

Komfortzone mobiler Manipulatoren

Comfort Zone of Mobile Manipulators

Martin Sereinig, Peter Manzl, Johannes Gerstmayr
Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck, Österreich
{martin.sereinig, peter.manzl, johannes.gerstmayr}@uibk.ac.at

Kurzfassung

Motiviert durch ein Anwendungsbeispiel wird die Komfortzone für mobile, kinematisch redundante Manipulatoren definiert. Die Lage und Orientierung der Basis des Manipulators und die Gelenkwinkel werden so gewählt, dass ausgesuchte Zielfunktionen minimal werden. Diese Zielfunktionen werden aus bekannten Maßen wie kartesische Geschwindigkeit, Kraft und Steifigkeit abgeleitet. Sie werden abhängig von den Parametern der Basis und den Gelenkwinkeln des Manipulators bestimmt, wobei nur ein Unterraum an möglichen Konfigurationen aufgrund der vorgegebenen Lage und Orientierung des Endeffektors (EE) für die Optimierung frei wählbar ist. Es werden im Sinne der multikriteriellen Optimierung Pareto-Fronten errechnet, welche durch vordefinierte Grenzen (z.B. minimale erreichbare Kraft oder minimale erreichbare Geschwindigkeit) begrenzt werden.

Abstract

Motivated by an application example, the comfort zone for mobile kinematically redundant manipulators is defined. The position and orientation of the mobile platform (=base of the manipulator) and the joint angles are selected in such a way that selected target functions are minimized. These objective functions are derived from known measures such as Cartesian velocity, force and stiffness. The objective functions are evaluated depending on the parameters of the base and the joint angles of the manipulator, whereby only a subspace of possible configurations is freely selectable for optimization due to the given position and orientation of the end effector (EE). Pareto-fronts are calculated in the sense of multi-criteria optimization, which are limited by, e.g., minimum achievable force or minimum achievable speed.

1 Einleitung

Kinematisch redundante Robotersysteme sind im Bereich mobiler Roboter kaum zu vermeiden, da oftmals serielle Manipulatoren mit Freiheitsgrad sechs (und größer) auf mobilen Plattformen mit (Positions-)Freiheitsgrad drei montiert werden [1]. Zur Berechnung der inversen Kinematik bei vorgegebener Position und Orientierung des Endeffektors (EE) muss die kinematische Redundanz berücksichtigt werden [2, 3]. Im Gegensatz zu nicht-redundanten, stationären Industrierobotern können redundante Roboter während einer Bewegung der Basis die Konfiguration des EE beibehalten. Eine weitere mögliche Ausnutzung der Redundanz besteht darin, einem Objekt auszuweichen, während der EE einer bestimmten Bahn folgt. Die Platzierung der Basis stationärer Manipulatoren kann aufgrund des Arbeitsraums oder durch Erfahrung und Intuition erfolgen [4]. Mobile Manipulatoren bieten die Möglichkeit, diese Wahl jederzeit zu ändern und auf die Aufgabe abzustimmen. Moderne mobile Roboter können für den Einsatz in der Industrie mit sogenannten nachgiebigen Manipulatoren ausgestattet sein. Diese Art von Manipulatoren sind speziell entwickelt worden, um das Arbeiten von Mensch und Maschine auf engem Raum gleichzeitig zu ermöglichen (vgl. ISO15066 und ISO10218), wobei auch eine physische Interaktion zulässig ist. Mit einigen zusätzlichen Einschränkungen in Bezug auf Geschwindigkeit, Kraft und Drehmoment werden so kombinierte Systeme als kollabo-

orative mobile Manipulatoren bezeichnet. Ein Mensch kennt von Natur aus den Arbeitsbereich seiner Arme und ist dazu in der Lage, Aufgaben optimal durchzuführen. So wird beispielsweise das Lötten auf einer Leiterplatte mit gebogenen Ellbogen vor dem Körper durchgeführt, um eine gute Sicht und optimale Lage des Werkzeugs sowie des Lötendrahts zu haben – man begibt sich also in eine Komfortzone für diese Aufgabenstellung. Dabei kann der Mensch die in seinem Arm vorhandene kinematische Redundanz [5] auch instinktiv ausnutzen, um die gestellte Aufgabe zu erfüllen. Bei mobilen Manipulatoren bezeichnen wir als Komfortzone eine aufgabenabhängige Konfiguration des Systems, welche einen für die Aufgabenstellung optimalen Konfigurationsraum ermöglicht. Um die aufgabenabhängige Komfortzone für mobile Manipulatoren zu bestimmen, sollen nun verschiedene in der Literatur beschriebene Kriterien der Bewegungsfähigkeiten von Robotersystemen untersucht und verglichen werden ([6], S. 235–245). Für die Untersuchungen wird ein vereinfachtes System (serieller PP3R-Manipulator in der Ebene) wie in Abschnitt 6 gezeigt verwendet.

2 Anwendungsszenario

Verschiedene Fertigungs- und Zusammenbauschnitte in der heutigen Industrie werden nach wie vor von Hand durchgeführt. Dabei wird die Flexibilität und Geschicklichkeit der menschlichen Arbeitskräfte ausgenutzt, um unterschiedliche Produkte zu fertigen. Der Einsatz von mobilen

kollaborierenden Robotersystemen könnte diese Arbeiten übernehmen und solche Systeme wären gleichzeitig flexibel einsetzbar und auf unterschiedliche Problemstellungen leicht anpassbar. Für ein Robotersystem, das den Menschen bei seiner Tätigkeit unterstützt, lässt sich nicht immer nur eine einzige Aufgabe festlegen. Werden wahlweise mehrere Aufgaben (Positionieren, Halten oder Pressen) gefordert, so lässt sich mit dem Ausnutzen der Komfortzone eine (pareto-)optimale Platzierung der Roboterbasis finden, die ein schnelles Reagieren auf unterschiedliche Aufgaben zulässt.

Ein Anwendungsbeispiel ist in der Endmontage mechatronischer Komponenten zu finden. Dabei kann der mobile Roboter die Basiskomponente festhalten und diese zur effizienten Montage im Raum positionieren und orientieren. Werden zusätzliche Komponenten an dieses erste Bauteil angebracht (z.B. durch Schrauben, Kleben oder Pressen), muss die jeweilige Position bzw. Orientierung gehalten und eine entsprechende Gegenkraft aufgebracht werden. Es ist daher für diese Aufgabenstellung anzustreben, dass sich die Gelenkkonfiguration in der Komfortzone befindet, in der eine ausreichend hohe Kraft zum Pressen zur Verfügung steht, während die Handhabungsaufgaben mit hoher Geschwindigkeit erfolgen können.

3 Kinematische Grundlagen

Vor der Einführung der unterschiedlichen Maße zur Charakterisierung der Bewegung von Robotersystemen werden in diesem Kapitel kurz die dafür notwendigen kinematischen Grundlagen zusammengefasst.

3.1 Vorwärtskinematik, Jacobi Matrix

Ein Robotersystem mit g translatorischen und h rotatorischen Gelenken besitzt $n = g + h$ Freiheitsgrade. Mit $q_i \in \mathbb{C}$, wobei $\mathbb{C} \subset \mathbb{R}^g \times \mathbb{S}^h$, mit $i = 1, \dots, n$ werden die Gelenkkordinaten des Systems bezeichnet, wobei \mathbb{C} die (mechanische) Beschränkung der Gelenkkordinaten berücksichtigt. Die Pose (Position und Orientierung) des EE im Arbeitsraum kann mit $\xi_j \in \mathbb{T}$, $\mathbb{T} \subset SE(3)$, $j = 1, \dots, m_T$, Koordinaten beschrieben werden. \mathbb{R} beschreibt alle reellen Zahlen, \mathbb{S} alle Winkel des Kreises zwischen 0 und 2π und $SE(3)$ steht für die Euklidische Gruppe im dreidimensionalen Raum. Die Pose der Basis lässt sich durch $\zeta_k \in \mathbb{T}$, beschreiben, wobei $k = 1, \dots, m$.

Der kinematische Zusammenhang zwischen den Koordinaten q_i und den Koordinaten ξ_j des EE ergibt sich aus der Vorwärtskinematik,

$$\xi = f_v(q) \quad (1)$$

wobei

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad (2)$$

und

$$\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_m]^T \in \mathbb{R}^m \quad (3)$$

gilt. Ist $n > m$, so spricht man von einem kinematisch redundanten System mit einer Redundanz [7] von $f_r = n - m$. Auf Geschwindigkeitsebene lässt sich eine Relation zwi-

schen Endeffektorgeschwindigkeit v ,

$$\dot{\xi} = v = [\dot{\xi}_1 \quad \dot{\xi}_2 \quad \dots \quad \dot{\xi}_m]^T \in \mathbb{R}^m \quad (4)$$

und den Gelenkgeschwindigkeiten \dot{q} ,

$$\dot{q} = [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dots \quad \dot{q}_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad (5)$$

über die Jacobimatrix des Systems

$$v = J(q)\dot{q} \quad (6)$$

herstellen. Dabei wird

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = [\dot{q}_1 \quad \dots \quad \dot{q}_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad (7)$$

und die Jacobimatrix $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ als

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

definiert. In weiterer Folge wird zur einfacheren Lesbarkeit $J(q) = J$ geschrieben.

4 Maße zur Charakterisierung von Robotersystemen

Im folgenden Kapitel werden vier Maße zur Charakterisierung der Bewegung von Robotersystemen (mobile und Stationäre Roboter) näher beschrieben.

4.1 Erreichbarkeit (Reachability)

Makhal und Goins beschreiben in [4] das *ROS (Robot Operating System) Softwarepaket: reuleaux*. Dort wird eine diskrete Karte des Arbeitsraumes verwendet, in der alle vom EE erreichbaren Posen verzeichnet sind. Mit der inversen Erreichbarkeitskarte (IRM) können Posen der Basis für eine bestimmte Aufgabe gefunden werden. Kollisionen mit Hindernissen sowie die Qualität (z.B. hinsichtlich Singularitätsvermeidung, Gelenkgeschwindigkeiten oder Genauigkeit) der verwendeten Gelenkkonfiguration werden durch Makhal und Goins nicht berücksichtigt. Darauf aufbauend wird hier der durch Hindernisse nicht erreichbare Gelenkwinkelraum aus der IRM ausgenommen.

4.2 Geschwindigkeitsmanipulationsmaß (Velocity manipulability measure)

Das hier genutzte Geschwindigkeitsmanipulationsmaß basiert auf dem durch Yoshikawa in [8] beschriebenen 'manipulability measure'. Dabei wird die Jacobimatrix J des Systems, welche eine Umrechnung der Geschwindigkeiten des Gelenkwinkelraums auf den Arbeitsraum ermöglicht (siehe Glg. (6)), genutzt.

Ausgehend von normierten Gelenkgeschwindigkeiten

$$\dot{q}^T \dot{q} = 1 \quad (9)$$

und durch Einsetzen von Glg. (6) erhält man

$$v^T (JJ^T)^{-1} v = 1. \quad (10)$$

Glg. (10) repräsentiert dabei Punkte an der Oberfläche

eines sechsdimensionalen Ellipsoiden im Endeffektorgeschwindigkeitsraum [9]. Davon ausgehend wird das Geschwindigkeitsmanipulationsmaß m_v wie folgt definiert:

$$m_v(\mathbf{q}) = \sqrt{\det(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)}. \quad (11)$$

Ist $m = n$, d.h. es handelt sich bei \mathbf{J} um eine quadratische Matrix, ließe sich das Geschwindigkeitsmanipulationsmaß alternativ als

$$m_v(\mathbf{q}) = \|\det(\mathbf{J})\| \quad (12)$$

ableiten, was wir im Weiteren nicht annehmen.

Das Maß Glg. (11) ist proportional zum Volumen des Geschwindigkeitsellipsoiden [8, 10], dessen Halbachsen den Quadratwurzeln der Eigenwerte von $\mathbf{A}_v = \mathbf{J}\mathbf{J}^T$ entsprechen und in die Richtung der Eigenvektoren von \mathbf{A}_v zeigen. Da sich in der Nähe einer singulären Konfiguration das Geschwindigkeitsellipsoid zunehmend staucht und in der Singularität das Volumen desgleichen verschwindet, kann durch Verwendung des Geschwindigkeitsmanipulationsmaßes auch die Entfernung zu einer singulären Lage bewertet werden.

Das gezeigte Geschwindigkeitsellipsoid ergibt ein quantitatives Maß für die Fähigkeit des EE sich in beliebige Richtungen zu bewegen. Größere Werte von m_v stellen eine größere Freiheit für die Bewegung des EE in der spezifische Konfiguration dar.

4.3 Kraftmanipulationsmaß (Force manipulability measure)

Gleichermaßen können die erreichbaren Kräfte und Momente des EE über das sogenannten Kraftellipsoid dargestellt werden [11, 12]. Die Form des Kraftellipsoids ist durch die Eigenwerte und Eigenvektoren von $\mathbf{A}_f = (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ gegeben. Die Eigenvektoren zeigen demnach in die selbe Richtung wie die des Geschwindigkeitsellipsoids, die Eigenwerte sind reziprok zu denen des Geschwindigkeitsellipsoids. Aus der so definierten quadratischen Matrix $\mathbf{A}_f = (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ wird das Kraftmanipulationsmaß m_f mit

$$m_f = \sqrt{\det(\mathbf{A}_f)} = \sqrt{\det((\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1})} \quad (13)$$

gebildet.

4.4 Steifigkeitsmaß

Da bei der Verwendung von kollaborativen Manipulatoren auch die Steifigkeit berücksichtigt werden muss, wird im folgendem Abschnitt ein Maß für die kartesische Steifigkeit des EE genutzt. Die einzelnen Gelenksteifigkeiten k_i mit $i = 1, \dots, n$ werden in einer Gelenksteifigkeitsmatrix

$$\mathbf{K}_q = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

zusammengefasst. Wie durch Busson in [13] und Dumas in [14] beschrieben, lässt sich die Gelenksteifigkeit \mathbf{K}_q mit-

hilfe der Jacobimatrix zur kartesischen Steifigkeit

$$\mathbf{K}_x = (\mathbf{J}\mathbf{K}_q^{-1}\mathbf{J}^T)^{-1} \quad (15)$$

umrechnen, wobei hier die von der Endeffektorkraft (bzw.-moment) abhängigen zusätzlichen Terme vernachlässigt werden, da sie meistens klein sind [14].

Die durch die Glg. (15) beschriebene kartesische Steifigkeit kann analog zu Abschnitt 4.2 auch als Steifigkeitsellipsoid [15, 16] dargestellt werden. Die Eigenwerte λ von \mathbf{K}_x entsprechen den Längen der Hauptachsen des Ellipsoiden und können somit zur Charakterisierung der Steifigkeit herangezogen werden. Hier wird der kleinste Eigenwert der Matrix als Steifigkeitsmaß

$$m_{st}(\mathbf{q}) = \min(\text{eig}(\mathbf{K}_x)) \quad (16)$$

gewählt. Dieses Maß wird hier verwendet um eine allgemeine Lage des EE, ohne spezifische Vorgaben, zu erreichen. Durch das einbringen von Vorgaben, wie gewünschte externe Kräfte bzw. Momente, kann anstelle des genutzten Maß das durch Tian et al. in [17] beschriebene Maß verwendet werden. Dabei ist die Nutzung eines von der kartesischen Steifigkeit und dem externen Kraftvektor abhängigen Maß um eine Schleifaufgabe und damit Notwendig- die genaue Vorgabe der Krafrichtung- gezeigt.

5 Komfortzone für mobile redundante Roboter

Das in **Bild 1** skizzierte Szenario stellt eine mobile Roboterplattform in der Ebene dar, deren EE den Zielpunkt $\mathbf{P}_Z = [x_z \ y_z]^T$ anfahren soll. Die möglichen Positionen der Basis werden durch den Arbeitsraum des mobilen Manipulators und die Umgebung z.B. durch Wände (Dunkelgrau) oder Hindernisse (Rot) eingeschränkt.

Sind ein Punkt und eine Orientierung des EE gegeben, so lässt sich die Basis im gewählten Beispiel innerhalb eines Kreisabschnitts positionieren. Werden für die gleiche Position unterschiedliche Orientierungen zugelassen, ist der mögliche Bereich durch die Schnittmenge mehrerer Kreissegmente, wie im Bild hellgrau schattiert, definiert.

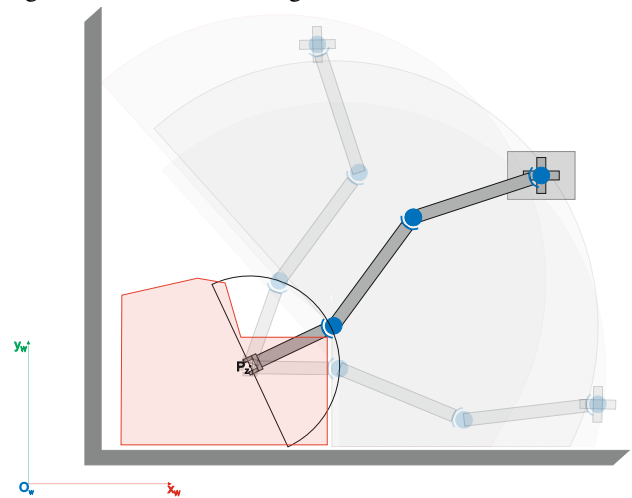


Bild 1 Mobiler Manipulator mit möglicher Platzierung der mobilen Basis.

5.1 Einschränken des Arbeitsraumes

Durch diese Untersuchung des Arbeitsraumes des mobilen Manipulators lässt sich der Gelenkwinkelraum, den das System für diesen Endpunkt einnehmen kann, einschränken. Dies soll im Rahmen des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Ansatzes erfolgen. Dieser Ansatz wird durch das Berücksichtigen von Positionen welche die mobile Basis aufgrund von Hindernissen nicht einnehmen kann erweitert und verkleinert somit den Arbeitsraum des mobilen Manipulators. Der nun verbleibende Gelenkwinkelraum

$$\mathbf{C}_E \subset \mathbf{C} \quad (17)$$

führt zum gleichen Ziel des EE im verbleibenden EE-Arbeitsraum $\mathbf{T}_E \subset \mathbf{T}$.

5.2 Multikriterielle Optimierung bezüglich gewählter Kriterien

Eine allgemein optimale Wahl der Gelenkkonfiguration kann ohne weitere Vorgaben nicht getroffen werden, da sich die einzelnen Kriterien gegenseitig beeinflussen bzw. konkurrierendes Verhalten aufweisen [18]. Zum Beispiel zeigt das untersuchte Geschwindigkeitsmanipulationsmaß m_v genau reziprokes Verhalten zum Kraftmanipulationsmaß m_f , wie in Abschnitt 4 dargestellt und in den Gleichungen 11 und 13 ersichtlich. Deshalb wird eine Pareto-Optimierung bezüglich der untersuchten Kriterien durchgeführt. Die aus der Optimierung erhaltene Pareto-Front ergibt eine Menge pareto-optimaler Konfigurationen

$$\mathbf{C}_{PO} \subset \mathbf{C}_E \quad (18)$$

des Manipulators und der mobilen Basis.

5.3 Zielfunktionen

Die in Abschnitt 4 beschriebenen Maße, bezüglich Geschwindigkeit, Kraft und der kartesischen Steifigkeit sollen nun in die Optimierung eingehen. Die genutzte Pareto-Optimierung arbeitet mit der Minimierung der normierten Zielfunktionen. Da im allgemeinen

$$\max(f(x) = -\min(-f(x))) \quad (19)$$

gilt, ergeben sich daraus drei Zielfunktionen:

$$f_{mv} = \frac{-1}{m_{vMax}} m_v(\mathbf{q}) \quad (20)$$

$$f_{mf} = \frac{-1}{m_{fMax}} m_f(\mathbf{q}) \quad (21)$$

$$f_{st} = \frac{-1}{m_{stMax}} m_{st}(\mathbf{q}) \quad (22)$$

die im Vektor $\mathbf{f}_{Ziel} = [f_{mv}(\mathbf{q}), f_{mf}(\mathbf{q}), f_{st}(\mathbf{q})]^T$ zusammengefasst werden. Es ergibt sich ein Zielraum $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$ indem das Problem veranschaulicht werden kann. Durch die so definierten Zielfunktionen kann der Gelenkwinkelraum des mobilen Manipulators in den Zielraum abgebildet werden und es gilt:

$$\text{vec } \min(\mathbf{f}_{Ziel}(\mathbf{q})), \text{ sodass } \mathbf{q} \in \mathbf{C}_{PO} \quad (23)$$

und

$$\mathbf{f}_{Ziel} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^3 \text{ mit } f_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \text{ für } k = 1, \dots, 3 \quad (24)$$

Somit ist \mathbf{C}_{PO} der Raum aller Gelenkkonfigurationen die zulässig sind und auch ein Pareto-Optimum darstellen.

5.4 Fallunterscheidung und Selektion der Lösungen = Komfortzone

Es werden zwei Fälle unterschieden:

1. Ist die Aufgabe bekannt, kann eine Gelenkkonfiguration eingenommen werden, die diese bestmöglich erfüllt und auf der Pareto-Front liegt (solange die Aufgabe nichts anderes erfordert).
2. Ist die Aufgabe nicht bekannt, muss eine Auswahl der Lösungen durchgeführt werden. Dabei werden alle Gelenkkonfigurationen aus \mathbf{C}_{PO} (siehe Glg. (18)), die zu einem Punkt führen, der auf der Pareto-Front liegt herangezogen und die zugehörigen Maße (Geschwindigkeit, Kraft und Steifigkeit) mit Schranken versehen. Als untere Schranke wird jeweils die minimale Komponente des

$m_{v,u} \dots$ kartesischen Geschwindigkeitsmaß,
 $m_{f,u} \dots$ kartesischen Kraftma und
 $m_{st,u} \dots$ kartesischen Steifigkeitsmaß

festgelegt.

Eine Lösung \mathbf{q}^* kann somit ausgewählt werden mit $\mathbf{q}^* \in \mathbf{C}_Z$,

$$\mathbf{C}_Z \subset \mathbf{C}_{PO} \quad (25)$$

und

$$\{\mathbf{q}^* | m_v(\mathbf{q}^*) \geq m_{v,u}, \quad (26)$$

$$m_f(\mathbf{q}^*) \geq m_{f,u},$$

$$m_{st}(\mathbf{q}^*) \geq m_{st,u}\}.$$

Damit leitet sich \mathbf{C}_Z als Komfortzone für mobile Manipulatoren ab.

6 Beispiel: Planarer PP3R-Manipulator

In folgendem Kapitel soll die Komfortzone für mobile Manipulatoren anhand eines Beispiels dargestellt werden. Es wird ein serieller PP3R-Manipulator in der Ebene, mit 2 translatorischen und 3 rotatorischen Gelenken entsprechend **Bild 2**, mit einem Freiheitsgrad $f_{PP3R} = 5$ verwendet. Die Simulationsparameter können aus Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1 Roboterparameter verwendet in der Simulation.

Parameter	Zeichen	Wert
Länge Arm 1	a_1	1m
Länge Arm 2	a_2	1m
Länge Arm 3	a_3	0.5m
Länge Basis	b_1	0.8m
Breite Basis	b_2	0.4m
Ziel Pose EE	ξ^{Ziel}	$[0\text{m}, 0\text{m}, (-\frac{\pi}{4} \leq \xi_3 \leq \frac{\pi}{4})\text{rad}]^T$
Tischgröße	$l_T \times b_T$	$2\text{m} \times 1.5\text{m}$
Position Tisch	x_{Tisch}	$[0\text{m}, 0\text{m}]^T$

Im Beispiel sollen alle Konfigurationsmöglichkeiten für einen Zielpunkt ermittelt werden. Diese werden durch die Nutzung der in Kapitel 4 diskutierten Maße so eingeschränkt, dass sich der Manipulator dabei im pareto-optimalen Bereich befindet. Es werden keine dynamischen Bewegungen ausgeführt, die Untersuchung findet auf rein kinematischer Ebene statt. Der Arbeitsraum wird durch Hindernisse wie in **Bild 1** (rot) gezeigt eingeschränkt. Ziel ist es, die Komfortzone für mobile Roboter anhand des Beispiels darzustellen.

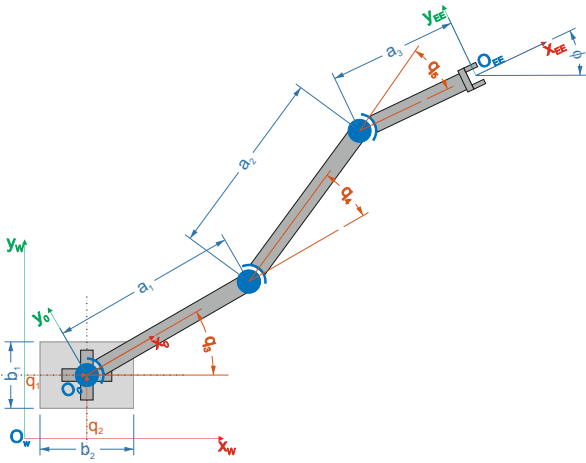


Bild 2 Skizze des verwendeten PP3R-Manipulators in der Ebene.

6.1 Kinematik: Planarer PP3R-Manipulator

Die generalisierten Koordinaten dieses Systems sind $q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T = [x_B, y_B, \phi_1, \phi_2, \phi_3]^T$ mit $q \in \mathbf{C}$. Der Gelenkwinkelraum kann somit als $\mathbf{C} \subset \mathbb{R}^2 \times \mathbb{S}^3$ definiert werden. Es ist bekannt, dass die Lage des EE in der Ebene durch zwei Koordinaten $\mathbf{O}_{EE} = [x_{EE}, y_{EE}]^T$ und einen Winkel ϕ definiert ist. Diese können im Vektor $\xi = [x_{EE}, y_{EE}, \phi_{EE}]^T = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]^T \subset SE(2)$ zusammengefasst werden und ergeben somit einen Freiheitsgrad von $f_{Ebene} = 3$. Die Position der Basis wird mit den Koordinaten $\zeta = [x_B, y_B]^T = [q_1, q_2]^T \subset SE(2)$ beschrieben. Wird die Orientierung des EE nicht berücksichtigt, ergibt sich aus der vorhandenen Konfiguration ein kinematisch redundanter mobiler Manipulator mit einer Redundanz von $f_{r1} = f_{PP3R} - f_{Ebene} = 5 - 2 = 3$. Wird die Orientierung des EE zusätzlich in Betracht gezogen, bleibt eine kinematische Redundanz von $f_{r2} = 2$.

Die Vorwärtskinematik des gezeigten PP3R-Manipulator

lässt sich mit Glg. (27) berechnen. Wobei $s(\alpha) = \sin(\alpha)$ und $c(\alpha) = \cos(\alpha)$ gilt.

$$f(q) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 + a_3 c(q_3 + q_4 + q_5) + a_2 c(q_3 + q_4) + a_1 c(q_3) \\ q_2 + a_3 s(q_3 + q_4 + q_5) + a_2 s(q_3 + q_4) + a_1 s(q_3) \\ q_3 + q_4 + q_5 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Durch die Jakobimatrix (vgl. 6) lässt sich der Zusammenhang zwischen Gelenkgeschwindigkeiten und EE-Geschwindigkeiten über die Gleichung

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = J\dot{q} \quad (28)$$

herstellen.

6.2 Komfortzone: Planarer PP3R-Manipulator

Zur Veranschaulichung der Erreichbarkeit [4] wird der Arbeitsbereich in x- und y-Richtung diskretisiert. Diese Vorgangsweise ist im Allgemeinen, speziell bei höherer Dimension des Problems, nur mit unvertretbarem Rechenaufwand durchführbar, und wird daher nur zur Darstellung verwendet.

Zu jedem Punkt i wird für N_i diskretisierte Orientierungen des EE die inverse Kinematik ausgewertet. Das Erreichbarkeitsmaß

$$D_i = \frac{R_i}{N_i} \quad (29)$$

wird als Verhältnis der erreichbaren Orientierungen R_i zu den untersuchten Orientierungen errechnet. Diese Kennzahl bezieht sich auf einen Punkt in der Ebene.

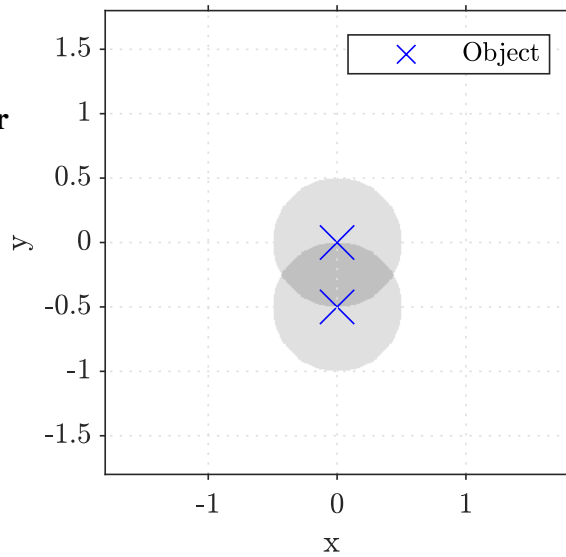


Bild 3 Die Schnittmenge der Kreise zeigt die möglichen Basispositionen um $\mathbf{P}_{z,1}$ und $\mathbf{P}_{z,2}$ mit den Parametern $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ und $D = 1$ zu erreichen.

Die Menge der Punkte i mit $D(i) = 1$, welche mit der Basisposition $[q_1, q_2]^T$ erreicht werden können, bilden einen Kreis beschrieben durch

$$K_p = \{x, y \in \mathbb{R} \mid (x - q_1)^2 + (y - q_2)^2 - (a_1 + a_2 - a_3 - |a_1 - a_2|) = 0\}, \quad (30)$$

wobei a_i die Länge des i -ten Gliedes ist.

Für die inverse Erreichbarkeit eines Zielpunktes \mathbf{P}_z ergibt sich die Vereinigung aller Mengen K_p für welche gilt $\mathbf{P}_z \in K_p$. Die so gebildete Menge M ist wiederum ein Kreis mit dem Mittelpunkt \mathbf{P}_z .

Sollen p Punkte erreicht werden ohne die Basis neu zu positionieren, so wird die Menge der Basispositionen als Vereinigung

$$M = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_p \quad (31)$$

gebildet. Zur einfachen Verwendung der Mengen im Algorithmus wird die Ebene mit Pixeln diskretisiert. Die Vereinigung der Mengen werden so als Kreisschnitte dargestellt, zu sehen in **Bild 3**.

Bild 4 Zeigt den Verbleibenden Arbeitsraum des mobilen Manipulators um die Zielpose ξ_{Ziel} zu erreichen.

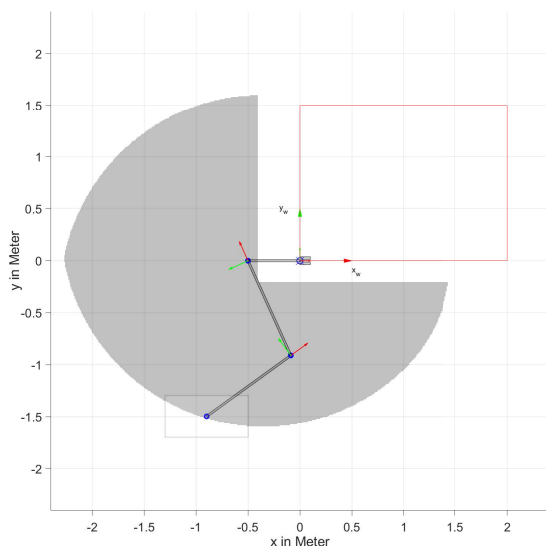


Bild 4 Mögliche Basispositionen bei Gewünschter EE Pose ξ_{Ziel} .

Der daraus resultierende diskrete Gelenkwinkelraum wird in **Bild 5** dargestellt. Zur Diskretisierung wurden hier eine Schrittweite von $\delta x = \delta y = 0.1\text{m}$ in (x,y) -Richtung und $\delta\phi = \frac{\pi}{2 \cdot 20}$ rad als EE-Orientierung gewählt. Daraus resultieren 18144 mögliche Konfigurationen die der mobile Manipulator einnehmen kann.

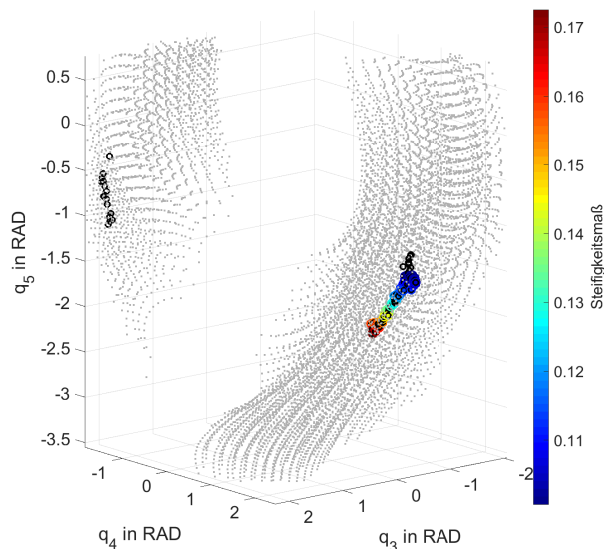


Bild 5 Diskretisierter Gelenkwinkelraum (q_3, q_4, q_5) bei gewünschter EE Pose ξ_{Ziel} (grau); Pareto-Front (farbig + schwarz); Komfortzone (farbig).

6.3 Optimierung

Im Beispiel wird zur multikriteriellen Optimierung die Matlab Funktion *gamultiobj* verwendet. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsverfahren basierend auf dem NSGA-II Algorithmus (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) [19]. Wie durch Hassan et.al in [20] beschrieben, eignet sich dieser Algorithmus im Speziellen für Probleme vorliegender Art. Dabei werden Optimierungsparameter und Grenzen wie in Tabelle 2 verwendet.

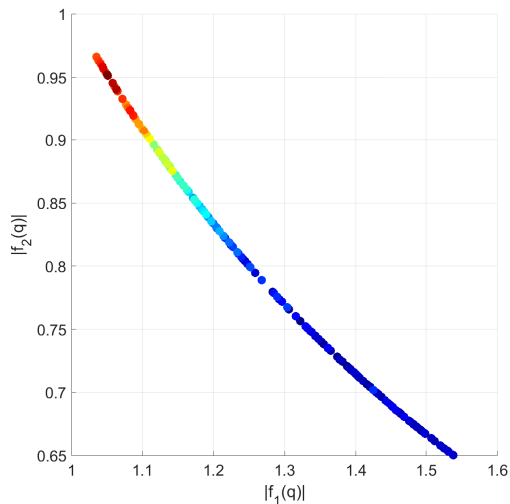
Tabelle 2 Parameter, genutzt in der multikriteriellen Optimierung

Parameter	Zeichen	Wert
u. Grenzen von \mathbf{q}	\mathbf{q}_u	$[-4, -4, -\pi, -\pi, -\pi]^T$
o. Grenzen von \mathbf{q}	\mathbf{q}_o	$[4, 4, \pi, \pi, \pi]^T$
max. Geschwindigkeitsmaß	$m_{v,o}$	2.634
min. Geschwindigkeitsmaß	$m_{v,u}$	0.26
max. Kraftmaß	$m_{f,o}$	42
max. Steifigkeitsmaß	$m_{st,o}$	0.98

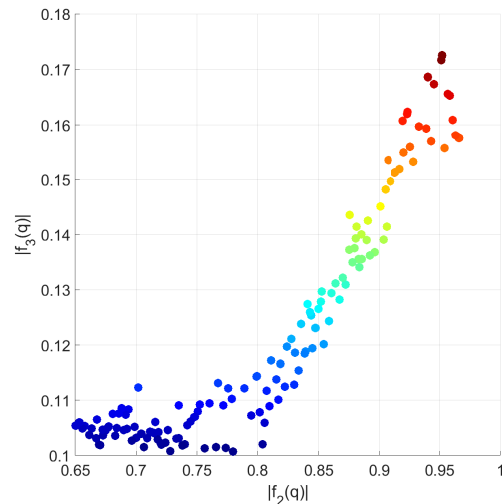
Die durchgeführte Pareto-Optimierung liefert nun die im **Bild 6b** dargestellte Pareto-Front in (y,z) -Ansicht (Geschwindigkeits- und Steifigkeitsmaß) im 3-Dimensionalen Zielraum. Geschwindigkeits- und Steifigkeitsmaß sind dabei auf -1 Normiert dargestellt (je kleiner desto besser). Als nichtlineare Randbedingungen für die Optimierung wurde die Vorwärtskinematik (Glg. (27)) genutzt. Dadurch kann sichergestellt werden das der Zielpunkt und die Zielorientierung eingehalten wird. Zusätzlich wurden die Einschränkungen durch den Tisch mittels zusätzliche Ungleichungen berücksichtigt.

6.4 Selektion der Lösungen = Komfortzone

Aus der resultierenden Pareto-Front werden nun jene Punkte ausgewählt die zwischen den Grenzwerten liegen. Hier wurde für das Geschwindigkeitsmaß mindestens 30% und für das Steifigkeitsmaß mindestens 90% des möglichen



(a) Zielfunktion $|f_1(\mathbf{q})|$ (Geschwindigkeit) und $|f_2(\mathbf{q})|$ (Kraft)



(b) Zielfunktion $|f_2(\mathbf{q})|$ (Geschwindigkeit) und $|f_3(\mathbf{q})|$ (Steifigkeit)

Bild 6 Zielraum in drei unterschiedlichen Ansichten.

Maximalwertes herangezogen. In **Bild 7** wird die dreidimensionale Zielfunktion dargestellt. Der Gewählte Bereich (die Komfortzone) ist farbig, Abhängig vom jeweiligen Steifigkeitsmaß, markiert. **Bild 8** zeigt die dazu passenden Positionen der Basis, sowie zwei zugehörige Armkonfigurationen. Dabei ist die Konfiguration $q^* = [-1.0852, -0.8183, -0.3842, 2.2476, -1.3717]$ jene mit dem niedrigsten und die Konfiguration $q^{**} = [-1.2276, -0.8268, -0.0353, 1.8810, -2.0352]$ jene mit dem höchsten Steifigkeitsmaß.

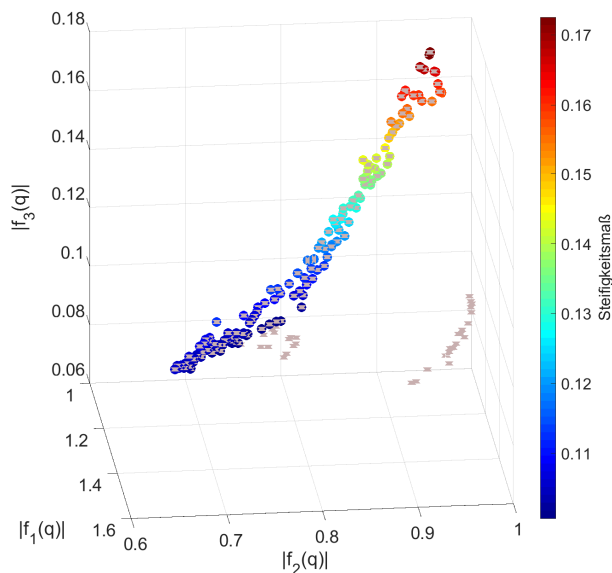


Bild 7 Pareto-Front im Zielraum (grau) mit den Absolutwerten der Zielfunktionen $|f_1(\mathbf{q})|$, $|f_2(\mathbf{q})|$ und $|f_3(\mathbf{q})|$ mit Komfortzone (farbig).

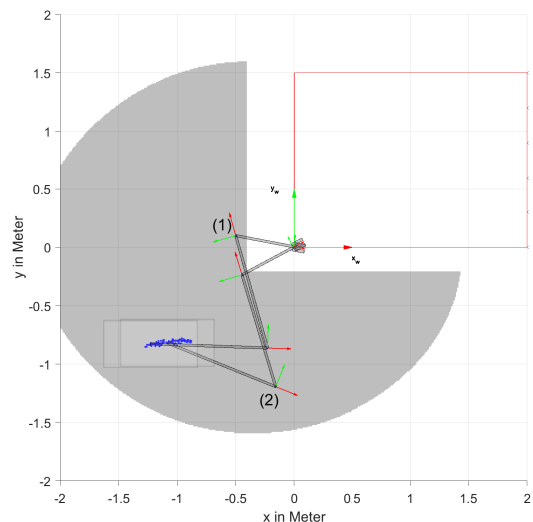


Bild 8 Alle möglichen Basispositionen der gewählten Komfortzone (blau) sowie zwei mögliche Armkonfigurationen mit höchstem (1) und niedrigstem (2) Steifigkeitsmaß.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden mögliche Maße zur Charakterisierung von Roboterarbeiten in Bezug auf die kartesische Geschwindigkeit, Kraft und Steifigkeit, bekannt aus der Literatur, aufgegriffen und untersucht. Durch eine Pareto-Optimierung von Zielfunktionen basierend auf den untersuchten Maßen werden mögliche Konfigurationen, und somit die Platzierung der Basis, eines mobilen Manipulators ausgewählt und als Komfortzone definiert. Die ausgeführte Arbeit dient als

Ausgangspunkt für weitere Schritte zur Ausarbeitung einer Komfortzone für mobile kinematisch redundante Manipulatoren. In nachfolgenden Untersuchungen sollen die gewählten Maße erweitert werden. Da hier nur ein rein kinematischer Vorgang untersucht wurde, wird zukünftig ein besonderes Augenmerk in die Bewertung der Dynamik gelegt. Darüber hinaus werden auch weitere Untersuchungen des Steifigkeitsmaß erfolgen. Dabei soll nicht nur die kartesische Steifigkeit des Systems sondern auch Kippsteifigkeiten im Fokus liegen. Eine Erweiterung bzw. neue Interpretation der genutzten Kriterien in Bezug auf Sicherheit (Mensch/Maschine Kollaboration) und Materialverschleiß soll ebenfalls durchgeführt werden.

8 Literatur

- [1] O. Khatib, "Mobile manipulation: The robotic assistant," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 175 – 183, 1999. Field and Service Robotics.
- [2] S. Chiaverini, "Singularity-robust task-priority redundancy resolution for real-time kinematic control of robot manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, pp. 398–410, June 1997.
- [3] M. Brandstötter, D. Mirkovic, and M. Hofbaur, "Mobile Manipulation – Eine altbekannte Technologie findet durch sensitive Robotertechnologie Einzug in die Industrie," in *C-AR2017 – Conference on Automation and Robotics*, pp. 1–6, May 2017.
- [4] A. Makhmal and A. K. Goins, "Reuleaux: Robot Base Placement by Reachability Analysis," *ArXiv e-prints*, Oct. 2017.
- [5] Z. Li, J. R. Roldan, D. Milutinovic, and J. Rosen, "The rotational axis approach for resolving the kinematic redundancy of the human arm in reaching movements," in *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 2507–2510, July 2013.
- [6] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [7] H. Hanafusa, T. Yoshikawa, and Y. Nakamura, "Analysis and control of articulated robot arms with redundancy," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 14, no. 2, pp. 1927 – 1932, 1981.
- [8] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3–9, 1985.
- [9] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2013.
- [10] Jin-Oh Kim and K. Khosla, "Dexterity measures for design and control of manipulators," in *Proceedings IROS '91:IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, pp. 758–763 vol.2, Nov 1991.
- [11] K. Lynch and F. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge University Press, 2017.
- [12] C. Melchiorri, "Force manipulability ellipsoids for general manipulation systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 27, no. 14, pp. 235 – 240, 1994. Fourth IFAC Symposium on Robot Control, Capri, Italy, September 19-21, 1994.
- [13] D. Busson, R. Bearee, and A. Olabi, "Task-oriented rigidity optimization for 7 dof redundant manipulators," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14588 – 14593, 2017. 20th IFAC World Congress.
- [14] C. Dumas, S. Caro, M. Cherif, S. Garnier, and B. Furet, "Joint stiffness identification of industrial serial robots," *Robotica*, vol. 30, no. 4, pp. 649–659, 2012.
- [15] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis, and A. Bicchi, "Choosing poses for force and stiffness control," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1483–1490, 2017.
- [16] Y. Guo, H. Dong, and Y. Ke, "Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 35, pp. 69 – 76, 2015.
- [17] Y. TIAN, B. WANG, J. LIU, F. CHEN, S. YANG, W. WANG, and L. LI, "Research on layout and operational pose optimization of robot grinding system based on optimal stiffness performance," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [18] D. Scholz, *Multikriterielle Optimierung*, pp. 169–187. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [19] K. Deb and D. Kalyanmoy, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. USA: John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [20] M. Hassan, D. Liu, and G. Paul, "Collaboration of multiple autonomous industrial robots through optimal base placements," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 90, pp. 113–132, 2018.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

In: **Sechste IFToMM D-A-CH Konferenz 2020**

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/71215

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20200221-123529-4

Alle Rechte vorbehalten.