



Gemeinschaft
für studentischen
Austausch in
Mittel- und
Osteuropa e.V.

Schriftenreihe der GFPS e.V.
Ausgabe 02/2009

DIE REGELUNG DES KUKA KR-500 ROBOTERS

von Agnieszka Leyko

GFPS e.V. ist die „Gemeinschaft für studentischen Austausch in Mittel- und Osteuropa“, konkret mit: Belarus, Deutschland, Polen und Tschechien. Der als gemeinnützig anerkannte Verein steht unter der Schirmherrschaft von Prof. Dr. Gesine Schwan.

Die Schriftenreihe des Vereins ermöglicht es ausgewählte Arbeiten ehemaliger Stipendiaten einer breiten Leserschaft zugänglich zu machen.



Leyko, Agnieszka:

Die Regelung des KUKA KR-500 Roboters.

Agnieszka Leyko war im Wintersemester 2008/09 GFPS-Stipendiatin. Das Stipendium hat ihr ermöglicht, ein Diplomprojekt im Max-Planck-Institut in Tübingen abzuleisten. Hierbei hat sie sich mit der Steuerung eines Roboterarms beschäftigt, der als Bewegungssimulator für psychophysische Experimente benutzt wird. Nach dem erfolgreichen Abschluss ihres Studiums an der Universität Łódź hat Agnieszka Leyko in Bonn ihr Promotionsstudium in Teilchenphysik aufgenommen und arbeitet derzeit im Teilchenphysiklabor CERN in Genf.



Schriftenreihe der GFPS e.V.
Ausgabe 02/2009

ISSN: 2192-2780

© Agnieszka Leyko

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung des Textes in irgendeiner Form, auch auszugsweise, ist nur mit schriftlicher Zustimmung der Autorin erlaubt.

Impressum

Herausgeber: GFPS e.V.
Redaktion: Julia Roos, Yaman Kouli
Layout: Romy Heyner

www.gfps.org

In der vorliegenden Arbeit werden die Unterschiede zwischen einer Steuerung und einer Regelung beschrieben. Die Vorteile einer Regelung werden aufgezeigt. Eine neue Manipulierbarkeitsfunktion wird vorgeschlagen, die nur in der Nähe von Singularitäten wirkt. Die Ergebnisse zweier Simulationen für den KUKA KR-500 Roboter werden präsentiert.

Einleitung

Der KUKA KR-500 Roboter ist ein anthropomorpher Roboter mit 6 Freiheitsgraden. Er ist aus 6 Drehgelenken und 7 Armelementen aufgebaut, wie in Abbildung 1 gezeigt wurde. Am *Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik*¹ wird er als Bewegungssimulator für interaktive, psychophysische Experimente mit Versuchs-

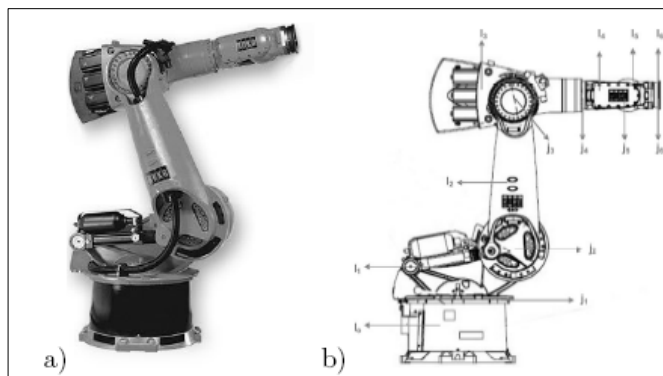


Abb.1. KUKA KR-500 Roboter. a) ein Bild und b) die schematische Darstellung; Mit j sind die Gelenke und mit l die Armelemente bezeichnet

personen eingesetzt. Die Position eines Roboters im Raum wird meistens mit Hilfe eines der zwei folgenden Koordinatensysteme beschrieben: Die Position (x,y,z) und Orientierung (Eulerwinkel r,p,h) des Endeffektors, als ein Weltkoordinatensystem, oder mittels der Gelenkwinkel $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ – als roboterinternes Referenzsystem.

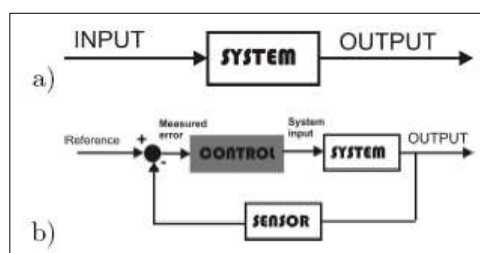


Abb.2. a) Steuerung: Keine fortlaufende Rückkopplung der Ausgangsgröße zum Eingang des Reglers, b) Regelung mit Rückkopplung der aktuellen Roboterposition an den Reglereingang, somit besteht die Möglichkeit die Bewegung des Roboters in „real-time“ zu korrigieren.

¹ Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Spemannstraße 38, 72076 Tübingen, Deutschland.

Steuerung und Regelung

Die Steuerung eines Systems lässt sich anschaulich an einem vereinfachten Beispiel beschreiben: Will man beispielsweise einen Gegenstand vom Tisch aufnehmen, wobei es im Zimmer dunkel ist und der Gegenstand somit nicht zu sehen ist, so gibt das Gehirn der Hand einen Befehl und sie bewegt sich zu dem Platz, an dem das Gehirn den Gegenstand vermutet. Die im Gehirn gespeicherten Koordinaten des Objekts könnten aber von der tatsächlichen Position abweichen. Die ganze Aufgabe wäre viel einfacher, wenn das Licht eingeschaltet wäre. Das ist genau der Unterschied zwischen einer Regelung und einer Steuerung. Die Regelung besitzt über das visuelle System eine Rückkopplung, wohingegen die Steuerung keine Korrekturmöglichkeit hat. Mit anderen Worten: In einem System mit Regelung wird der tatsächliche Wert des Ausgangs (Istwert) zum Regler zurückgeführt und möglicherweise dem Sollwert angepasst. Mit Hilfe der Regelung ist es möglich, den Fehler schon während der Bewegung zu korrigieren.

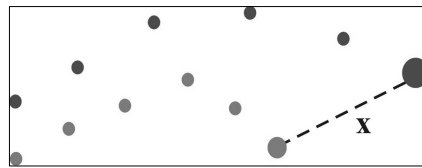


Abb.3. Ein Regelkreis ohne Rückkopplung kann zu großen Abweichungen von der geplanten Trajektorie führen.

Ähnlich kann man sich dies im Fall eines Roboters vorstellen. In der Abbildung 3 sind zwei Reihen von Punkten zu sehen. Unter Verwendung einer Steuerung könnte ein Modell, das den Roboter entlang der oberen Punktreihe bewegen soll, den Roboter aber tatsächlich entlang der unteren Trajektorie bewegen und zum Schluss nicht die gewünschte Endposition erreichen. Eine solche Situation kann beispielsweise durch Ungenauigkeiten der Modellparameter einer Steuerung entstehen. Eine Regelung würde die Trajektorie während des Ablaufes fortwährend korrigieren. Würde man also in diesem Fall eine Rückkopplung der Ausgangsgröße auf den Eingang des Reglers haben, wäre die Trajektorie in „real-time“ korrigiert, so dass im Endeffekt die richtige Endposition erreicht würde. Nur mit Hilfe der Regelung ist eine exakte Kontrolle der Bewegungsbedingungen möglich.

Singuläre Positionen

Eine singuläre Position – auch Singularität genannt – bezeichnet diejenigen Positionen eines Roboters, aus denen eine Bewegung in manche Richtungen nicht möglich ist (z.B. wenn ein Gelenk die Grenze seines Bewegungsbereichs erreicht hat) oder für welche unendlich viele Gelenkwinkelkonfiguration

Gelenk	Bereich	Mitte des Bereichs
1	$-133^{\circ} \div 133^{\circ}$	0°
2	$-128^{\circ} \div -42^{\circ}$	-85°
3	$-30^{\circ} \div 78^{\circ}$	24°
4	∞	0°
5	$-58^{\circ} \div 58^{\circ}$	0°
6	∞	0°

Tab.1. Arbeitsbereiche der Gelenke des KUKA KR-500 Roboter

existieren (z.B. existiert eine Konfiguration, in welcher eine gleichmäßige Bewegung des Gelenks Nummer 4 und des Gelenks Nummer 6 in Gegenrichtung keine Änderung der Position im Raum ergibt). Eine der schwierigsten Aufgaben beim Programmieren einer Software zur Regelung des Roboters ist es, mit solchen Positionen umzugehen. Man kann entweder die Software so schreiben, dass der Roboter sie vermeidet, oder dass eine Interpolation benutzt wird um eine Trajektorie durch eine singuläre Position zu bestimmen. Werden die Singularitäten nicht beachtet, kann der Roboter unkontrollierte Bewegungen ausführen.

Manipulierbarkeit

Wenn der Roboter für eine gegebene Aufgabe nicht alle seine Freiheitsgrade (also auch nicht alle Gelenke) benutzen muss, so kann man die zusätzlichen Gelenke in der Form ausnützen, dass die sogenannte Manipulierbarkeitsfunktion optimiert wird. Einen solchen Roboter, dessen Gelenkzahl größer als die Dimension der Trajektorie im Arbeitsraum ist, nennt man einen redundanten Roboter (oder auch einen redundanten Manipulator). Bevor eine detaillierte Beschreibung der Manipulierbarkeit erfolgt, soll noch die Jacobi-Matrix definiert werden. Die Kettenregel der Ableitung besagt, dass

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Mit Hilfe einer Jacobi-Matrix kann die partielle Ableitung eines Vektors dargestellt werden. Im Fall der Ableitung von $x=(x,y,z,r,p,h)$ nach der Zeit t , lassen sich die

partiellen Ableitungen $\theta=(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ wie folgt mittels der Jacobi-Matrix ausdrücken:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial x}{\partial \theta_6} \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial h}{\partial \theta_1} & \dots & \dots & \frac{\partial h}{\partial \theta_6} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Jacobi-Matrix lässt sich auch als eine Transformationsmatrix betrachten:

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} = J \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

die die Winkelgeschwindigkeiten $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ in kartesische Geschwindigkeiten $\frac{\partial x}{\partial t}$ transformiert.

Die Manipulierbarkeit ist eine Größe, die beschreibt, wie gut sich der Roboter in alle Richtungen bewegen kann. Sie nimmt den Wert 0 an, wenn der Roboter sich in einer singulären Position befindet. Je größer der Wert der Manipulierbarkeitsfunktion ist, desto besser lässt sich der Roboter in alle Richtungen bewegen. Zur Optimierung haben sich verschiedene Zielfunktionen bewährt, z.B.:

$$\omega_1(\theta) = \frac{-1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\theta_i - \bar{\theta}_i}{\theta_{i \max} - \theta_{i \min}} \right)^2 \quad (4)$$

Diese Funktion hält den Roboter in der Mitte seines Arbeitsbereiches, wobei θ_i die Gelenkwinkel und $\theta_{i \max}$, $\theta_{i \min}$ und $\bar{\theta}_i$ entsprechend die maximalen, minimalen und mittleren Werte des i -ten Winkels sind. Eine weitere Funktion ist

$$\omega_2(\theta) = \sqrt{\det(J(\theta) \cdot J^T(\theta))} \quad (5)$$

mit welcher die singulären Konfigurationen vermieden werden. Hierbei bezeichnet J die Jacobi-Matrix und J^T ihre Transponierte.

Als Zielfunktion kann man ω_1 , ω_2 oder auch eine beliebige Faltung $\omega = \omega_1 * \omega_2$ verwenden. Dabei kann „eine beliebige Faltung“ z.B. eine Summe oder ein Produkt sein. Unter Verwendung einer Regelungsfunktion, die die Manipulierbarkeitsfunktion maximiert, sollte es unmöglich sein, dass der Roboter eine singuläre Position erreicht. Beim hier beschriebenen KUKA KR500 Roboter hat sich die Kombination der oben beschriebenen meistbenutzten Manipulierbarkeitsfunktionen der Robotik nicht bewährt, da sie auch solche

Trajektorien beeinflusst und verändert hat, die sich weit entfernt von Singularitäten befanden. Aus diesem Grund wurde eine neue Funktion entwickelt, die außerhalb der singulären Positionen einen konstanten Wert, z.B. 1, annimmt und nur in der Nähe einer Singularität sehr schnell gegen den Wert 0 konvergiert. Solch eine Funktion wirkt also nur dann, wenn der Roboter sich wirklich sehr nahe an einer singulären Position befindet.

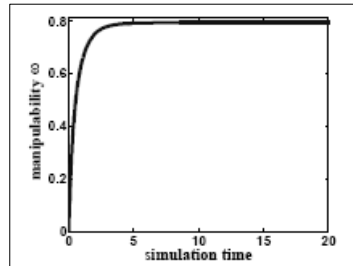


Abb.4. Durch Maximierung der Manipulierbarkeitsfunktion kann man die beste Startposition finden.

Auf der anderen Seite eignet sich die Manipulierbarkeitsfunktion $\omega = \omega_1 \cdot \omega_2$ ohne irgendwelche Verbesserungen sehr gut zur Bestimmung einer Konfiguration mit maximaler Manipulierbarkeit. Solch eine Position kann als die bestmögliche Startposition angesehen werden. In der in Abbildung 4 gezeigten Simulation befand sich der Roboter am Anfang in einer singulären Position (Manipulierbarkeit ungefähr beim Wert 0). Am Ende der Trajektorie findet der Roboter eine günstige Position

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.58^\circ \\ -83.59^\circ \\ 48.85^\circ \\ 0^\circ \\ 34.74^\circ \\ 0^\circ \end{pmatrix}, \quad (6)$$

in welcher die Funktion $\omega = \omega_1 \cdot \omega_2$ maximiert wird. Die erreichte Endposition liegt ungefähr in der Mitte der Arbeitsbereiche der Gelenke (siehe Tabelle 1). Nur der Wert von Gelenk 5 kann nicht in der Mitte seines Arbeitsbereiches liegen, um die singuläre Konfiguration von Gelenk Nummer 4 und 6 zu vermeiden.

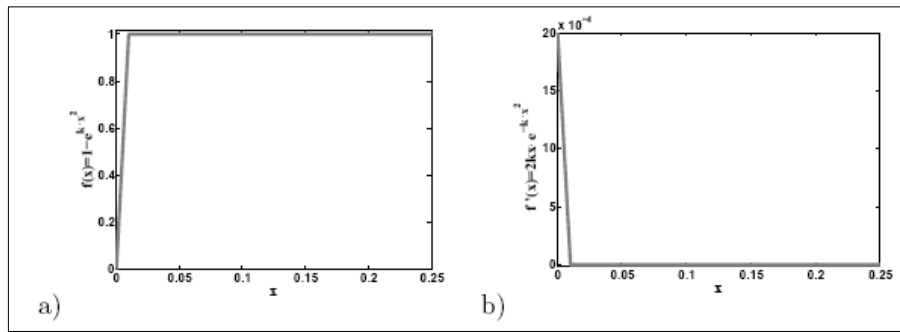


Abb.5. a) Die Funktion $f(x) = 1 - \exp(-k \cdot x^2)$ für $k = 1000$ und b) ihre Ableitung $f'(x) = 2kx \cdot \exp(-k \cdot x^2)$.

Modifizierte Manipulierbarkeitsfunktion

Eine solche Funktion, die die speziellen Bedingungen aus dem Kapitel *Manipulierbarkeit* erfüllt, ist

$$f(x) = 1 - e^{-k \cdot x^2} \quad (7)$$

Ihr Verlauf ist in der Abbildung 5a) gezeigt. Im Teil b) sieht man die Ableitung der Funktion (7). Bradley J. Nelson und Pradeep K. Khosla nutzen in "The International Journal of Robotics Research" diese Funktion und setzen für x eine zu (4) ähnliche Funktion ein. Als Zielfunktion haben sie folgende Funktion gewählt:

$$\omega_{NK} = \left(1 - e^{-k_1 \prod_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i \min})(q_{i \max} - q_i)}{(q_{i \max} - q_{i \min})^2}} \right) \cdot \sqrt{\det(J \cdot J^T)} \quad (8)$$

Diese Zielfunktion lieferte im Fall des KUKA Roboters nicht die erwarteten Resultate. Der Faktor, der die Jacobi-Matrix enthält, hatte weiterhin auch sehr weit von den Singularitäten entfernt einen zu großen Einfluss auf die Trajektorie. Aus diesem Grund wurde auch dieser Faktor analog zum ersten Faktor modifiziert. Als endgültige Zielfunktion fiel die Entscheidung auf die folgende Funktion:

$$\omega' = \left(1 - e^{-k_1 \prod_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i \min})(q_{i \max} - q_i)}{(q_{i \max} - q_{i \min})^2}} \right) \cdot \left(1 - e^{-k_2 (\sqrt{\det(J \cdot J^T)})^2} \right) \quad (9)$$

Die Abbildungen 6 - 9 zeigen die mittels dieser Zielfunktion gewonnenen Simulations-ergebnisse. In der Abbildung 6 ist die gewünschte Trajektorie als gestrichelte Linie eingezeichnet.

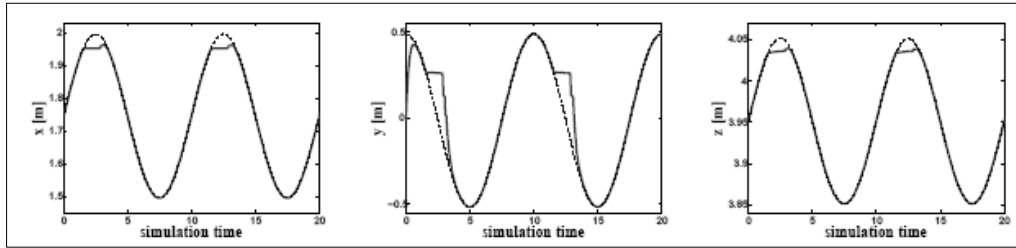


Abb.6. Eine Trajektorie durch eine singuläre Position entsprechend Gleichungen (10). Gestrichelte Linie bezeichnet die gewünschte Trajektorie und durchgezogene Linie die Robotertrajektorie

Diese Trajektorie enthält singuläre Bereiche, die sich außerhalb der mechanischen Beschränkungen der Gelenke befinden.

$$\begin{aligned}
 x &= 0.25 \cdot \sin(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) + 1.74 \\
 y &= 0.5 \cdot \cos(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) - 0.01 \\
 z &= 0.1 \cdot \sin(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) + 3.95 \\
 r &= 0 \\
 p &= 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

Dank der Manipulierbarkeitsfunktion (9) meidet der Regler diese singulären Positionen, weswegen die tatsächliche Bewegung des Roboters (durchgezogene Linie) von der gewünschten Trajektorie abweicht.

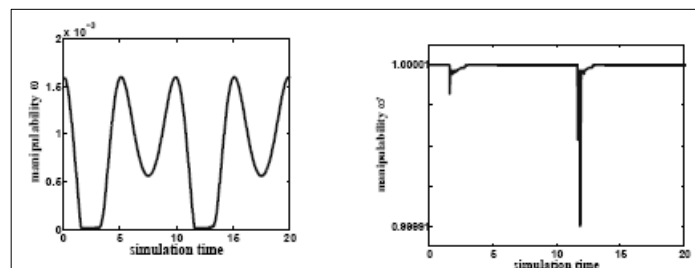


Abb.7. Die Manipulierbarkeitsfunktionen ω (vgl. (11)) und ω' (vgl. (9)) für die Bewegung entsprechend den Gleichungen (10)

Als nächstes werden in der Abbildung 7 die Verläufe der Funktionen ω' (9) und ω verglichen:

$$\omega = \prod_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i \min})(q_{i \max} - q_i)}{(q_{i \max} - q_{i \min})^2} \cdot \sqrt{\det(J \cdot J^T)} \tag{11}$$

Wie aus der Abbildung zu sehen ist, ändert die Funktion ω' ihren Wert nur, wenn ω gleich Null ist. Wird die gewünschte Trajektorie leicht verändert, so dass sie nicht mehr in singulären Bereichen verläuft, so beeinflusst

$$\begin{aligned}
 x &= 0.15 \cdot \sin(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) + 1.74 \\
 y &= 0.4 \cdot \cos(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) - 0.01 \\
 z &= 0.1 \cdot \sin(0.1 \cdot 2\pi \cdot t) + 3.95 \\
 r &= 0 \\
 p &= 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

die Funktion ω' die Bewegung des Roboters nicht mehr (siehe Abbildung 8). Somit verläuft die Roboterbewegung ohne von der Zielfunktion beeinflusst zu werden, obwohl der Wert von ω sehr klein ist (siehe Abbildung 9).

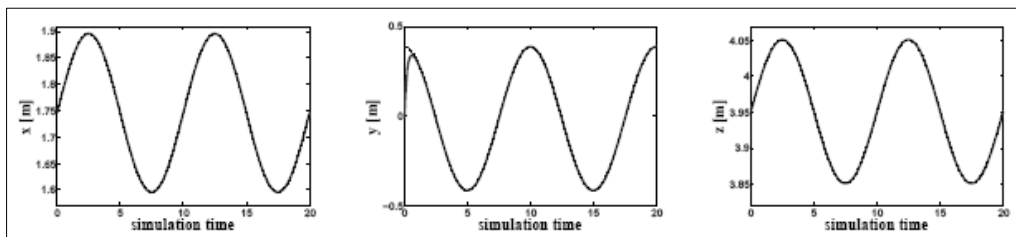


Abb.8. Trajektorie entsprechend den Gleichungen (12). Die Gestrichelte Linie bezeichnet die gewünschte Trajektorie und die durchgezogene Linie die Robotertrajektorie

Des Weiteren muss die Regelung die Maximalwerte der Gelenkwinkelgeschwindigkeiten und Gelenkwinkelbeschleunigungen überwachen und innerhalb ihrer vorgegebenen Grenzen halten. Diese Punkte werden in diesem Referat nicht genauer beschrieben.

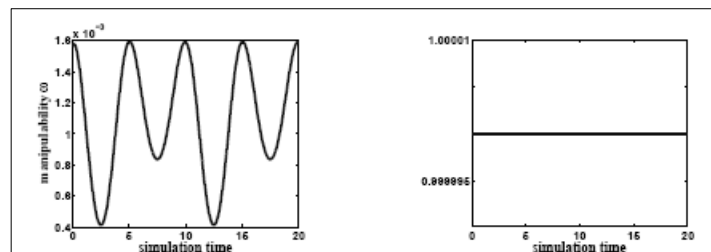


Abbildung 9 Die Manipulierbarkeitsfunktionen ω (vgl. (11)) und ω' (vgl. (9)) für die Bewegung, gegeben bei den Gleichungen (12)

Folgerungen

Der KUKA Roboter wird noch sehr selten als Bewegungssimulator eingesetzt. Deswegen musste man, um eine Regelungssoftware mit den oben beschriebenen Eigenschaften zu entwickeln, erst sehr viele verschiedene Methoden implementieren und ausprobieren. Es mussten sehr viele numerische Simulationen durchgeführt werden, um die richtigen Werte der einzelnen Parameter zu bestimmen. Wegen der speziellen Konfiguration der Gelenkwinkel, konnten die Lösungen der anderen anthropomorphen Roboter nicht direkt

übertragen werden. Die oben präsentierte Manipulierbarkeitsfunktion ω liefert aber bei allen durchgeführten Simulationen sehr gute Ergebnisse. Mit ihrer Hilfe können, abhängig von der Richtung, Amplituden bis zu 0.9 m erreicht werden, während mit der unveränderten Manipulierbarkeitsfunktionen ω nur Amplituden bis zu ca. 0.1 m möglich sind. Die neue Regelungsfunktion muss noch experimentell verifiziert werden.

Dank

Die beschriebene Arbeit wurde am *Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik* in der Abteilung *Wahrnehmung, Kognition und Handlung* in Tübingen realisiert und wird als ein Teil der Diplomarbeit der Autorin gelten. Hierbei möchte ich meinen Betreuern Paolo Robuffo Giordano und Harald Teufel herzlich für ihre Hilfe und Unterstützung danken. Darüber hinaus möchte ich der *Gemeinschaft für studentischen Austausch in Mittel- und Osteuropa e.V.* danken. Ohne ihr Stipendium wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Sciavicco, B.Siciliano *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag London Limited 2000, 2005.
- [2] M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, 2004.
- [3] B.J. Nelson, P.K. Khosla, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 14, No. 3, 255-269 (1995).
- [4] Die Spezifikation des KR-500 KUKA Roboters.