

Kameragestützte räumliche Regelung von schnellen Roboterarmen

Camera-based spatial control of fast robot arms

Friedrich Lange, Gerd Hirzinger, Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Der Artikel beschäftigt sich mit einer die Roboterdynamik berücksichtigenden verzögerungsfreien Integration von Korrekturtermen in programmierte Roboterbahnen. Es wird demonstriert, dass eine Standard-CCD-Kamera mit schneller Bildverarbeitung ausreicht, während der Bewegung solche Korrekturen zu erfassen und ohne Reduzierung der Verfahrensgeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit auszuführen. Im Experiment fährt ein Roboter mit 0.7 m/s an einer gebogenen Röhre entlang. Eine seitlich vom Werkzeug mitgeführte Kamera vermisst neben der Lage der Röhre im Raum auch deren Form und erlaubt so - z. B. beim Auftragen von Kleber - die Einhaltung eines Trackingfehlers von etwa 1 mm. Das gesamte System benötigt außer der industriellen Robotersteuerung nur eine Kamera und einen einfachen Frame-Grabber, ist also extrem kostengünstig realisierbar.

Abstract

The article deals with the integration of non-delayed refinements to programmed robot paths, bearing the robot's dynamics in mind. It is demonstrated that a standard CCD-camera with fast image processing is sufficient to sense such corrections during motion and to execute them with high accuracy without reducing speed. In the experiment a robot follows a bent tube at 0.7 m/s. A camera that is mounted lateral to the tool measures not only the pose of the tube but also its shape in order to keep a tracking error of say 1 mm, e.g. when spraying glue. The whole system is extremely cost effective since additional hardware is limited to a camera and a basic frame grabber.

1. Einleitung

Es gibt eine Reihe von Aufgaben für Industrieroboter, bei denen die absoluten Genauigkeitsanforderungen erheblich reduziert werden könnten, wenn man während der Bewegung die

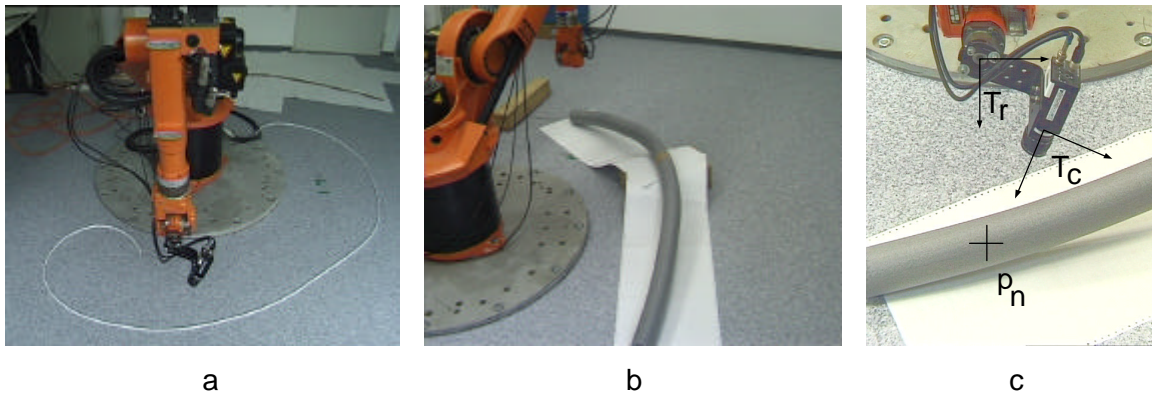


Bild 1: Demonstrationsaufgaben mit natürlichem und künstlichen Hintergrund und versetzt angeordneter Kamera

Lage von Werkstücken in Bezug auf den Tool Center Point (tcp) ermitteln kann.

Als Beispiel zeigen wir zwei Demonstrationsaufgaben (Bild 1), in denen ein Roboter mit mitgeführter Kamera durch Beobachtung von parallel zur Bewegung verlaufenden ggf. gekrümmten Kanten die grob programmierte Bahn bei Nominalgeschwindigkeit korrigiert. Konkret wird bei den Demonstrationen von einer horizontalen Kreisbahn ausgegangen, die aufgrund der Bilddaten sowohl radial als auch vertikal korrigiert wird. Eine mögliche Anwendung ist das Auftragen von Kleber auf flexible oder ungenau zugeführte Werkstücke. Andere Beispiele sind Laserschneiden oder -löten, wobei die gewünschte Bahn erst während der Bewegung bestimmt wird, z. B. durch Vermessung der Begrenzungslinien des Werkstücks. Bei all diesen Aufgaben wird hohe Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Bahngeschwindigkeit gefordert.

Die Kamera ist seitlich angeordnet, um Platz für ein Werkzeug zu lassen. Bei konstanter Bewegungsrichtung entspricht dies einem vorlaufendem Sensor [9,10]. Ansonsten muss die Kamera so gekippt werden, dass der Tool Center Punkt (tcp) etwa in Bildmitte liegt (siehe Bild 1c). Dabei wird der vom Werkzeug verdeckte Teil des Bildes nicht ausgewertet.

Ähnliche Verfahren wurden schon vorgeschlagen, beschränken sich aber auf einfache Szenarien [7,10], stellen höhere Anforderungen an die Aufgabenbeschreibung und die Prozessorleistung [8] oder arbeiten bei langsameren Geschwindigkeiten [3], um auch Rotationen zwischen nomineller und realer Welt zu berücksichtigen. Letzteres ist jedoch meist nicht nötig.

2. Regelungskonzept

Wir unterscheiden zwischen der Positionsregelung und der Bahnplanung. Erstere sorgt für einen „kartesisch idealen Roboter“, bei dem zu jedem Zeitpunkt die Armposition \mathbf{x}_a gleich

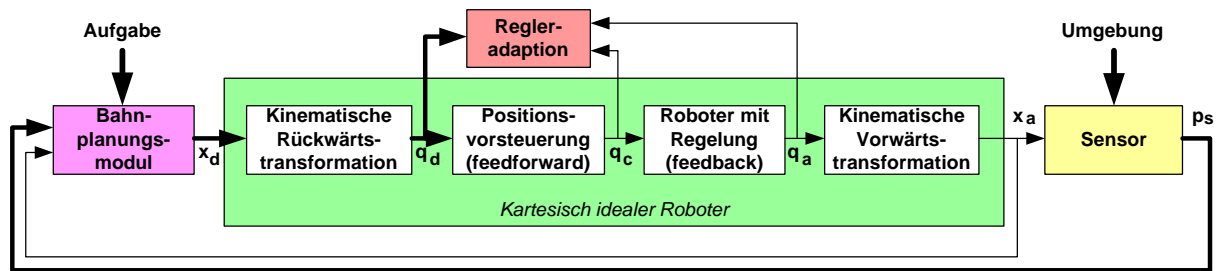


Bild 2: Architektur der Regelung

der Sollposition \mathbf{x}_d ist. Die Bahnplanung bestimmt z. B. durch Bildverarbeitung die Sollpositionen zu den einzelnen Abtastzeitpunkten. Beides zusammen ergibt die Regelung aufgrund der Bilddaten (siehe Bild 2).

2.1. Positionsregelung

Zur Positionsregelung lässt sich prinzipiell die übliche industrielle Steuerung verwenden. Sie erfordert allerdings wegen der online Bestimmung der Sollpositionen \mathbf{x}_d einen besonderen, meist als Sensorschnittstelle bezeichneten Eingang.

Bei gekrümmten Bahnen und hohen Geschwindigkeiten raten wir zur Erhöhung der Genauigkeit zu neueren Steuerungsverfahren, die neben der Sollposition auch die Sollgeschwindigkeit und -beschleunigung oder zukünftige Sollpositionen verarbeiten [1,2,4]. In unserem Laboraufbau verwenden wir eine auf einer normalen industriellen Steuerung aufbauende adaptive Vorsteuerung mit spezieller prädiktiver Schnittstelle [6,5]. Sie benötigt in jedem Abtastschritt die Sollpositionen der nächsten n_d Abtastschritte (fette Linien in Bild 2), wobei dies etwa der doppelten Zeitkonstante des geregelten Roboters entspricht. Dadurch ist eine Realisierung des idealen Roboters möglich.

3. Bahnplanung

Die Aufgabe der Bahnplanung besteht also darin, die Sollpositionen der nächsten n_d Abtastschritte zu bestimmen. Es erweist sich als vorteilhaft, von einer Referenzbahn auszugehen, zu der nominale Linien definiert sind. Die Aufgabe besteht dann darin, die Bahn zu bestimmen, die sich zu den realen Linien so verhält wie die Referenzbahn zu den nominalen Linien. Diese gesuchte Bahn wird als Sollbahn bezeichnet und an die Regelungsebene übertragen. Es wird also angesetzt, dass die sensierten Linienpunkte \mathbf{p}_s bzgl. des Soll-Koordinatensystems \mathbf{T}_d so liegen wie die nominalen Linienpunkte \mathbf{p}_n bzgl. des Referenz-Koordinatensystems \mathbf{T}_r . Das ergibt

$${}^d \mathbf{p}_s = {}^r \mathbf{p}_n \quad (1)$$

Dabei werden von den Linien jeweils die Punkte betrachtet, die in der x-z-Ebene des Referenzsystems liegen, also die Punkte mit ${}^r y_n = 0$ bzw. ${}^d y_s = 0$. Bei Vernachlässigung von Orientierungsunterschieden zwischen \mathbf{T}_r und \mathbf{T}_d gilt auch ${}^r y_s = 0$.

Im allgemeinen Fall mit gekrümmter Referenzbahn und einer Kameraanordnung schräg zum Werkzeug bzw. zu den Linien (siehe Bild 1c) verwendet man die Transformationsmatrix der Istlage der Kamera bzgl. der Referenzlage des Werkzeugs ${}^r \mathbf{T}_c$. Dabei bezieht sich die Kameralage auf den Aufnahmezeitpunkt eines Bildes und die Werkzeuglage auf einen beliebigen Zeitpunkt, für den die Bahnkorrektur bestimmt werden soll.

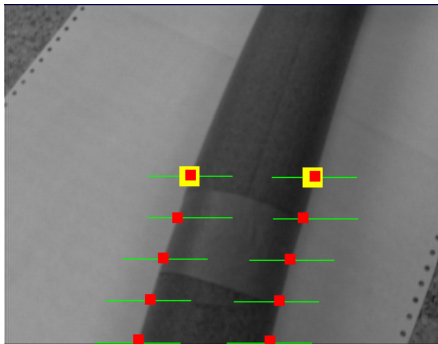


Bild 3: Bild aus der robotergeführten Kamera

Die Linien werden im Bild an einzelnen Punkten durch Kantensuche vermessen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Linien annähernd senkrecht im Bild liegen, so dass die Auswertung von horizontalen Linien (siehe Bild 3) möglich ist. Dadurch kann bei Verarbeitung einzelner Halbbilder die größtmögliche Genauigkeit erreicht werden. Die gefundenen Bildpunkte werden durch die vorher identifizierten internen und externen Kameraparameter (u. a. die Linsenverzeichnung) korrigiert.

Da die in festen Bildzeilen gesuchten Bildpunkte von unterschiedlichen Linien insbesondere bei Orientierungsänderungen in ${}^r \mathbf{T}_c$ nicht zum gleichen Punkt der Referenzbahn gehören, werden die Linien zunächst durch Polynome repräsentiert. Die weitere Berechnung der räumlichen Bahnkorrekturen basiert dann auf Linienpolynomen

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{h}) \quad (2)$$

mit \mathbf{x} und \mathbf{h} als horizontaler und vertikaler normalisierter Bildkoordinate eines Linienpunkts.

Unter Verwendung der Projektionsgleichung

$${}^c \mathbf{p}_s = \left(\mathbf{x} \cdot {}^c z_s \quad \mathbf{h} \cdot {}^c z_s \quad {}^c z_s \quad 1 \right)^T \quad (3)$$

ergibt das

$$0 = {}^r y_s = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot {}^r \mathbf{T}_c \cdot {}^c \mathbf{p}_s = ({}^r \mathbf{T}_{c10} \cdot \mathbf{x} + {}^r \mathbf{T}_{c11} \cdot \mathbf{h} + {}^r \mathbf{T}_{c12}) \cdot {}^c z_s + {}^r \mathbf{T}_{c13}, \quad (4)$$

wobei z. B. ${}^r \mathbf{T}_{c10}$ die Komponente 1,0 der Transformationsmatrix vom Referenzsystem zum Kamerasystem ist.

Die entsprechenden Gleichungen für ${}^r x_s$ und ${}^r z_s$ sind etwas komplizierter. Bei gleicher Orientierung von \mathbf{T}_r und \mathbf{T}_d lässt sich unter Verwendung von Gleichung (1) formal schreiben:

$${}^r x_s = {}^r x_d + {}^d x_s = {}^r x_d + {}^r x_n, \quad (5)$$

wobei ${}^r x_n$ der nominale Abstand der Linie von der Referenztrajektorie ist. Dieser Abstand ist vorgegeben, z. B. als Abstand zwischen Klebelinie und sichtbarer Kante. ${}^r x_d$ ist die von der einzelnen Linie unabhängige gesuchte Bahnkorrektur.

$${}^r x_d = ({}^r \mathbf{T}_{c00} \cdot \mathbf{x} + {}^r \mathbf{T}_{c01} \cdot \mathbf{h} + {}^r \mathbf{T}_{c02}) \cdot {}^c z_s + {}^r \mathbf{T}_{c03} - {}^r x_n \quad (6)$$

Durch Vergleich von ${}^r x_d$ aus zwei Linien ergibt sich

$$({}^r \mathbf{T}_{c00} \cdot \mathbf{x}_0 + {}^r \mathbf{T}_{c01} \cdot \mathbf{h}_0 + {}^r \mathbf{T}_{c02}) \cdot {}^c z_{s_0} + {}^r \mathbf{T}_{c03} - {}^r x_{n_0} = ({}^r \mathbf{T}_{c00} \cdot \mathbf{x}_1 + {}^r \mathbf{T}_{c01} \cdot \mathbf{h}_1 + {}^r \mathbf{T}_{c02}) \cdot {}^c z_{s_1} + {}^r \mathbf{T}_{c03} - {}^r x_{n_1}. \quad (7)$$

In gleicher Weise lässt sich

$${}^r z_d = ({}^r \mathbf{T}_{c20} \cdot \mathbf{x} + {}^r \mathbf{T}_{c01} \cdot \mathbf{h} + {}^r \mathbf{T}_{c02}) \cdot {}^c z_s + {}^r \mathbf{T}_{c03} - {}^r z_n \quad (8)$$

und damit

$$({}^r \mathbf{T}_{c20} \cdot \mathbf{x}_0 + {}^r \mathbf{T}_{c21} \cdot \mathbf{h}_0 + {}^r \mathbf{T}_{c22}) \cdot {}^c z_{s_0} + {}^r \mathbf{T}_{c23} - {}^r z_{n_0} = ({}^r \mathbf{T}_{c20} \cdot \mathbf{x}_1 + {}^r \mathbf{T}_{c21} \cdot \mathbf{h}_1 + {}^r \mathbf{T}_{c22}) \cdot {}^c z_{s_1} + {}^r \mathbf{T}_{c23} - {}^r z_{n_1} \quad (9)$$

bestimmen, wobei ${}^r z_{n_0}$ und ${}^r z_{n_1}$ die meist gleichen nominellen Abstände zur Linie sind, also z. B. der gewünschte Abstand zwischen Klebepistole und Werkstück.

Bei zwei Linien hat man nun mit zwei Gleichungen (4), Gleichung (7), Gleichung (9) und zwei Gleichungen (2) insgesamt sechs Gleichungen zur Bestimmung von \mathbf{x}_0 , \mathbf{x}_1 , \mathbf{h}_0 , \mathbf{h}_1 , ${}^c z_{s_0}$ und ${}^c z_{s_1}$, wobei wegen der Nichtlinearität (2) eine numerische Lösung erforderlich ist, die jedoch i. allg. innerhalb von 2 Iterationen konvergiert. Die gesuchten Komponenten ${}^r x_d$ und ${}^r z_d$ der Bahnkorrektur ergeben sich dann durch Einsetzen in die Gleichungen (6) und (8) für eine der Linien.

Sofern nur eine Linie sichtbar ist, benötigt man a priori Wissen, z. B. den Abstand der Linie oder ${}^r z_d = 0$. In dem Fall beschränkt sich das Gleichungssystem auf die Gleichungen (2), (4) und (8) zur Bestimmung von \mathbf{x} , \mathbf{h} und ${}^c z_s$, die in Gleichung (6) eingesetzt werden.

Bei jeder neuen Aufnahme werden mit fester Kameralage \mathbf{T}_c für mehrere Referenzlagen \mathbf{T}_r die Bahnkorrekturen bestimmt. Um die Bahnkorrekturen auf diese Weise nicht für alle n_d Abtastschritte (vgl. Abschnitt 2.1) berechnen zu müssen, werden sie durch Parameterschätzung als weitere Polynome abgelegt. Diese Polynome gestatten dann das Auslesen aller gewünschten Korrekturen mit minimalem Aufwand. Daher ist das Verfahren auch bei

$n_d \approx 20$ anwendbar und liefert mit einer geeigneten Vorsteuerung minimale Bahnfehler.

Die indirekte Bestimmung der Sollpositionen durch Bahnkorrekturen bzgl. einer Referenzbahn ist vorteilhaft, da dadurch gekrümmte Bahnen mit Änderung der Orientierung problemlos möglich sind. Es wird lediglich vorausgesetzt, dass die Bahnkorrektur selbst keine Rotationen enthält.

4. Experimente

Zunächst wird eine gebogene Röhre betrachtet, an der ein KUKA KR6/1 Roboter mit einer Bahngeschwindigkeit von 0.7 m/s entlangfahren soll (Bild 1b). Dabei erfolgt die Bildverarbeitung, bei der die Begrenzungslinien der Röhre im Bild vermessen werden, im Kameratakt von 50 Hz und damit asynchron zur Regelung mit 83 Hz. Beide Programme laufen parallel auf dem 400 MHz Prozessor der industriellen Steuerung KRC1, die Steuerung unter VxWorks und die Bildverarbeitung unter Windows95. Somit beschränkt sich die gegenüber der Standardausstattung zusätzliche Hardware auf die Kamera selbst und einen einfachen Frame-Grabber.

Tabelle 1 zeigt die Bahngenauigkeit. Beim Verfolgen von nur einer Randlinie liegt die Röhre eben auf dem Boden. Dabei wird auch bei großen Unterschieden zwischen der nominellen und der realen Röhre ein mittlerer Bildpunktfehler von etwa 1 Pixel (ungefiltert) erreicht.

Tabelle 1: Bahnfehler beim Verfolgen von 1 oder 2 Randlinien einer gebogenen Röhre

	1 Linie	2 Linien	
mittlerer Bildpunktfehler	1.2 Pixel	1.4 Pixel	
maximaler Bildpunktfehler	2.9 Pixel	4.4 Pixel	
mittlerer Bahnfehler (horizontal, vertikal)	0.3 mm	0.3 mm	0.9 mm
maximaler Bahnfehler (horizontal, vertikal)	1.0 mm	1.0 mm	2.4 mm

Bei einer räumlichen Bahn neigt das System zu leichten Schwingungen, da einerseits der Abstand aufgrund der Geometrie nicht so genau messbar ist und da andererseits elastische Schwingungen des Roboters angeregt werden, die eine genaue Erfassung der Kameraposition verhindern. Trotzdem werden im Mittel in beiden Freiheitsgraden Regelabweichungen von einem Millimeter unterschritten (Bild 4). Die erreichte Bahngenauigkeit ist somit gleichwertig zum aufwändigeren Verfahren aus [8]. Die Beobachtung der Kameraposition zur Erhöhung der Messgenauigkeit und damit zur Vermeidung von Schwingungen ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

Als weiteres Experiment folgt der Roboter einem hellen Kabel (Bild 1a), ebenfalls mit

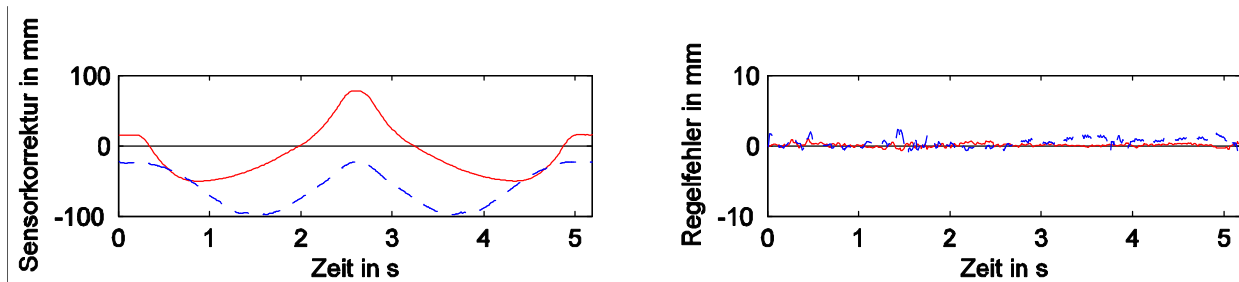


Bild 4: Sensorkorrektur und Regelabweichung beim räumlichen Verfolgen der Röhre (durchgezogen = horizontal, gestrichelt = vertikal, man beachte die unterschiedlichen Maßstäbe.)

0.7 m/s. Dabei zeigt sich, dass trotz strukturiertem Boden kein künstlicher Hintergrund erforderlich ist. Die Korrektur erfolgt rein horizontal mit unterschiedlichen Verfahren. Dabei wird wegen der stärkeren Sensorkorrektur ein etwas größerer Bahnfehler gemessen (Tabelle 2), hervorgerufen durch Approximationsfehler zwischen den kubischen Polynomen und der wirklichen Linienform.

Tabelle 2: Bahnfehler beim Abfahren eines Kabels mit verschiedenen Verfahren

	Visual servoing mit PD-Regler ohne Prädiktion	Positionsregelung ohne Vorsteuerung mit Prädiktion	Positionsregelung mit Vorsteuerung mit Prädiktion
mittlerer Bildpunktfehler	35 Pixel	1.9 Pixel	1.3 Pixel
maximaler Bildpunktfehler	63 Pixel	4.7 Pixel	3.6 Pixel
mittlerer Bahnfehler	9.7 mm	0.8 mm	0.6 mm
maximaler Bahnfehler	19.9 mm	2.4 mm	1.5 mm

Zum Vergleich mit dem in diesem Artikel beschriebenen Verfahren (letzte Spalte) wird einerseits, bei gleicher Steuerungsarchitektur, die Vorsteuerung weggelassen. Im inneren Regelkreis wird also nur der industrielle Positionsregler verwendet. Dabei zeigt sich, dass nur mit einer geringen Erhöhung der Bahnfehler zu rechnen ist, da lediglich die Positionsregelung ohne prädiktive Schnittstelle erfolgt. Die Bildverarbeitung arbeitet weiterhin prädiktiv, d. h. unter Einbeziehung der oberen oder unteren Randbereiche des Bildes.

Zum anderen wird ein klassischer visual servoing Algorithmus verwendet, der die Lage der Linie nur in Bildmitte bewertet, also ohne Prädiktion. Die Regelung erfolgt ohne Kenntnis der jeweiligen Kamerapositionen durch einen PD-Algorithmus für die kartesischen Kommandos. Aufgrund der fehlenden Prädiktion ist das Ergebnis wesentlich schlechter und würde ohne Begrenzung die erlaubten Beschleunigungen des Roboters überschreiten.

5. Schlussfolgerung

Der Artikel zeigt, dass Bildverarbeitung auch bei hohen Bahngeschwindigkeiten einsetzbar ist und eine genaue Regelung des Roboters erlaubt. Dabei beschränkt sich zusätzliche Hardware auf kostengünstige Standardkomponenten. Entscheidend ist eine prädiktiver Auswertung der Bildinformation, u. U. in Kombination mit einer adaptiven Positionsvorsteuerung. Neben der gezeigten Verbesserung beim Bahnfahren an nur grob bekannten Werkstücken lassen sich durch Vermessung des Ziels während der Bewegung auch pick-and-place Aufgaben oder einfache Montageszenarien beschleunigen.

Literatur

- [1] C. H. An, C. G. Atkeson, and J. M. Hollerbach. *Model-Based Control of a Robot Manipulator*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1988.
- [2] D. W. Clarke, C. Mohtadi, and P. S. Tuff. Generalized predictive control - part I. the basic algorithm. *Automatica*, 23(2), pages 137-148, 1987.
- [3] J. A. Gangloff and M. F. de Mathelin. Visual servoing of a 6-dof manipulator for unknown 3-d profile following. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 18(4):511–520, August 2002.
- [4] M. Grotjahn and B. Heimann. Model-based feedforward control in industrial robotics. *The International Journal on Robotics Research*, 21(1):45–60, January 2002.
- [5] F. Lange. *Adaptiv vorausplanende Steuerung für schnelle sensorbasierte Roboterbewegungen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003. <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=2003/informatik/1>.
- [6] F. Lange and G. Hirzinger. Learning of a controller for non-recurring fast movements. *Advanced Robotics*, 10(2):229–244, April 1996.
- [7] F. Lange and G. Hirzinger. Is vision the appropriate sensor for cost oriented automation? In R. Bernhardt and H.-H. Erbe, editors, *Cost Oriented Automation (Low Cost Automation 2001)*, Berlin, Germany, October 2001. Published in IFAC Proceedings, Elsevier Science, 2002.
- [8] F. Lange and G. Hirzinger. Predictive visual tracking of lines by industrial robots. *accepted by the International Journal on Robotics Research*, 2003.
- [9] G. Pritschow, A. Horn und K. Grefen. Dynamisches Verhalten und Grenzen sensorgeführter Industrieroboter mit vorausblickendem Sensor. *Robotersysteme*, 8, Seiten 155-161, 1992.
- [10] Dr. Barthel Sensorsysteme. Der SCOUT-Sensor. <http://www.scout-sensor.com/>.