

Antriebsdimensionierung für einen ebenen rekonfigurierbaren Manipulator mit abrollenden Kontaktelementen

Stefan Kurtenbach*; Marcel Gottschalk**;
Mathias Hüsing***; Burkhard Corves****

RWTH Aachen, Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik

* kurtenbach@igm.rwth-aachen.de

** gottschalk@igm.rwth-aachen.de

*** huesing@igm.rwth-aachen.de

**** corves@igm.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein ebener Manipulator mit abrollenden Kontaktelementen vorgestellt. Diese Kontaktelemente verfügen im Kontaktpunkt über ein Wälzelenk mit einem Freiheitsgrad. In diesem Fall wirken drei Manipulatorarme auf das Objekt und konnektieren sich ausschließlich über Kraftschluss (Reibung). Mit abrollenden Kontaktelementen lassen sich wesentlich größere Objektorientierungen realisieren. In diesem Beitrag wird zunächst auf die Kinematik und anschließend auf die kinetostatische Beschreibung des Manipulators eingegangen.

Abstract

This paper introduces a manipulator with rolling contact elements. These contact elements are realized through a 1-DOF rolling contact joint. Three manipulator arms connect to the object exclusively through friction. Using such rolling contact joints essentially larger object rotations can be realized. This paper starts with introducing the kinematics. Subsequently, the equilibrium conditions are derived to grasp the object safely.

1 Einführung

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Greifertechnik konzentrieren sich immer mehr auf maßgeschneiderte Lösungen, um eine Bewegungsaufgabe ideal durchzuführen. Durch die Spezialisierung entsteht eine sehr breite Palette von unterschiedlichen Greifern, Greifeinheiten und anderen Kontaktelementen.

In diesem Beitrag wird ein auf Kraftschluss basierendes Handhabungsprinzip vorgestellt. Dabei findet der Kraftschluss zwischen einem auf dem Objekt abrollenden Kontaktelement und dem Objekt selbst statt. Damit besteht zwischen dem Objekt und dem Kontaktelement eine einseitige Bindung mit dem Gelenkfreiheitsgrad Eins (Wälzelenk).

Neben der Verwendung von abrollenden Kontaktelementen liegt ein weiterer wesentlicher Unterschied des betrachteten Handhabungssystems im Vergleich zu herkömmlichen Handhabungssystemen darin, dass das zu handhabende Objekt in die kinematische Struktur integriert ist. Das Objekt selbst wird zu einem Getriebeglied und damit Teil der Struktur. Die Struktur des Manipulators ist in Abb. 1 dargestellt. Dadurch wird das gesamte Handhabungssystem (ebener Manipulator) flexibel, rekonfigurierbar und vielseitig [1].

Im vorliegenden Fall besitzt der ebene Manipulator acht Getriebeglieder und neun Einfachgelenke (sechs Drehgelenke und drei Wälzelenke). Nach der Grüblerformel ergeben sich dadurch insgesamt der Freiheitsgrad drei, die entsprechend angetrieben werden müssen, um eine Bewegung des Objektes in einem ebenen Arbeitsraum zu realisieren. Diese Freiheitsgrade werden vom abrollenden Objekt mit zwei zueinander senkrechten Translationen und einer Rotation realisiert. Das Objekt (Glied 3) ist in dieser Konfiguration ein Zylinder, besitzt also eine konstante Krümmung. Drei abrollende Kontaktelemente, die je zu einem Zweischlag gehören, binden das Objekt über je einen Kontaktpunkt in die kinematische Struktur ein. Zur Erzeugung der abrollenden Kontaktbedingung zwischen den Kontaktelementen und dem Objekt ist eine Anpresskraft erforderlich, die über eine nicht dargestellte Zwanglaufsicherung (Anpressmechanismus, Feder, usw.) realisiert wird. Die im Gestell montierten Glieder 1, 5 und 7 sind die Antriebsglieder. Über ihre

Antriebsmomente kann dann die Objektbewegung mit 3 Freiheitsgraden erzeugt werden.

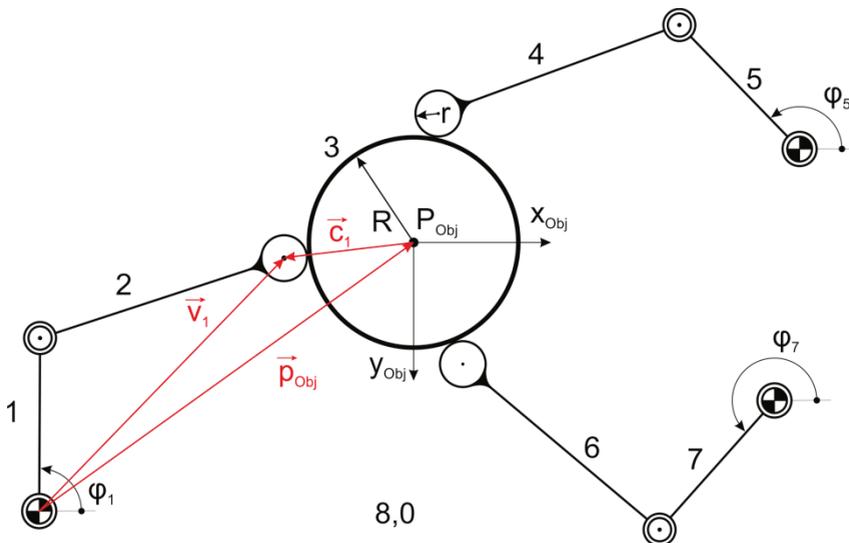


Abb. 1: Kinematische Struktur des Mechanismus

Die Lösung der auf dem in Abb. 1 gezeigten Vektorzug basierenden Vektorgleichung (Gl. 1) wird in den folgenden Kapiteln dargestellt:

$$\vec{v}_1 = \vec{p}_{obj} + \vec{c}_1 \quad (1)$$

2 Stand der Technik

Die Verwendung abrollender Greifer in der Vergangenheit immer wieder vorgeschlagen. Sie sind in verschiedene, sowohl ebene als auch räumliche Roboterstrukturen integriert und passen sich an das Objekt mit unterschiedlichen Formen an.

Cole et. al. zeigt in [2] die Kinematik und Steuerung für die Manipulation eines elliptischen Objekts mit mehreren Roboterarmen. Das Objekt wird im Raum bewegt. Es wird die Kinematik, Dynamik und Steuerung des Systems vorgestellt.

Ponce et. al. untersucht in [3] den Einfluss der Variation der Objektform. Sie fokussieren sich dabei auf n-Polygone, wobei das

abrollende Kontaktelement während der Bewegung auf einer Seite des Polygons bleibt.

Die geschickte Manipulierbarkeit für mehrarmige Roboter ist Gegenstand in [4]. Eine generelle Vorgehensweise wurde für geschickte Manipulation einer Kugel mit flachem Finger entwickelt.

Sowohl Ponce et. al. in [3] als auch Hasegawa in [5] und Yoshida et. al. in [6] untersuchen die Stabilität in Greifprozessen. Hasegawa implementiert einen Bewegungsplanungsalgorithmus für mehrarmige Manipulation mit abrollenden Kontaktelementen in 3D. Dieser Algorithmus schlägt automatisch die optimalen Kontaktpunkte vor, die zu einem stabilen Prozess führen. Yoshida analysiert die Stabilität eines Greifprozesses in dem weiche Fingerspitzen eingesetzt werden.

Jeong et. al. präsentiert in [7] einen ebenen Manipulator mit einem 2D-Arbeitsbereich und eine redundante Ansteuerung mit vier abrollenden Kontaktelementen. Aufgrund dieser Konfiguration ist ein Lösen und Neugreifen möglich, da nur drei Kontaktelemente gleichzeitig im Eingriff sein müssen. Die vier Kontaktelemente und das Objekt verfügen jedoch über eine hohe Nachgiebigkeit, wodurch es zu einer balligen Berührung im Kontaktpunkt kommt.

3 Kinematische Gleichung

Der Mechanismus ist aus den drei in Abb. 1 abgebildeten Zweischlägen zusammengesetzt, die jeweils in der betrachteten Ebene einen punktförmigen Kontakt mit dem zu bewegenden Objekt besitzen. Dabei bewegt sich der Kontaktpunkt auf der Außenkontur des Objektes sowie auf dem Kontaktelement. Die Verbindung wird als schlupffrei angenommen und über eine Abrollbedingung definiert, die von der Kontur beider Körper abhängt.

Da alle drei Manipulatoren dieselbe Konfiguration aufweisen und auch gleiche Randbedingungen besitzen, sind auch die kinematischen Gleichungen analog. Folglich wird das untersuchte System auf den linken Zweischlag mit dem Antriebswinkel φ_1 und das Objekt reduziert. Um die kinematische Gleichung des Zweischlages mit dem Manipulator zu ermitteln, wird die Bewegung in die drei einzelnen ebenen Bewegungen (Translation in x- und y-Richtung und die Rotation um die

z-Achse) aufgeteilt. Die ausführliche Herleitung unter Anwendung des Superpositionsprinzips kann in [8, 9] nachvollzogen werden.

Für die Bewegungsbeschreibung werden mehrere neue Variablen eingeführt, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Der Winkel φ_i beschreibt allgemein die Lage des Gliedes i relativ zum Grundgestell. Wenn beide Winkel φ_1 und φ_2 bekannt sind kann der Vektor v_1 berechnet werden. Um den Vektorzug aus Gl. 1 zu schließen, muss die relative Lage des Objektes und dessen Orientierung bekannt sein. Daraus lässt sich der Vektor c_1 ermitteln.

Tab. 1: Variablen zur Bewegungsbeschreibung

Variable	Beschreibung
φ_1	Antriebswinkel von Glied 1
φ_2	Rotationswinkel von Glied 2
φ_{abroll}	Abrollwinkel des Endeffektors
ψ	Gesamtrotation des Objektes um seine z-Achse
ψ_{abroll}	Abrollwinkel auf dem Objekt
$\psi_{verdreh}$	Verdrehwinkel des Objekts
v_1	Vektor, der die Mitte des Endeffektors vom Gestell aus beschreibt
c_1	Vektor von dem Objektsprung zum Krümmungsmittelpunkt des Endeffektors
Index T	Translation
Index R	Rotation

Die allgemeine Bewegung des Objekts ist eine kombinierte Bewegung, die sich aus translatorischen und rotatorischen Anteilen zusammensetzt. Um die neue Position der Antriebsglieder in Form von $v_{1,nP}$ (neue Position) zu berechnen, muss die Bewegungsaufgabe bekannt sein, die sich aus den Randbedingungen für die neue Objektposition (Δx_{Pobj} , Δy_{Pobj}) und der Objektrotation ψ ergibt. Ausgehend von der Anfangsposition p_{obj} , wird die folgende Gl. 2 für die allgemeine Bewegung aufgestellt.

$$v_{1,nP} = p_{obj} + \Delta p_{obj} + c_{1,translation} + c_{1,verdreh} \quad (2)$$

Die kinematischen Zusammenhänge können den Gl. 3.1 bis Gl. 3.3 entnommen werden. Dabei werden die entsprechenden Einzelterme in [8, 9] ausführlich hergeleitet.

$$\begin{aligned}
 v_{1T}^i &= \begin{pmatrix} l_1 \cdot \cos(\varphi_{1,T}^i) + l_2 \cdot \cos(\varphi_{2,T}^i) \\ l_1 \cdot \sin(\varphi_{1,T}^i) + l_2 \cdot \sin(\varphi_{2,T}^i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x_{obj} \\ \Delta y_{obj} \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} (R+r) \cdot \cos(\psi_{start} - \frac{r}{R+r} \cdot (\varphi_{2,T}^i - \varphi_{2,T}^{i-1})) \\ (R+r) \cdot \sin(\psi_{start} - \frac{r}{R+r} \cdot (\varphi_{2,T}^i - \varphi_{2,T}^{i-1})) \end{pmatrix}_T \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_{1R}^i &= \begin{pmatrix} l_1 \cdot \cos(\varphi_{1,R}^i) + l_2 \cdot \cos(\varphi_{2,R}^i) \\ l_1 \cdot \sin(\varphi_{1,R}^i) + l_2 \cdot \sin(\varphi_{2,R}^i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} (R+r) \cdot \cos(\psi_{start} + \frac{R}{R+r} \cdot \psi - \frac{r}{R+r} \cdot (\varphi_{2,R}^i - \varphi_{2,R}^{i-1})) \\ (R+r) \cdot \sin(\psi_{start} + \frac{R}{R+r} \cdot \psi - \frac{r}{R+r} \cdot (\varphi_{2,R}^i - \varphi_{2,R}^{i-1})) \end{pmatrix}_R \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

$$\varphi_k^i = \varphi_k^{i-1} + \Delta\varphi_{k,T}^i + \Delta\varphi_{k,R}^i \quad (3.3)$$

Diese Gleichung ist von bekannten Parametern wie den Getriebegliedlängen, der Anfangs- und Endposition und Orientierung des Objektes, sowie des Greifpunktes abhängig. Die Lösung dieser Gleichung ergibt die Antriebswinkel φ_i des Zweischlages. Da die Objektbewegung eine 3-DOF Bewegung ist, muss das Verfahren für alle Zweischläge wiederholt werden mit dem Lösungsvektor φ_i . Durch die Verwendung des vollständigen Gleichungssystems kann die inverse Kinematik mit bestimmten Trajektorien in inkrementellen Schritten gelöst werden.

4 Kinetostatik

Zur weiteren Beschreibung des ebenen Manipulators mit abrollenden Kontaktelementen wird im Folgenden dessen Kinetostatik hergeleitet. Dazu werden die Glieder eines Armes zusammen mit dem Objekt freigeschnitten und die Gleichgewichtsbedingungen (Newton) für jedes Glied aufgestellt (vgl. Abb. 2). Die auftretenden Beschleunigungen für die Schwerpunkte werden auf Basis der hergeleiteten Kinematik abgeleitet. Daraus folgt ein Gleichungssystem, welches die Gleichgewichtsbedingungen jedes Gliedes der drei Arme beinhaltet.

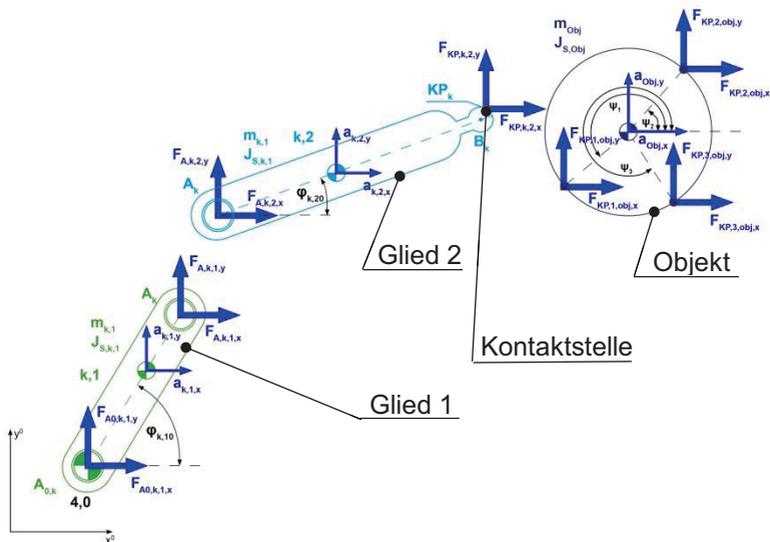


Abb. 2: Kräfte an einem freigeschnittenen Arm des Manipulators

Durch Lösen des Gleichungssystems können die zu bestimmenden Antriebsmomente bei vorgegebener Objektbewegung berechnet werden. In Tab. 2 sind die zusätzlich verwendeten Variablen zur Beschreibung der Kinetostatik aufgeführt.

Tab. 2: Variablen zur Beschreibung der Kinetostatik

Variable	Beschreibung
$F_{A0,k,1,x}$	Kraft am Punkt A_0 , Arm k , Glied 1 in x -Richtung
$M_{A0,k,1}$	Antriebsmoment Arm k , Glied 1
$m_{k,1}$	Masse Arm k , Glied 1
$J_{S,k,1}$	Trägheit im Schwerpunkt Arm k , Glied 1
$a_{k,1,x}$	Beschleunigung Arm k , Glied 1 in x -Richtung
$a_{k,1,y}$	Beschleunigung Arm k , Glied 1 in y -Richtung
$s_{A,k,1}$	Abstand des Punktes A_k vom Schwerpunkt S_k des Gliedes 1
$s_{S,k,1}$	Abstand des Schwerpunktes S_k des Gliedes 1 vom Gestellgelenk A_{0k}
$l_{k,1}$	Länge des Gliedes 1 von A_{0k} zu A_k
$l_{k,2}$	Länge des Gliedes 2 von A_k zu B_k
Δt	Dauer eines Zeitschrittes
$\dot{\varphi}_{k,10}$	Winkelbeschleunigung Arm 1, Glied 1
$\dot{\varphi}_{k,20}$	Winkelbeschleunigung Arm 1, Glied 2
$\dot{\varphi}_{obj}$	Winkelbeschleunigung Objekt

4.1 Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen

In Abb. 2 sind alle Kräfte des freigeschnittenen Systems an die Gelenke und Kontaktstelle angetragen. Die Kräfte werden in x- und y-Anteile zerlegt und die Bilanzen können entsprechend aufgestellt werden. Die Abhängigkeit der Kräfte zwischen den freigeschnittenen Gliedern wird entsprechend der Bedingung „*actio gleich reactio*“ beschrieben und lautet beispielsweise für das Gelenk A in x-Richtung $F_{A,k,1,x} = -F_{A,k,2,x}$. Gl. 4 beschreibt die Bilanzen um das Glied k,1 wobei die Momentenbilanz um das Gestellgelenk A_{0k} gebildet wird. Das Antriebsmoment des Armes im Gestellgelenk A_{0k} wird über den Term $M_{A0,k,1}$ berücksichtigt.

$$\sum F_x: \quad F_{A0,k,1,x} + F_{A,k,1,x} = m_{k,1} \cdot a_{k,1,x} \quad (4.1)$$

$$\sum F_y: \quad F_{A0,k,1,y} + F_{A,k,1,y} = m_{k,1} \cdot a_{k,1,y} \quad (4.2)$$

$$\sum M_{A0}: \quad -F_{A,k,1,x} \cdot l_{k,1} \cdot \sin \varphi_{k,10} + F_{A,k,1,y} \cdot l_{k,1} \cdot \cos \varphi_{k,10} + M_{A0,k,1} = (J_{S,k,1} + m_{k,1} \cdot s_{k,1}^2) \cdot \ddot{\varphi}_{k,10} \quad (4.3)$$

In Gl. 5 wird die Momentenbilanz des Gliedes k,2 um den Schwerpunkt gebildet, um die Kräfte im Gelenk A_k und Kontaktpunkt KP_k abzubilden. Bei dieser Bilanz ist besonders auf den sich bei der Bewegung verändernden Kontaktpunkt zwischen dem Objekt und dem Handgelenk zu achten. Diese Veränderung resultiert aus dem Abrollen des Handgelenks und wird über den Winkel ψ_k des Vektors \vec{c}_k (vgl. Abb. 3) beschrieben. Daraus lassen sich mit den in der Abbildung gezeigten geometrischen Verhältnissen die Terme $r \cdot \cos(\psi_k - \pi)$ bzw. $r \cdot \sin(\psi_k - \pi)$ für die Veränderung der Kontaktstelle aufstellen.

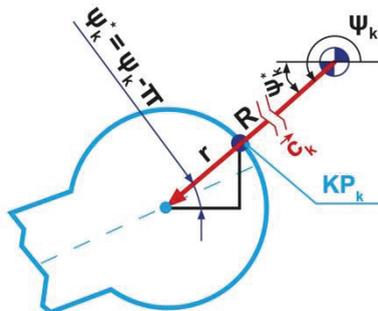


Abb. 3: Detailansicht der abrollenden Kontaktstelle

$$\sum F_x: \quad F_{A,k,2,x} + F_{KP,k,2,x} = m_{k,2} \cdot a_{k,2,x} \quad (5.1)$$

$$\sum F_y: \quad F_{A,k,2,y} + F_{KP,k,2,y} = m_{k,2} \cdot a_{k,2,y} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \sum M_S: \quad & F_{A,k,2,x} \cdot s_{A,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} \\ & - F_{A,k,2,y} \cdot s_{A,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20} \\ & - F_{KP,k,2,x} \cdot (s_{B,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} + r \cdot \sin(\psi_k - \pi)) \\ & + F_{KP,k,2,y} \cdot (s_{B,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20} + r \cdot \cos(\psi_k - \pi)) \\ & = J_{S,k,2} \cdot \ddot{\varphi}_{k,20} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die Momentenbilanz des Objektes wird ebenfalls um dessen Schwerpunkt gebildet und zusammen mit den Kräftebilanzen in Gl. 6 dargestellt.

Die Abhängigkeit der einzelnen Arme untereinander wird über das Objekt hergestellt. An diesem befinden sich drei Kontaktstellen, in denen die Kontaktkräfte jedes Armes an dem Objekt wirken. Somit wird die Abhängigkeit der Arme mathematisch über die Kräfte- und Momentenbilanzen um das Objekt beschrieben.

$$\begin{aligned} \sum F_x: \quad & F_{KP,1,obj,x} + F_{KP,2,obj,x} + F_{KP,3,obj,x} \\ & = m_{obj} \cdot a_{obj,x} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y: \quad & F_{KP,1,obj,y} + F_{KP,2,obj,y} + F_{KP,3,obj,y} \\ & = m_{obj} \cdot a_{obj,y} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \sum M_S: \quad & -F_{KP,1,obj,x} \cdot R \cdot \sin \psi_1 + F_{KP,1,obj,y} \cdot R \cdot \cos \psi_1 \\ & -F_{KP,2,obj,x} \cdot R \cdot \sin \psi_2 + F_{KP,2,obj,y} \cdot R \cdot \cos \psi_2 \\ & -F_{KP,3,obj,x} \cdot R \cdot \sin \psi_3 + F_{KP,3,obj,y} \cdot R \cdot \cos \psi_3 \\ & = J_{S,obj} \cdot \ddot{\varphi}_{obj} \end{aligned} \quad (6.3)$$

4.2 Analyse der dynamischen Größen des Systems

Im Folgenden werden die fehlenden Größen der Bilanzen hergeleitet, indem die Bewegung in die inkrementellen Zeitschritte 1 bis n zerlegt wird. Dazu werden zuerst die Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen für die Glieder k,1 und k,2 inkrementell beschrieben, womit darauffolgend die translatorischen Beschleunigungen der Glieder berechnet werden.

Bei der Bestimmung der Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen wird zum Startzeitpunkt der Bewegung von

einem stillstehenden Objekt ausgegangen, weshalb die Bewegungsgrößen zu diesem Zeitschritt zu null gesetzt werden. Für alle weiteren Zeitschritte wird die Geschwindigkeit mittels finiter Rückwärtsdifferenzen mit jeweils zwei Winkeln berechnet, wobei die Dauer eines Zeitschrittes durch den Term Δt berücksichtigt wird (vgl. Gl. 7).

$$\left. \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \right|_{t=t_p} = \frac{\varphi_p - \varphi_{p-1}}{\Delta t} \quad (7)$$

Die Winkelbeschleunigungen werden für die Zeitschritte 2 bis (n-1) mittels finiter zentraler Differenzen (vgl. Gl. 8.1) und für den Zweitschritt n mittels finiter Rückwärtsdifferenzen mit zwei vorangegangenen Winkeln berechnet (vgl. Gl. 8.2).

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi(t)}{\partial t^2} \right|_{t=t_p} = \frac{\varphi_{p+1} - 2\varphi_p + \varphi_{p-1}}{\Delta t^2} \quad (8.1)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \varphi(t)}{\partial t^2} \right|_{t=t_p} = \frac{\varphi_p - 2\varphi_{p-1} + \varphi_{p-2}}{\Delta t^2} \quad (8.2)$$

Durch dieses Vorgehen sind alle Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen bekannt und die translatorischen Beschleunigungen der Getriebeglieder können berechnet werden. Gl. 9 beschreibt die Beschleunigungen des Gliedes k,1 und folgt durch zweifaches Differenzieren der Positionsbeschreibung für die x- und y-Koordinaten des Schwerpunktes.

$$x_{s,k} = s_{S,k,1} \cdot \cos \varphi_{k,10} \quad (9.1)$$

$$\ddot{x}_{s,k} = -s_{S,k,1} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,10} \cdot \sin \varphi_{k,10} + \dot{\varphi}_{k,10}^2 \cdot \cos \varphi_{k,10}) \quad (9.2)$$

$$y_{s,k} = s_{S,k,1} \cdot \sin \varphi_{k,10} \quad (9.3)$$

$$\ddot{y}_{s,k} = s_{S,k,1} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,10} \cdot \cos \varphi_{k,10} - \dot{\varphi}_{k,10}^2 \cdot \sin \varphi_{k,10}) \quad (9.4)$$

Die Beschleunigungen der Schwerpunkte der Getriebeglieder $k,2$ werden ebenfalls durch zweifaches Differenzieren der Positionsformel des Schwerpunktes gewonnen und sind in Gl. 10 dargestellt.

$$x_{s,k} = l_{k,1} \cdot \cos \varphi_{k,10} + s_{S,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20} \quad (10.1)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{s,k} = & -l_{k,1} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,10} \cdot \sin \varphi_{k,10} + \dot{\varphi}_{k,10}^2 \cdot \cos \varphi_{k,10}) \\ & -s_{S,k,2} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,20} \cdot \sin \varphi_{k,20} + \dot{\varphi}_{k,20}^2 \cdot \cos \varphi_{k,20}) \end{aligned} \quad (10.2)$$

$$y_{s,k} = l_{k,1} \cdot \sin \varphi_{k,10} + s_{S,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} \quad (10.3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{s,k} = & l_{k,1} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,10} \cdot \cos \varphi_{k,10} - \dot{\varphi}_{k,10}^2 \cdot \sin \varphi_{k,10}) \\ & +s_{S,k,2} \cdot (\ddot{\varphi}_{k,20} \cdot \cos \varphi_{k,20} - \dot{\varphi}_{k,20}^2 \cdot \sin \varphi_{k,20}) \end{aligned} \quad (10.4)$$

Mit Kenntnis aller Größen der aus den Gleichgewichtsbedingungen (Gl. 4 bis 6) kann nun das Gleichungssystem der Form $A \cdot F = r$ zur Lösung der Kräfte im System aufgestellt werden. Dabei beinhaltet A die geometrischen Beziehungen, F beschreibt den zu bestimmenden Kraftvektor mit den gesuchten Belastungsgrößen und r beinhaltet alle massenbedingten Lasten des Systems. Dieses Gleichungssystem ist für jeden inkrementellen Zeitschritt zu lösen.

Das Ergebnis einer kinetostatischen Analyse zeigt, dass der Bewegungsbereich des Manipulators sehr stark auf eine Orientierung der drei Kontaktglieder 2, 4 und 6 auf kleine Winkel um die Kontaktpunktnormale begrenzt ist. Grund dafür sind die Drehgelenke zwischen Antriebs- und Kontaktgliedern, über die kein Moment übertragen werden kann. Um den Bewegungsbereich auch für große Abrollwinkel zu ermöglichen, wird daher ein konstruktives Zusatzelement – eine Zwanglaufsicherung – an der kontaktstelle zum Objekt notwendig, um die erforderliche Anpresskraft zur Erzeugung der Reibung im Kontaktpunkt zu realisieren.

4.3 Zusatzkraft als Zwanglaufsicherung

Der Arbeitsraum des Systems hängt entscheidend von der Reibung in den Kontaktstellen ab. Die abrollenden Kontaktelemente können aufgrund der fehlenden Antriebe des Systems nur bei geeignetem Kraftangriffswinkel, der um die Oberflächennormale schwankt, auf das Objekt gepresst werden. Eine Bewegung des Objektes kann somit in dieser Konfiguration nur ausgeführt werden, solange alle resultierenden Kraftvektoren $F_{KP,k,2,res}$ an den Kontaktstellen in ihrem Reibkegel 2δ liegen (vgl. Abb. 4). Sobald ein Kraftvektor diese Bedingung nicht mehr

erfüllt, rutscht der Arm vom Objekt ab und die kinematische Kette ist aufgelöst. Diese Beschränkung erlaubt trotz gut gewählter Startkontaktpunkte nur kleine Bewegungen, endet daher in einem limitierten Rotationsarbeitsraum. Der Reibkegel liegt bei jedem Zeitschritt symmetrisch um den Vektor \vec{c}_k angeordnet und hängt vom Reibungskoeffizienten in der Kontaktstelle ab.

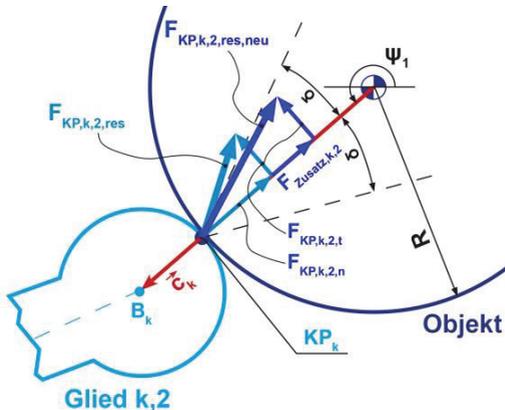


Abb. 4: Kontaktstelle mit Reibkegel und Zusatzkraft

Um den Bewegungsraum entscheidend zu vergrößern, muss eine Zwangslaufsicherung integriert werden. Diese kann vereinfacht durch eine zusätzliche Kraft am Glied 2 repräsentiert werden, welche das Glied auf das Objekt drückt und in Abb. 5 dargestellt ist. Diese Kraft steht unter dem Winkel ψ_k^* auf dem Glied um eine zusätzliche Normalkraft in der Kontaktstelle zu erzeugen, wie es in Abb. 4 dargestellt ist.

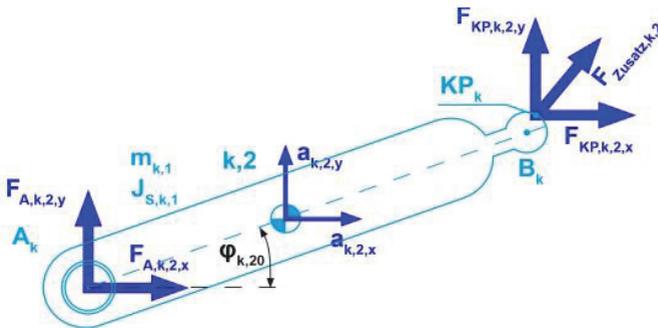


Abb. 5: Glied 2 mit zusätzlicher Kraft

Die neuen Kräftebilanzen für Glied k,2 berücksichtigen jeweils die x- bzw. y-Anteile der Kraft und die neue Momentenbilanz ist in Gl. 12 dargestellt.

$$\begin{aligned}
 \sum M_S: & F_{A,k,2,x} \cdot s_{A,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} \\
 & - F_{A,k,2,y} \cdot s_{A,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20} \\
 & - F_{KP,k,2,x} \cdot (s_{B,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} + r \cdot \sin(\psi_k - \pi)) \\
 & + F_{KP,k,2,y} \cdot (s_{B,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20} + r \cdot \cos(\psi_k - \pi)) \quad (12) \\
 & = J_{S,k,2} \cdot \ddot{\varphi}_{k,20} + \\
 & F_{Zusatz,k,2} \cdot \cos(\psi_k - \pi) \cdot s_{B,k,2} \cdot \sin \varphi_{k,20} \\
 & - F_{N,k,2} \cdot \sin(\psi_k - \pi) \cdot s_{B,k,2} \cdot \cos \varphi_{k,20}
 \end{aligned}$$

Konzepte für eine mögliche konstruktive Ausführung zeigt die folgende Abb. 6. Es handelt sich dabei um mechanische Elemente (Federn, Magnete, Riemen etc.), die durch ihre Eigenschaften eine zusätzliche Anpresskraft im Kontaktpunkt erzeugen. Dadurch werden die Erzeugung der Anpresskraft und die Bewegungserzeugung der Motoren mechanisch voneinander getrennt. Ein wesentlicher Punkt bei der Entwicklung dieser Zwanglaufsicherung ist die Berücksichtigung der Rekonfigurierbarkeit. Die Verwendung von Elementen mit geeigneter Flexibilität wie u.a. Federn und Magnete (Abb. 6, links und Mitte) ermöglicht eine beliebige Neupositionierung des Kontaktpunktes. Ein Riemen (Abb. 6, rechts) dagegen ermöglicht diese Flexibilität nicht und endet daher in einem nicht rekonfigurierbaren Manipulator.

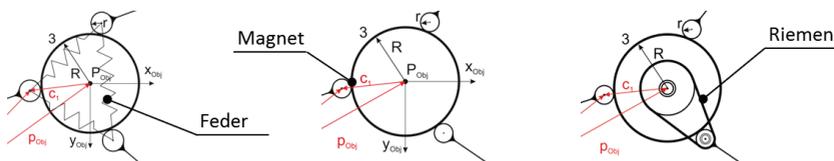


Abb. 6: Konstruktive Ausführung einer Zwanglaufsicherung

5 Design des ebenen Manipulators

Die endgültige Gestaltung des Manipulators zeigt Abb. 7. Die abrollenden Kontaktelemente sind im Eingriff mit dem Zylinder. Die Betrachtung des möglichen Bewegungsraumes wird in diesem Beitrag nicht untersucht. Die drei Zweischläge sind in einem starren Rahmen gelagert. Über einen Riementrieb wird das Antriebsmoment auf die Antriebsglieder übertragen.

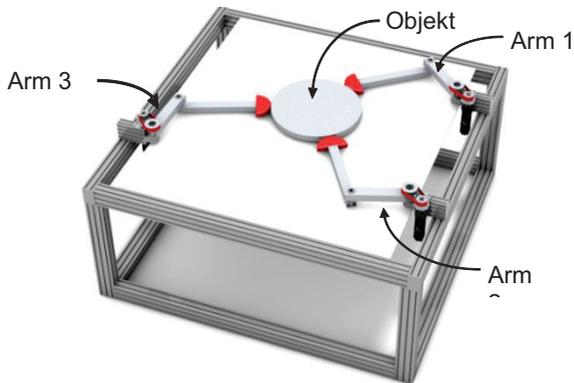


Abb. 7: Gestaltung des Manipulators

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt einen Manipulator vor, der mit drei Armen ein Objekt durch abrollende Kontaktelemente handhabt. Es wurde gezeigt, dass dadurch der Orientierungsarbeitsraum vergrößert werden kann, da jede Translation oder Rotation durch ein Abrollen der Kontaktelemente überlagert wird. Die Herleitung der Kinetostatik des ebenen Manipulators und eine inkrementelle Lösung der Kräfte im System bei vorgegebener Objektbewegung wurden vorgestellt. Somit ist es möglich, die zur Erfüllung der Bewegungsaufgabe erforderlichen Antriebsmomente der Arme zu berechnen. Zudem wurde die Erweiterung des Arbeitsraumes mit einer Zusatzkraft als Zwangslaufsicherung theoretisch aufgezeigt.

Das vorgestellte Konzept kann im weiteren Verlauf in die räumliche Robotik übertragen werden, um Handhabungsaufgaben in diesem Anwendungsgebiet zu unterstützen.

7 Danksagung

Da Teile dieser Arbeit im Rahmen des Exzellenzcluster der RWTH Aachen "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer (EXC 128)" durchgeführt wurden danken die Autoren der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung.

Literatur

- [1] Müller, R.; Riedel, M.; Vette, M.; Corves, B.; Esser, M.; Hüsing, M.: Reconfigurable Self-Optimising Handling System. In: Ratchev, S. (ed.) IPAS 2010. IFIP AICT, vol. 315, pp. 255–262. Springer, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11597-4
- [2] Cole, A. B. A.; Hauser, J. E.; Sastry, S.: Kinematics and Control of Multifingered Hands with Rolling Contact. In IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 34, No. 4, April 1989
- [3] Ponce, J; Faverjon, B.: On Computing Three-Finger Force-Closure Grasps of Polygonal Objects. In: IEEE transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 6, December 1995.
- [4] Han, L.; Guan, Y.; Li, Z.; Shi, Q. and Trinkle, J.: Dextrous manipulation with rolling contacts. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 992–997, 1997.
- [5] Hasegawa, T.; Mukrakami, K.: Finger Motion Plan-ning of a Multi-fingered Manipulation with Rolling Contact. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 2001, pp. 196–201, 2001.
- [6] Yoshida, M.; Arimoto, S.; Bae, J.-H. and Luo, Z.-W.: Stable grasp of a 2d rigid object through rolling with soft fingers. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007, pp. 870–876, 2007.
- [7] Jeong, H.; Cheong, J.: In-hand Rolling Motion Plan-ning using Independent Contact Region (ICR) with Guaranteed Grasp Quality Margin. In: IEEE Inter-national Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.
- [8] Kurtenbach, S.; Ehreiser, F.; Hüsing, M.; Corves, B.: Abrollendes Kontaktelement als Endeffektor eines ebenen rekonfigurierbaren Manipulators mit drei Freiheitsgraden und anschließender Betrachtung der Kinematik. First IFToMM D-A-CH Conference 2015, 11. März 2015, TU Dortmund, ISBN: 978-3-940402-03-5
- [9] Kurtenbach, S.; Ehreiser, F.; Hüsing, M.; Corves, B.: Introduction of a 1-DOF rolling contact element for a planar reconfigurable manipulator, Mechanisms, Transmissions and Applications, Proceedings of the 3rd MeTrApp Conference 2015, 06th May 2015, RWTH Aachen University, ISBN: 978-3-319-17066-4