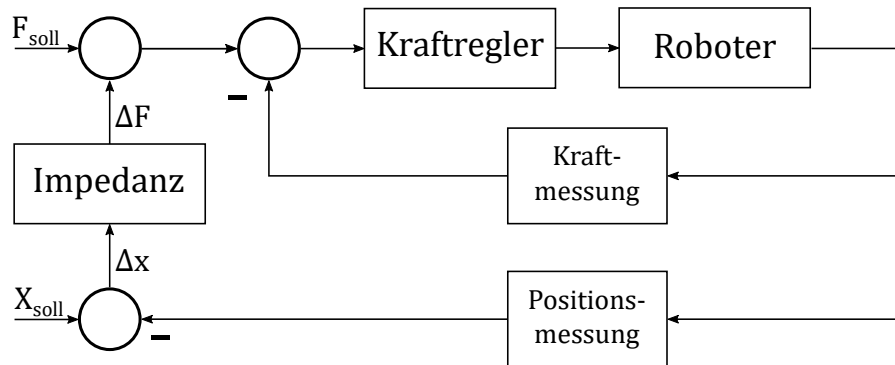


Abbildung 4: Impedanzregler

Zum kompletten Weichschalten des Roboters ist es möglich die Federkonstante $c = 0$ zu setzen, wodurch der überlagerte Positionsregler vom Regelkreis getrennt wird. Somit ist der Roboter in der Lage externen Kräften nachzugeben, ohne in seine ursprüngliche Position zurückzukehren. Das Weichschalten des Roboters wird unter anderem zum Positions-Teaching verwendet, indem der Anwender dem Roboter einen Bewegungsablauf manuell vorgibt.



Abbildung 5: Impedanzregler für Positions-Teaching

1.4 Direkte Kraftregelung

Die direkte Kraftregelung hat als Regelkreis den Kraftregler (und ggf. unterlagert die Positionsregelung). Im Gegensatz zur Impedanzregelung wird auf eine Sollkraft eingeregelt, wohingegen bei der Impedanzregelung die Gegenkraft von der Auslenkung zur Soll-Position ist. Die Kraftregelung hat in diesem Fall höhere Priorität als die Positionsregelung. Erfolgt keine Gegenkraft, so würde sich der Roboter theoretisch weiter bewegen, bis er eine Gegenkraft erfährt. Aus diesem Grund sollte die Kraftregelung erst bei Kontakt mit der Umgebung eingeschaltet werden und für das Verfahren in der Umgebung die Impedanzregelung verwendet werden. Aus dem Beispiel der Schraubaufgabe kann die Kraftregelung für das Festziehen der Schraube verwendet werden. Der Manipulator drückt die Schraube mit einer gewissen Kraft in z-Richtung und dreht so lange, bis er ein gewisses Drehmoment erreicht.

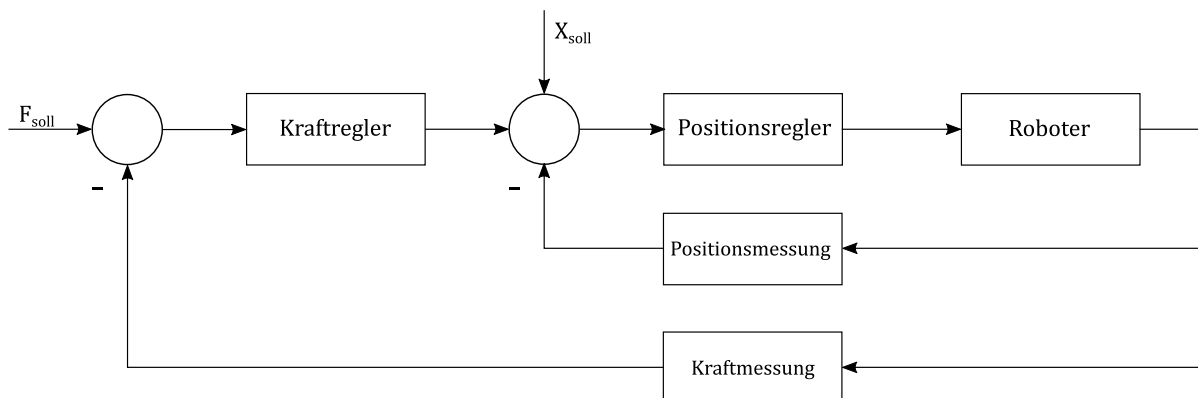


Abbildung 6: Direkte Kraftregelung

1.5 Kraftregelung: Gelenkraum vs. Kartesischer Raum

Für die Kraftregelung im Gelenkraum werden die einzelnen Gelenke einzeln auf Kraft/-Moment geregelt. Bei der Impedanzregelung stellen translatorische Gelenke lineare Federn dar und rotatorische Gelenke Torsionsfedern. Mit der Regelung im Gelenkraum ist es möglich einzelne Glieder des Roboters direkt über externe Kräfte zu manipulieren. Die Regelung im Gelenkraum eignet sich besonders, wenn Kraft- und Drehmomentsensoren in den einzelnen Gelenken vorhanden sind, da keine Umrechnung nötig ist.

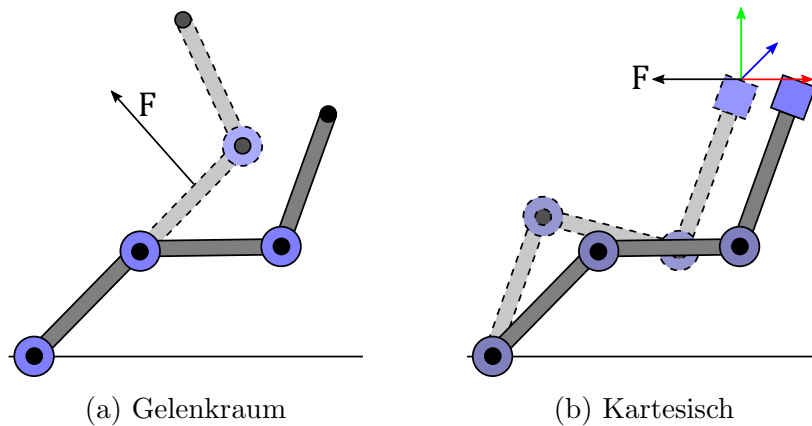


Abbildung 7: Kraftregelung

Im kartesischen Raum werden die Kräfte im End-Effektor geregelt. Bei Verwendung von Gelenksensoren müssen die Kräfte an den Gelenken zurück zum End-Effektor umgerechnet werden. Für die kartesische Kraftregelung eignet sich ein 6D Kraft- und Momentensensor, der am End-Effektor angebracht ist. Vorteil ist, dass der Einfluss der Dynamik und der Gravitation sehr leicht bestimmt werden kann, allerdings bleiben externe Kräfte, die nicht am Sensor, sondern direkt am Roboter anliegen unerkannt. Die Kombination beider Verfahren ist auch möglich. Ein Beispiel liefert die Robotik in der Medizintechnik. Hier besitzen die Roboter mehr Freiheitsgrade, sodass sich die Roboter wegschieben lassen, falls sie den Chirurgen behindern, und können weiterhin ihre Pose am TCP beibehalten. Zusätzlich ist der TCP meistens auch Impedanz geregelt, damit er das Gewebe am Patienten nicht beschädigt.

1.6 Gravitationskompensation

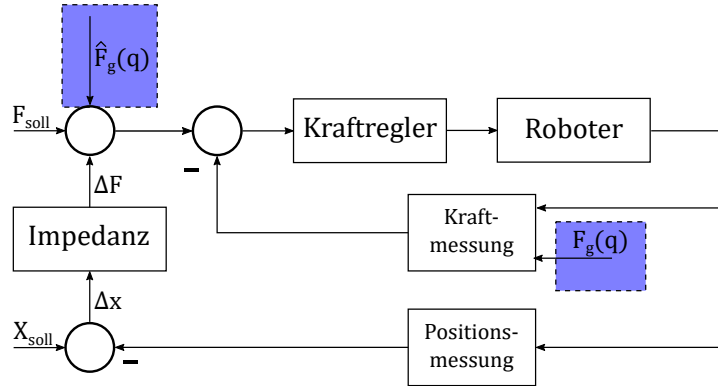


Abbildung 8: Einfluss der Gravitation F_g muss durch \hat{F}_g kompensiert werden

Der Einfluss der Gravitation auf die Gelenke lässt sich mithilfe der Ableitung der potentiellen Energie der Lagrange Gleichungen bestimmen:

$$g_i(q) = \frac{\partial V(q)}{\partial q_i} = - \sum_{j=1}^n (m_{l,j} g_0^T J_{P_i}^{lj}(q) + m_{m,j} g_0^T J_{P_i}^{mj}(q)) \quad (2)$$

Die Jacobi-Matrix für die Links:

$$J_P^{li} = [J_{P_1}^{li} \quad \dots \quad J_{P_j}^{li} \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (3)$$

$$J_{P_j}^{li} = \begin{cases} z_{j-1} & \text{Für prismatische Gelenke} \\ z_{j-1} \times (p_{l,i} - p_{j-1}) & \text{Für rotatorische Gelenke} \end{cases} \quad (4)$$

$p_{l,i}$: Massenschwerpunkt des i-ten Links

p_{j-1} : Positionsvektor der Transformationsmatrix ${}^0T_{j-1}$

z_{j-1} : Z-Komponente der Rotationsmatrix aus der Transformationsmatrix ${}^0T_{j-1}$

Die Jacobi-Matrix für die Motoren:

$$J_P^{mi} = [J_{P1}^{mi} \quad \dots \quad J_{Pj-1}^{mi} \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (5)$$

Anmerkung: Bei den Motoren wird schon die j -te Spalte der Jaobimatrix zu 0 gesetzt.

$$J_{Pj}^{mi} = \begin{cases} z_{j-1} & \text{Für prismatische Gelenke} \\ z_{j-1} \times (p_{m,i} - p_{j-1}) & \text{Für rotatorische Gelenke} \end{cases} \quad (6)$$

$p_{m,i}$: Massenschwerpunkt des i -ten Motors

p_{j-1} : Positionsvektor der Transformationsmatrix ${}^0T_{j-1}$

z_{j-1} : Z-Komponente der Rotationsmatrix aus der Transformationsmatrix ${}^0T_{j-1}$

2 Aufgaben

1. Kraftregelung

- a) ★ Überlegen Sie sich jeweils zwei Anwendungsgebiete für Impedanzregelung und direkte Kraftregelung.
- b) ★ In einem Roboter ist nur der Impedanzregler implementiert worden. Die Federkonstante des Feder-Dämpfer-Masse-Modells beträgt $c = 10 \frac{N}{m}$. Das Werkstück befindet sich in der Position $p = (0, 0, 0)$. Wie muss man den Roboter ansteuern (welche Position soll angesteuert werden), damit der Roboter eine Kraft von 1N in Z-Richtung auf das Werkstück ausübt?
- c) ★ Erläutern Sie wie sich eine große und kleine Federkonstante auf die Positionsgenauigkeit auswirkt.
- d) ★ An einem Roboter befinden sich Kraft-und Drehmomentsensoren in jedem Gelenk. Eine externe Kraft am TCP verursacht Kräfte und Momente in den Gelenken. Erläutern Sie wie Sie aus den gemessenen Kräften und Momenten die kartesischen Kräfte am TCP bestimmen.
- e) ★ In der bereitgestellten MATLAB-Datei P_3.m sind die DH-Parameter als auch die Massenschwerpunkte der Motoren und Links eines Roboters gegeben. Fertigen Sie eine Zeichnung der Koordinatensysteme an.
- f) ★ Erstellen Sie eine Funktion die aus gegebenen Gelenkwinkelstellungen die Kräfte und Drehmomente berechnet, die von der Gravitation verursacht werden.

$$M = \text{Drehmoment}(q, \text{Gravitationsvektor});$$

Zur Überprüfung:

$$\begin{aligned} q &= [180^\circ \quad 120^\circ \quad 180^\circ \quad 40^\circ] \\ \rightarrow M &= [0 \quad -6,25 \quad 2.429 \quad 0.07645] \end{aligned} \tag{7}$$

2. Impedanzregler

- a) Aus Praktikum 2 soll der Regler mit Trajektorienverfolgung erweitert werden. Implementieren Sie eine Impedanzregelung im Gelenkraum. Die Funktion zur Berechnung des Gravitationseinflusses wird zur Verfügung gestellt.
- b) Erweitern Sie den Regler so, dass nach dem Erreichen der Endposition der Trajektorie, der Regler für eine vorgegebene Zeit weiterregelt.
- c) Testen Sie unterschiedliche Werte für die Parameter c , d und m . Wie verändern sich die Eigenschaften des Roboters? Wie ändert sich die Positionsgenauigkeit?
- d) Fügen Sie eine Funktion hinzu, die es erlaubt den Roboter komplett weich zu schalten und währenddessen sollen die Positionswerte aufgezeichnet werden.
- e) Benutzen Sie den Regler aus b) für die aufgezeichneten Werte, sodass die Trajektorie der aufgezeichneten Werte nachgefahren wird.