Tomasz KOCH

Institut für Fertigungstechnik und Automatisierung
Technische Universität Wrocław, Polen

STEUERUNGSKONZEPTE FÜR ROBOTER MIT REDUNDANTER KINEMATIKEN*

Zusammenfassung. Die Entwicklung im Bereich der Roboterkinematik ist mit der Anwendung von redundanten kinematischen Ketten verbunden. Die Roboter mit solchen Kinematiken verfügen über mehr Freiheitsgrade als sie für die gestellte Aufgabe benötigen und können deswegen außer der Handführung entlang der vorgegebenen Bahn auch andere Aufgaben, die aus den Zusatzbedingungen und Umgebung resultieren, ausführen. Beispiele dafür sind: Umfahren von Hindernissen, Einhaltung der Gelenkverfahrbereiche, Vermeidung von singulären Stellungen. Der Aufsatz beschreibt einige der wichtigsten Steuerungsalgorithmen für die redundante Roboter.

1. Einführung

In den letzten Jahren wuchs das Interesse an der Anwendung von Robotern mit redundanter Kinematik. Diese verfügen über mehr Freiheitsgrade als sie für die gestellte Aufgabe benötigen und haben nicht redundanten Systemen gegenüber viele Vorteile. Dank der Redundanz können solche Roboter die gestellte Aufgabe auf unendlich viele Wegen im Sinne des Konfiguration der Armen realisieren. Um eine gewünschte Lösung zu bestimmen ist es deswegen notwendig, außer Eingabe der eigentlichen Aufgabe, noch zusätzliche Bedingungen in Form von Gleichungen oder Kriterien, die optimiert werden sollen, aufzustellen. Dies kann für solche Zwecke benutzt werden wie z.B.: das Umfahren von Hindernissen, die Einhaltung der Gelenkverfahrbereiche, die Vermeidung von singulären Stellungen, die Minimierung des Energieverbrauches und andere.

Die Lösungsmethoden können in zwei Kategorien geteilt werden: die Methoden, die auf die Information über die komplette zu fahrende Bahn basieren und die Methoden, die nur auf die Information über die lokale Bahn basieren. Die ersten Methoden können z.B. die Trajektorien in den Maschinenkoordinatenraum finden, die die Leistungskriterien, wie z.B. die Zeit der zu realisierende Aufgabe oder Energieverbrauch optimieren. Das Problem der globalen Optimierung wird normalerweise folgendermaßen formuliert [1]: für eine Bahn x(t) in Kartesischem-Raum soll eine Trajektorie θ(t) in Gelenkkoordinaten-Raum gefunden werden, die ein Kriterium in Form des Zeitintegrales optimiert. Folgende Gleichungen können diese Aufgabe beschreiben:

$$x(t)=f(\theta(t)) \quad und \quad \min I(\theta(t)) = \int_{t_s}^{t_e} K(\ddot{\theta},\dot{\theta},\theta)\, dt \qquad (1)$$

---

* Diese Arbeit wurde durch EG Kommission unterstützt (Programm COST, Contract nr CIPA3511CT920629)

wobei: f - Vorwärtstransformation,
$[t_a,t_e]$ - Zeitintervall und
K - eine Kostenfunktion bezeichnen.

Die Methoden der globalen Optimierung produzieren zwar Trajektorien mit akzeptablen Geschwindigkeiten in der Gelenken, sind aber nur zu off-line Planung begrenzt und erlauben keine real-time Korrekturen der Bahn aufgrund von Sensordaten [2]. Dagegen die andere Methoden, die als Methoden der lokalen Optimierung bezeichnet werden können, optimieren die Kriterien nur z.B. innerhalb eines Interpolationstaktes. Sie ermöglichen das Ausführen von Bahnkorrekturen aufgrund der Sensordaten, sind aber nicht im allgemeinem frei von dem Problem der zu hohen Gelenkgeschwindigkeiten. Dennoch ist Sensordatenrückkopplung bei vielen Aufgaben so wichtig, daß der Aufsatz nur auf die Methoden der zweiten Kategorie sich konzentrieren wird.

2. Methoden der lokalen Optimierung

Die Methoden der lokalen Optimierung formulieren das Problem im Geschwindigkeitsraum, das heißt nach der Differenzierung der Vorwärtstransformationsgleichung (linke Gleichung aus (1)):

$$\dot{x}(t) = J(\theta)\dot{\theta}(t) \qquad (2)$$

wobei: $\dot{x}$ - ist ein **m** dimensionaler Vektor der Endeffektor-Geschwindigkeit im Kartesischem Raum,
$\dot{\theta}$ - ist ein **n** dimensionaler Vektor, der die Geschwindigkeiten in der Gelenken beschreibt und
J - ist ein **m x n** Jacobi Matrix, die durch die Ableitung der **m**-dimensionalen Funktion der Vorwärtstransformation entsteht $\partial f(\theta)/\partial\theta$.

Für die redundante Kinematiken **n** > **m**, so daß eine Lösung nicht in Form einen Inverse gefunden werden kann. In der siebziger und hauptsächlich in der achtziger Jahren wurden verschiedene Algorithmen entwickelt und meistens in Simulationssystemen ausprobiert. Die Grundlegende Methoden der lokaler Optimierung können zur folgender Liste aufgestellt werden:

- Moore-Penrose Pseudoinverse [3] mit der Gattungen der gewichteten Pseudoinverse und verallgemeinen Pseudoinverse [4][5],
- gedämpfte Methode der kleinsten Qudraten (eng. damped least squer) [6][7],
- Methode des erweiterten Jacobians (eng. extended Jacobian)[8],
- Konfigurationssteuerung (eng. configuration control) [9][7],
- Lösung in geschlossener Form (eng. closed form solution) [10][11],
- Methode auf der Grundlage der Fuzzy Logik [12],
- kompakte Methode der quadratischen Programmierung (eng. compact QP method) [13][14].

Diese Methoden wurden zwar in erster Linie für die serielle Kinematiken aufgestellt, eignen sich dennoch für die mobile Roboter [15] und kooperierende Kinematiken [16][17][18][19][20] (Bild 1).

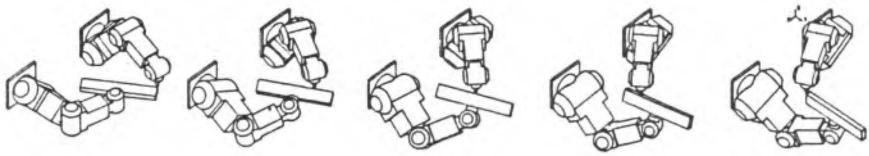

Bild 1. Einzelne Phasen der koordinierten Bahnführung zweier 6-Achsigen Roboter [18]

Viele oben aufgelistete Methoden wurden für die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Roboterbewegung eingesetzt zB.:

- Minimierung des Energieverbrauches [5],
- Minimierung der Geschwindigkeiten in den Gelenken [21],
- Minimierung der Kräfte/Momente in den Gelenken [21],
- Vergrößerung der Manipulierbarkeit [22],
- Einhaltung der Gelenkverfahrbereiche [4][18],
- Umfahren von Hindernissen [23][24][14],
- Prioritätisierung der Aufgaben [25],
- Gewährleistung der Bewegungswiederholberkeit bei der zyklischen Aufgaben [2][26][14].

Manche von diesen Methoden und die Ziele ihres Einsatzes werden im folgendem beschrieben.

3. Pseudoinverse

Eine der ältesten Lösungen der Gleichung (2) ist die Lösung durch s.g. Pseudoinverse, die folgendermaßen dargestellt werden kann:

$$\dot{\theta} = J^{+}\dot{x} \qquad (3)$$

Die Pseudoinverse kann auf dem Wege der Singulären Werte Zerlegung (SVD - Singular Value Decomposition) gefunden werden [27]. Wenn $(JJ^T)^{-1}$ existiert ($\det(JJ^T) \neq 0$), d.h. daß der Roboter sich nicht in der singulären Stellung befindet, kann die Pseudoinverse wie folgt ausgedrückt werden:

$$J^{+} = J^{T}(JJ^{T})^{-1} \qquad (4)$$

Diese Lösung durch Pseudoinverse minimiert ein Kriterium in Form von euklidischer Norm über die Gelenkgeschwindigkeiten $T = \dot{\theta}^T\dot{\theta}$ [3]. Dieses Kriterium scheint gewünscht zu sein, weil es während der Roboterbewegung nach solchen Konfigurationen der Armen verlangt, die kleine Geschwindigkeiten in der Gelenken verursachen.
Die Lösung (3) kann um einen homogenen Teil erweitert werden:

$$\dot{\theta} = J^{+}\dot{x} + \alpha(I - J^{+}J)z \qquad (5)$$

Der Operator $(I - J^{+}J)$ projiziert den Vektor z in den Nullraum von J. Dieser homogene Teil wird von mehreren Forschern benutzt, um die Bewegung der Kinematik nach zusätzlichen Kriterien in Form von Potentialfunktionen zu optimieren. Dafür wird anstelle von z ein Gradient des zu optimierenden Potentials $\nabla H(\theta)$ eingesetzt. Diese Vorgehensweise wurde für die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Roboterbewegung eingesetzt. Manche von diesen Leistungskriterien wurden im Kapitel 1 aufgelistet.
Die Lösung durch Pseudoinverse mit homogenen Teil wurde auch praktisch eingesetzt. Nach diesen Algorithmus arbeitet zB. die Steuerung der 12-Gelenkigen großraum Roboters zum Waschen von Flugzeugen [28]. Dieses Gerät wird seit Mitte 1994 serienmäßig in der Firma AEG gebaut.

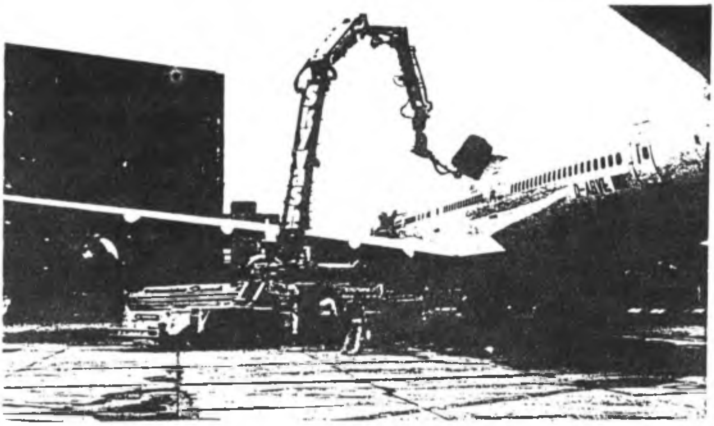

Bild 2. Skywash - der AEG Großraumroboter für das Waschen von Flugzeugen (Quelle: Fa. AEG)

4. Wiederholbarkeit der Roboterbewegung (eng.: Repeatable Control)

Es hat sich gezeigt, daß die erzeugte Bewegung nach vielen Methoden, auch durch Pseudoinverse, nicht wiederholbar sein können. Unter wiederholbaren Lösung wird hier ein solcher Algorithmus verstanden, der folgende Eigenschaft aufweist: nah liegende Trajektorien im Arbeitsraum (Kartesischem Raum) entsprechen nah liegenden Trajektorien in Maschinenkoordinaten Raum. Diese Eigenschaft ist besonders wichtig für die zyklische Aufgaben. Wenn ein Roboter eine geschlossene Bahn zyklisch abzufahren hat, dann erwartet wird, daß er gleiche Konfiguration der Armen immer am Start jeder Wiederholung hat. Ein nicht wiederholbarer Algorithmus kann eigentlich ein Test der Bahn unmöglich machen, z.B. um sich zu vergewissern, daß der Roboter die bestimmte Hindernisse umfährt, oder daß die Gelenkverfahrbereiche eingehalten werden.
Schon Klein und Huang [29] haben am Beispiel eines flachen Roboters mit drei Gelenken gezeigt, daß die Lösung durch Pseudoinverse nicht wiederholbar sein kann.

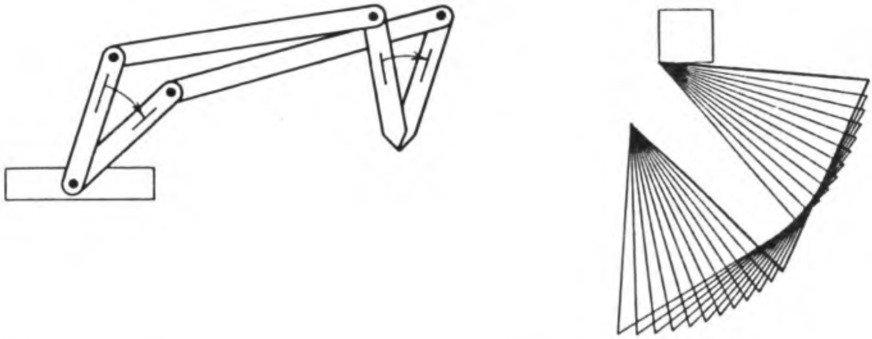

Bild 3. Dreigelenkige 2D-Roboter, auf der Quadratformigen Bahn unter Pseudoinverse Steuerung, gezeigt am gleichen Eckpunkt während aufeinanderfolgenden Zyklen [29].

Letztens gibt es große Interesse am Problem der Wiederholbarkeit [26]. Baker und Wampler [2] haben sehr guten theoretischen Beitrag dazu gegeben, wo sie mit Hilfe von topologischen Methoden gezeigt haben, daß die Bereiche der Wiederholbarkeit begrenzt sind, und daß der wiederholbare Algorithmus der inversen kinematischen Funktion, also Rückwärtstransformation entspricht. Eine Reihe von Methoden sind wiederholbar. Einige sind im folgendem beschrieben.

4.1. Erweiterte Jacobian (eng.: Extended oder Augmented Jacobian)

Die Methode des erweiterten Jacobians, welche vom Baillieul [8] vorgeschlagen wurde ist wiederholbar. Die Methode des erweiterten Jacobians braucht eine Aufstellung von zusätzlichen Bedingungen für Gelenkkoordinaten in folgender Form $h(\theta) = 0$. Zusammen mit der Gleichung für das Fahren einer Bahn x entsteht dadurch ein folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} x &= f(\theta) \\ 0 &= h(\theta) \end{aligned} \tag{6}$$

Jetzt kann eine differential Gleichung aufgestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{pmatrix} = J_e \dot{\theta} \qquad mit \qquad J_e = \begin{bmatrix} J \\ \partial h(\theta)/\partial\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ \nabla h(\theta) \end{bmatrix} \tag{7}$$

Wenn die Anzahl der Bedingung im Gleichungssystem $h(\theta) = 0$ ist genau n-m, dann ist der erweiterte Jacobian J_e eine quadratische Matrix. Wenn diese Matrix noch nicht singulär ist, können die Geschwindigkeiten in den Gelenken ganz einfach durch die Inversion J_e^{-1} gefunden werden.

4.2. Konfigurationssteuerung (eng.: configuration control)

Seraji [9] hat eine Konfigurationssteuerung vorgeschlagen. Dabei werden zusätzliche Zwangsfunktionen (constraints) $\Phi(\theta)$ aufgestellt, die der gewünschten Ausnutzung der Redundanz entsprechen. Die Anzahl von diesen Zwangsfunktionen muß allerdings genau n-m sein. Damit kann ein Gleichungssystem mit n Gleichungen und n unbekannten θ aufgestellt werden:

$$x_e = \begin{pmatrix} x \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(\theta) \\ \Phi(\theta) \end{pmatrix} \qquad (8)$$

Ein so erzeugtes System ist schon nicht mehr redundant und kann einfach eine bestimmte Bahn fahren:

$$x_e(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \Phi(t) \end{pmatrix} \qquad (9)$$

Ein einfaches Beispiel ist im Bild 4 gezeigt. Für einen 7-gelenkigen Roboter wird als Zwangsfunktion ein Winkel a gewählt $\Phi(\theta) = a$.

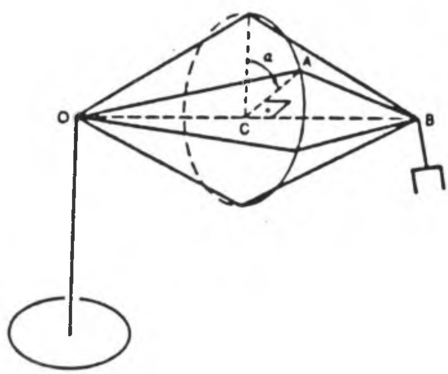

Bild 4. 7-gelenkiger Roboter und die Definition des Winkels a für die Konfigurationssteuerung [9]

Bei der Konfigurationssteuerung kann auch die Optimierung der Leistungskriterien eingesetzt werden. Für die Lageregelung hat Seraji ein adaptierbares Regelungssystem aufgebaut [9].

4.3. Lösung in geschlossener Form (eng.: closed form solution)

Chang [10] und Galicki [11] haben eine Lösung der Redundanz in einer geschlossenen Form aufgebaut. Die gestellte Aufgabe lautet:

$$\begin{gathered} F(\theta) = f(\theta) - x = 0 \\ \textit{Optimierung des Leistungskriterium } H(\theta) \end{gathered} \qquad (10)$$

Chang benutzte für diese Aufgabe die Methode der Lagrangeschen Multiplikatoren und Galicki hat eine Methode des Frechet Ableitung eingesetzt. Beide Methoden führen zu der Aufstellung des Gleichungssystems mit n Gleichungen und n unbekannten θ:

$$\begin{gathered} f(\theta) - x = 0 \\ Z\nabla H(\theta) = 0 \end{gathered} \qquad (11)$$

wobei: $Z = [(J_m^{-1} J_{n-m})^T, -I_{n-m}]$ mit J_m, J_{n-m} als Teile der Jacobi Matrix ($J = [J_m, J_{n-m}]$, J_m enthält linear unabhängige Spalten von Jacobi Matrix J).

Mitsi und Bouzakis [24] haben diese Methode für das Hindernisumfahren benutzt (Bild 5).

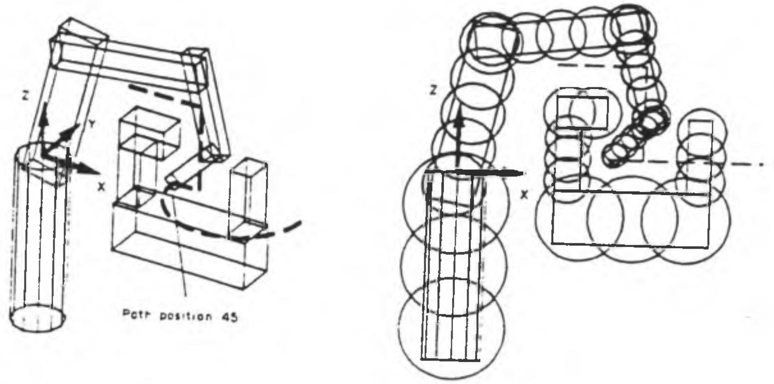

Bild 5. Prinzip des Hindernissumfahren; Roboter und Hindernisse mit Kugeln abgeschirmt [24].

5. Kompakte Methode der quadratischen Programmierung (eng. compact QP method)

In der letzten zwei Jahren wurde eine sehr intersante Lösung der Redundanz mit der Hilfe von sog. Methode der quadratischen Programmierung (QP) entwickelt [13][14]. Die Formulierung der QP Methode lautet:

$$\begin{aligned} &\textit{Minimierung} && G\dot{\theta} + \frac{1}{2}\dot{\theta}^T H \dot{\theta} \\ &\textit{bei der Einhaltung} && J\dot{\theta} = \dot{x} \\ & && A\dot{\theta} \geq B \end{aligned} \qquad (12)$$

Die Ungleichung aus dieser Formulierung wird für die Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung in der Gelenken benutzt und die zu minimierende quadratische Form für Hindernissumfahren und Wiederholbarkeit der Roboterbewegung. Für die Lösung des QP-Problemes (12) wird ein effizientes QP Algorithmus von Goldfarb und Idnani [30] eingesetzt.

6. Steuerungskonzept der redundanter Roboter für den industriellen Einsatz

Aus der Analyse der entwickelten Steuerungsalgorithmen für die redundante Roboter, ihren Möglichkeiten und Eigenschaften bezüglich der industriellen Einsatz, kann folgender allgemeiner

Wunschkatalog für das Steuerungskonzept erstellt werden:

- lokale Optimierung um real-time Korrekturen zu ermöglichen,
- wiederholbarer Algorithmus für die zyklische Aufgaben, die meistens in Industrie vorkommen,
- wählbare Zusatzaufgaben, definiert durch Anwender (offene Programmierungskonzept),
- geeignet für die serielle Kinematik, koordinierte Bewegung mehrer Roboter und mobile Roboter.

7. Literatur

[1] Galicki M.: Applying the calculus of variations to redundancy resolution of manipulators. Robotics research and application. WNT, Warszawa 1992.

[2] Baker D.R., Wampler II C.W.: On the inverse kinematics of redundant manipulators. The Inter. J. of Robotics Research vol. 7, no. 2, Mar. 1988.

[3] Whitney D.E.: Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses, IEEE Trans. on Man-Machine System vol 10 no 2 Jun. 1969.

[4] Liegeois A.: Automatic supervisory control of the configuration and behaviour of multibody mechanisms. IEEE Trans. on System Man & Cybernetics vol. 7, no. 12, Dec. 1977.

[5] Vukobratovic M., Kircanski M.: A dynamic approach to nominal trajectory synthesis for redundant manipulators. IEEE Trans. on System Man & Cybernetics vol. 14, no. 4, Jul. 1984.

[6] Wampler II C.W.: Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. IEEE Trans. on System Man & Cybernetics vol. 16, no. 1, Jul. 1986.

[7] Seraji H., Colbaugh R.: Improved configuration control for redundant robots. J. of Robotic Systems 7, 1990.

[8] Baillieul J.: Kinematic programming alternatives for redundant manipulators. IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, St. Louis, USA, 1985.

[9] Seraji H.: Configuration control of redundant manipulators: theory and implementation, IEEE Trans. on Robotics & Automation vol. 5, no. 4, Aug. 1989.

[10] Chang P. H.: A closed-form solution for inverse kinematics of robot manipulators with redundancy. IEEE J. of Robotics & Automation vol. 3, no. 5, Oct. 1987.

[11] Galicki M.: A closed solution to the inverse kinematics of redundant manipulators. Mechanism & Machine Theory vol. 26, no. 2, 1991.

[12] Palm R., Rehfueß U.: Fuzzy-Steuereung in der Robotik. Mikroeletronik Bd. 6 H. 1, 1992.

[13] Cheng F.T., Chen T.H., Sun Y.Y.: Efficient algorithm for resolving manipulator redundancy - the compact QP method. IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, Nice, France, 1992.

[14] Cheng F.T., Chen T.H., Wang Y.S., Sun Y.Y.: Obstacle avoidance for redundant manipulators using the compact QP method. IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, Atlanta, USA, 1993.

[15] Seraji H.: An on-line approach to coordinated mobility and manipulation. IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, Atlanta, USA, 1993.

[16] Duelen G., Kirchoff U., Held J., Münch H.: Automatische Bewegungssynthese für bahnbezogen kooperierende Industrieroboter. Robotersysteme 3, 1987.

[17] Münch H.: Bewegungssynthese zur Steuerung redundanter und kooperierender Kinematiken. Produktionstechnik Berlin nr 94, Hanser, 1991.

[18] Koch T., Pritschow G.: Koordinierte Bahnführung zweier Roboter. Robotersysteme 7, 1991.

[19] Koch T.: Metoda Koordynacji ruchu po trajektorii dwóch robotów. Konferencja: Podstawy technologii maszyn'91, Wrocław 1991.

[20] Koch T.: Robots movement coordination. Robotics research and application. WNT, Warszawa 1992.

[21] Dubey R., Luh J.Y.S.: Redundant robot control using task based performance measures, J. of Robotic Systems 5, 1988.

[22] Yoshikawa T.: Manipulability of robotic mechanisms. The Inter. J. of Robotics Research vol. 4, no. 2, Summer 1985.

[23] Maciejewski A. A., Klein C. A.: Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments. The Inter. J. of Robotics Research vol. 4, no. 3, Fall 1985.

[24] Mitsi S., Bouzakis K. D.: Simulation of redundant manipulators for collision avoidance in manufacturing and assembly environments. Mechanism & Machine Theory vol. 28, no. 1, 1993.

[25] Nakamura Y., Hanafusa H., Yoshikawa T.: Task-priority based redundancy control of robot manipulators. The Inter. J. of Robotics Research vol. 6, no. 2, Summer 1987.

[26] Roberts R.G., Maciejewski A.A.: Repeatable generalized inverse control strategies for kinematically redundant manipulators. IEEE Trans. on Automatic Control vol. 38, no. 5, May 1993.

[27] Klema V.C., Laub A.J.: The singular value decomposition: its computation and some applications, IEEE Trans. on Automatic Control vol 25 no 2 Apr. 1980.

[28] Schumacher H., Braun J.: "Skywash": Innovative Steuerungsfunktionen für Großroboter. VDI Berichte 1094: Intelligente Steuerung und Regelung von Robotern, VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.

[29] Klein C.A., Huang C.-H.: Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators, IEEE Trans. on System Man & Cybernetics vol 13 no 3 Mar. 1983.

[30] Goldfarb D., Idnani A.: A nummerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs. Mathematical Programming vol 27, 1983.

Gutachter: Andrzej Buchacz