

# Anwendungsspezifische Adaption für schnelle sensorgestützte Roboterbewegungen

Custom-designed adaptation for fast sensor-based robot motion

Friedrich Lange, Gerd Hirzinger, Oberpfaffenhofen

## Kurzfassung

Bei schnellen sensorgestützten Roboterbewegungen werden an Roboter und Sensorik hohe Anforderungen gestellt, für die normale Kalibrierungsmethoden oft nicht ausreichen. Am Beispiel einer an einem Roboterarm montierten Kamera zum schnellen Verfolgen einer gekrümmten Linie werden die durch die Kalibrierungsfehler verursachten Bahnabweichungen minimiert. Zur Reduktion des Einflusses unmodellierter Eigenschaften erfolgt die Adaption an der Anwendung selbst. Dabei werden auch Ungenauigkeiten der Modellparameter im Zusammenspiel von Kamera und Roboter kompensiert. Im Experiment wird durch die Adaption eine Reduktion des Bahnfehlers um den Faktor 3 gemessen.

## Abstract

Usual calibration methods are not always accurate enough to meet the requirements on precision of robots and sensors for fast sensor-based robot motion. Path deviations caused by calibration errors are minimized for a robot mounted camera used for high-speed tracking of a curved line. Adaptation is executed using the application, to reduce the effect of unmodeled features. Inaccuracies of model parameters of the interaction of camera and robot are compensated as well. The experiment quantifies a reduction of the path error by a factor of three, effectuated by the adaptation.

## 1. Einleitung

Um mit einem handelsüblichen Industrieroboter mit hoher Geschwindigkeit an a priori unbekannt Linien, z. B. Kabeln oder Kanten eines Werkstücks entlangzufahren (siehe Bild 1), benötigt man neben geeigneter Sensorik zur Erfassung der Sollbahn auch eine spezielle Regelung.

In früheren Veröffentlichungen [1,2] haben die Autoren dazu eine zweistufige Architektur (siehe Bild 3) vorgeschlagen. In der unteren Ebene erfolgt eine prädiktive Positionsregelung, die den vom Roboterhersteller vorgesehenen Regler durch eine adaptive Vorsteuerung ergänzt. Die obere Ebene definiert die Solltrajektorie unter Verwendung von Sensordaten. Schnittstelle beider Ebenen ist neben der aktuellen Soll- und Ist-Lage des Werkzeugs (Tool Center Point TCP) auch der in den nächsten Abtastschritten abzufahrende Abschnitt der Solltrajektorie. Er ermöglicht durch entsprechende Vorsteuerung die Realisierung eines *idealen Roboters*, der verzögerungsfrei exakt die Sollbahn abfährt.

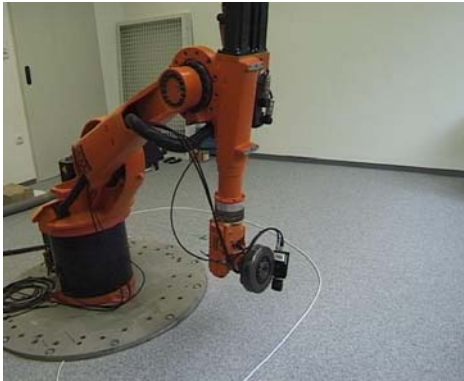


Bild 1: Aufgabenstellung:  
Bewegung des Roboters, so dass das Kabel entgegen der programmierten Bahn immer in Bildmitte bleibt

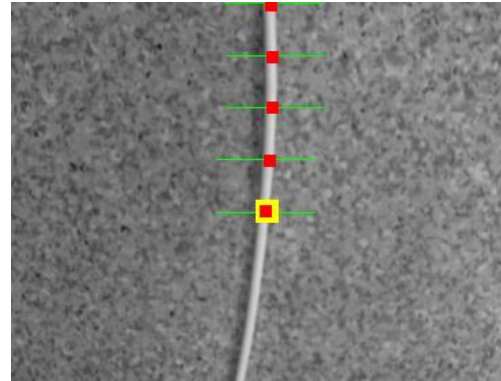


Bild 2: Bild der robotergeführten Kamera: Vermessung der Linie für den aktuellen Zeitpunkt (Bildmitte) und zukünftige Abtastschritte.

Diese Solltrajektorie wird durch eine in der Nähe des TCP montierte Kamera bestimmt. Da die Kamera die Position von sensierten Objektpunkten  $\mathbf{x}_s$  bzgl. der eigenen Position vermisst, ergeben sich die Komponenten einer Sollposition des TCP  $\mathbf{x}_{d(k+i)}$  aus der Istlage der Kamera  $\mathbf{x}_{c(k)}$  zum Zeitpunkt  $k$  der Aufnahme und den Bildpunkten, die den Objektpunkten des entsprechenden Abtastschritts  $(k+i)$  zugeordnet werden (siehe Bild 2). Ohne Orientierungsänderungen ergibt sich also

$$\mathbf{x}_{d(k+i)} = \mathbf{x}_{s(k+i)} = \mathbf{x}_{c(k)} + {}^{c(k)}\mathbf{x}_{s(k+i)}, \quad (1)$$

wobei ein hochgestellter linker Index das System bezeichnet, in dem ein Punkt ausgedrückt wird. Dies bedeutet, dass  ${}^{c(k)}\mathbf{x}_{s(k+i)}$  die Differenz zwischen dem Punkt  $\mathbf{x}_{s(k+i)}$  und der Kamera in Kamerakoordinaten beschreibt.  ${}^{c(k)}\mathbf{x}_{s(k+i)}$  wird aus den fehlerfrei gemessenen Bildpunktkoordinaten und dem Abstand der Objektpunkte für Schritt  $(k+i)$  berechnet wird. Die durch die Bildinformation nicht bestimmbar Freiheitsgrade von  $\mathbf{x}_d$  sind durch eine Referenzbahn gegeben.

Während die Vorsteuerung durch vorgegebene Bahnen, also ohne Verwendung der Bildverarbeitung, so adaptiert werden kann, dass die roboterintern gemessenen Gelenkwinkel die Vorgaben erreichen [3,4], ist eine Adaption der oberen Hierarchieebene und damit des Gesamtsystems nicht so einfach möglich.

Nach Gangloff [5] ist die erzielbare Bahngenauigkeit bei der Verfolgung von ebenen Linien durch eine robotergeführte Kamera maßgeblich durch die Genauigkeit der Kamerakalibrierung beschränkt. Deshalb wurden bei uns bisher auch nach sorgfältiger Kalibrierung bei schnellen Bewegungen nur Bahnfehler im Bereich von ca. 1 mm erreicht [2]. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Adaption der Parameter von Sensorik und Regelung, um die

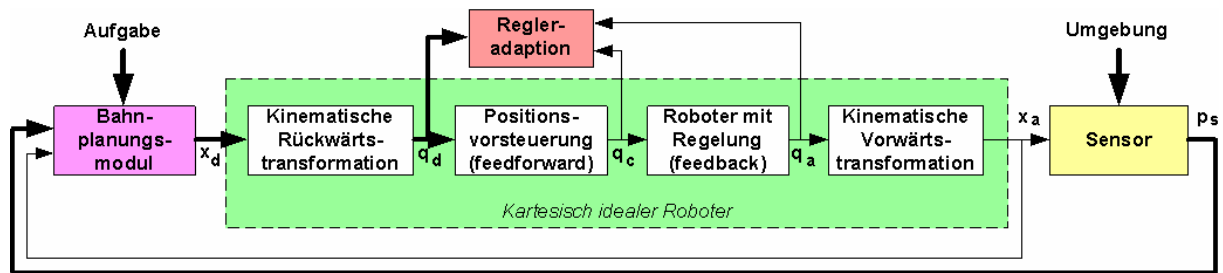


Bild 3. Architektur der Regelung

Kalibrierungsfehler weiter zu reduzieren bzw. um auch ohne so einen Kalibrierungsaufwand hohe Regelgüten zu erreichen. Für die Struktur nach Bild 3 gibt es dazu keine Vorarbeiten.

Um genau die Parameter zu bestimmen, die bei typischen Anwendungen zu Bahnabweichungen führen, werden die im normalen Betrieb verbleibenden Bahnfehler betrachtet.

Im Folgenden werden zunächst die unbekannt Parameter identifiziert (Abschnitt 2). Dadurch ist eine Adaption des Gesamtsystems möglich. Abschnitt 3 demonstriert die so erreichte Verbesserung durch Experimente am Roboter.

## 2. Identifikation der unbekannt Parameter

Bei der Identifikation der für die Bestimmung der Solltrajektorie maßgeblichen Parameter besteht zunächst das Problem, zwischen Messfehlern und Regelfehlern zu unterscheiden. Dabei wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass kein externes Vermessungssystem zur Kalibrierung vorhanden ist. Es stehen also lediglich die aus den Gelenkwinkeln berechneten Roboterpositionen und die Bilder zur Verfügung. Das legt einen modellgestützten Ansatz nahe.

Weiterhin wird angenommen, dass die Kamera zwar nach [6,7] kalibriert ist, dass aber trotzdem Messfehler existieren, deren Einfluss bei der Kalibrierung von untergeordneter Bedeutung war, die sich bei der eigentlichen Aufgabe aber deutlich auswirken. Diese stammen im vorliegenden Fall aus

- einem von der Beleuchtung (Shutterzeit) abhängigen Zeitversatz zwischen Kamerabil- dern und roboterintern zu den Abtastschritten bestimmten Gelenkwinkeln,
- Orientierungsfehlern der Kameralage  ${}^aT_c$  bzgl. des TCP (Armposition) und
- Maßstabsfehlern der Abbildung durch einen falsch geschätzten Abstand  ${}^c z_s$  zwischen Kamera und sensierter Linie.

Wie bei den Verfahren zur Selbstkalibrierung (siehe z. B. [8]) werden diese Parameter durch Vergleich von unterschiedlichen Aufnahmen beim schnellen Fahren entlang der Linie geschätzt. Die Vermessung eines Linienpunktes aufgrund von Kameralage und Position des

Linienpunktes im Bild muss bei verschiedenen Aufnahmen von unterschiedlichen Kamerapositionen aus immer dieselbe Linienposition liefern. Dabei wird die Kameralage für die jeweilige Aufnahme durch die kinematische Vorwärtstransformation aus den Gelenkwinkeln des Roboters bestimmt.

Vor der eigentlichen Anwendungsaufgabe, also dem Verfolgen der Linie (Abschnitt 2.2), wird zunächst eine Testbewegung senkrecht zur Linie kommandiert (Abschnitt 2.1). Dies ist nötig, da die Parameter bei bestimmten Aufgaben mit einander korreliert sind, so dass zur robusten Parameterschätzung weitere, unterschiedliche Bewegungen erforderlich sind.

## 2.1. Ausführen einer Testbewegung senkrecht zur Linie

Zuerst wird eine gesteuerte rein translatorische horizontale Bewegung senkrecht zur Linie durchgeführt. Dabei bleibt bei allen Aufnahmen der betrachtete Linienpunkt  $\mathbf{x}_s$  gleich. Dieser Versuch erlaubt insbesondere die Bestimmung der zeitlichen Verschiebung  $\Delta k$  (in Abtastschritten) zwischen Kameraaufnahmen und roboterinternen Positionsmessungen. Darüber hinaus können Maßstabsfehler  $\Delta m$  bestimmt werden.

Im allgemeinen Fall ergibt sich

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_{c(k)} + {}^{c(k)}\hat{\mathbf{x}}_s + \Delta k \cdot (\mathbf{x}_{c(k+1)} - \mathbf{x}_{c(k)}) + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{\mathbf{x}}_s \quad \forall k. \quad (2)$$

Dabei ist  ${}^{c(k)}\hat{\mathbf{x}}_s$  im Gegensatz zu  ${}^{c(k)}\mathbf{x}_s$  in Gleichung (1) die Linienposition, die sich aus dem Bild durch skalare Gleichungen wie

$${}^{c(k)}\hat{x}_{s(k+i)} = \xi(k, i) \cdot {}^{c(k)}z_{s(k+i)} \quad (3)$$

bei vorgegebenem Abstand  ${}^{c(k)}z_{s(k+i)}$  ergibt. Dabei ist  $i$  ein Index für den Linienpunkt, der in Abschnitt 2.2 näher definiert wird. Hier wird nur  $i = 0$  betrachtet. Dies ist der Linienpunkt der mittleren Bildzeile.

Sofern die Linien im Kamerasystem in y-Richtung verlaufen, betrachtet man anstelle der vektoriellen Gleichung (2) nur die x-Komponente des Kamerasystems des Zeitpunkts 0.

$${}^{c(0)}x_s = {}^{c(0)}x_{c(k)} + {}^{c(k)}\hat{x}_s + \Delta k \cdot ({}^{c(0)}x_{c(k+1)} - {}^{c(0)}x_{c(k)}) + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{x}_s \quad \forall k, \quad (4)$$

$$\text{bzw.} \quad {}^{c(0)}x_s = {}^{c(0)}x_{c(k)} + {}^{c(k)}z_s \cdot \xi(k, 0) + \Delta k \cdot {}^{c(k)}x_{c(k+1)} + \Delta m \cdot {}^{c(k)}z_s \cdot \xi(k, 0) \quad \forall k. \quad (5)$$

Bei der gewählten Bewegung ist die Kameraorientierung konstant.

Die Parameter  $\Delta k$  und  $\Delta m$  werden durch Parameterschätzung bestimmt. Dabei fällt die unbekannte Linienposition  ${}^{c(0)}x_s$  heraus, wenn jeweils zwei Gleichungen von einander subtrahiert werden. Wegen  ${}^{c(0)}x_{c(0)} = 0$  ergibt sich

$$0 = {}^{c(0)}x_{c(k)} + {}^{c(k)}z_s \cdot \xi(k, 0) - {}^{c(0)}z_s \cdot \xi(0, 0) + \Delta k \cdot ({}^{c(k)}x_{c(k+1)} - {}^{c(0)}x_{c(1)}) + \Delta m \cdot ({}^{c(k)}z_s \cdot \xi(k, 0) - {}^{c(0)}z_s \cdot \xi(0, 0)) \quad \forall k. \quad (6)$$

## 2.2. Ausführung der Anwendungsaufgabe

Das zweite Experiment ist die Anwendungsaufgabe, also das geregelte Entlangfahren an der online vermessenen Linie. Dabei ist ein zu einem bestimmten Abtastzeitpunkt  $l = k + i$  gehöriger Linienpunkt  $\mathbf{x}_{s(l)}$  in den Bildern von mehreren Zeitpunkten  $k$  sichtbar. Die Parameterschätzung erfolgt dann für jeden Linienpunkt  $l$  durch Vergleich der dafür berechneten Positionen  ${}^{c(k)}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)}$  aufgrund aller Aufnahmen der Zeitpunkte  $k$ , in denen der Punkt sichtbar ist.

Bei konstanter Kameraorientierung ergibt sich entsprechend Gleichung (4) für die x-Komponente des Kamerasystems

$${}^{c(l)}x_{s(l)} = {}^{c(l)}x_{c(k)} + {}^{c(k)}\hat{x}_{s(l)} + \Delta k \cdot {}^{c(k)}x_{c(k+1)} + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{x}_{s(l)} - \Delta \alpha \cdot {}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)} \quad \forall k, \quad (7)$$

wobei analog zu Gleichung (3)

$${}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)} = \eta(k, i) \cdot {}^{c(k)}z_{s(l)} \quad (8)$$

definiert ist.  $\xi(k, i)$  und  $\eta(k, i)$  bezeichnen die horizontale und die vertikale normalisierte Bildkoordinate eines Linienpunktes  $l$  des Bildes zum Zeitpunkt  $k$ . Die Zuordnung von Bildpunkten zu Linienpunkten eines bestimmten Abtastschrittes erfolgt durch die y-Komponente der Referenztrajektorie in Kamerakoordinaten.

Der Vergleich von Gleichungen (7) für verschiedene  $k$  erfolgt im konstanten Kamerasystem des Schrittes  $l$ , während die Koeffizienten der Störungsparameter sich auf die Kameraposition des Schrittes  $k$  der jeweiligen Messung beziehen.

Daraus ergibt sich insbesondere der Orientierungsfehler  $\Delta \alpha$  um die optische Achse des Kamerasystems. Seine Bestimmung ist bei dem betrachteten Experiment besonders wichtig, da zur Kompensation der stark verzögernden Roboterdynamik mit den am Bildrand sichtbaren Bildpunkten vorgesteuert wird. Dagegen haben bei guter Regelung Maßstabsfehler kaum einen Einfluss, da die Linienposition im Bild beim betrachteten Experiment nahezu konstant ist.

Sofern die Kameraorientierung nicht konstant ist, ist der Ansatz nach Gleichung (2) nicht zulässig. Stattdessen gilt

$${}^{c(l)}\mathbf{x}_{s(l)} = {}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(\hat{k})} \cdot \mathbf{T}_{\alpha, m} \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} = {}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)} \cdot {}^{c(k)}\mathbf{T}_{c(\hat{k})} \cdot \mathbf{T}_{\alpha, m} \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} \quad \forall k. \quad (9)$$

Dabei wird der nur ungenau bekannte Zeitpunkt der Aufnahme durch  $\hat{k}$  bezeichnet. Die Interpolation lautet dabei

$${}^{c(k)}\mathbf{T}_{c(\hat{k})} = I + \Delta k \cdot ({}^{c(k)}\mathbf{T}_{c(k+1)} - I). \quad (10)$$

Die Matrix  $\mathbf{T}_{\alpha, m}$  der anderen Parameter wird mit  $\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \alpha & 0 \\ \Delta \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  angesetzt durch

$$\mathbf{T}_{\alpha,m} = \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m). \quad (11)$$

Das ergibt

$$\begin{aligned} {}^{c(l)}\mathbf{x}_{s(l)} &= {}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)} \cdot (I + \Delta k \cdot ({}^{c(k)}\mathbf{T}_{c(k+1)} - I)) \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} \\ &= {}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)} \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} + {}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)} \cdot \Delta k \cdot ({}^{c(k)}\mathbf{T}_{c(k+1)} - I) \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} \\ &= {}^{c(l)}\mathbf{x}_{c(k)} + {}^{c(l)}\mathbf{R}_{c(k)} \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} \\ &\quad + {}^{c(l)}\mathbf{R}_{c(k)} \cdot \Delta k \cdot ({}^{c(k)}\mathbf{x}_{c(k+1)} + ({}^{c(k)}\mathbf{R}_{c(k+1)} - I) \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot (1 + \Delta m) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)}) \quad \forall k. \end{aligned} \quad (12)$$

Bei Vernachlässigung von Produkten der kleinen Größen  $\Delta k, \Delta m$  und  $\Delta \alpha$  ergibt sich

$$\begin{aligned} {}^{c(l)}\mathbf{x}_{s(l)} &= {}^{c(l)}\mathbf{x}_{c(k)} + {}^{c(l)}\mathbf{R}_{c(k)} \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} + {}^{c(l)}\mathbf{R}_{c(k)} \cdot \Delta m \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)} \\ &\quad + {}^{c(l)}\mathbf{R}_{c(k)} \cdot \Delta k \cdot ({}^{c(k)}\mathbf{x}_{c(k+1)} + ({}^{c(k)}\mathbf{R}_{c(k+1)} - I) \cdot {}^{c(\hat{k})}\hat{\mathbf{x}}_{s(l)}) \quad \forall k. \end{aligned} \quad (13)$$

Bei Vernachlässigung der Orientierungsänderungen innerhalb eines Abtastschrittes  ${}^{c(k)}\mathbf{R}_{c(k+1)}$  ergibt sich für die x-Komponente

$$\begin{aligned} {}^{c(l)}x_{s(l)} &= {}^{c(l)}x_{c(k)} + {}^{c(l)}t_{c(k),00} \cdot ({}^{c(k)}\hat{x}_{s(l)} - \Delta \alpha \cdot {}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)} + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{x}_{s(l)} + \Delta k \cdot {}^{c(k)}x_{c(k+1)}) \\ &\quad + {}^{c(l)}t_{c(k),01} \cdot ({}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)} + \Delta \alpha \cdot {}^{c(k)}\hat{x}_{s(l)} + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)} + \Delta k \cdot {}^{c(k)}y_{c(k+1)}) \\ &\quad + {}^{c(l)}t_{c(k),02} \cdot ({}^{c(k)}\hat{z}_{s(l)} + \Delta m \cdot {}^{c(k)}\hat{z}_{s(l)} + \Delta k \cdot {}^{c(k)}z_{c(k+1)}) \quad \forall k, \end{aligned} \quad (14)$$

was ohne Orientierungsänderung Gleichung (7) entspricht. Dabei ist  ${}^{c(l)}t_{c(k),i_1 i_2}$  das Element  $i_1, i_2$  der Transformationsmatrix  ${}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)}$ .

Sofern  $\Delta k$  und  $\Delta m$  bereits nach Abschnitt 2.1 bestimmt wurden, beschränkt sich die Parameterschätzung auf  $\Delta \alpha$ . Durch Einsetzen von Gleichung (3) und (8) und Subtraktion der Gleichung des Aufnahmezeitpunkts  $k = l$ , also der Gleichung mit  $i = 0$ , ergibt sich die Gleichung zur Bestimmung von  $\Delta \alpha$ , die der Übersichtlichkeit halber hier nicht mehr aufgeführt wird.

Die geschätzten Parameter können direkt im Kameramodul bei der Interpolation des Aufnahmezeitpunkts und bei der Abbildung verwendet werden. Dann werden im hier beschriebenen Parameterschätzmodul die verbliebenen Kalibrierungsfehler  $\Delta m$  und  $\Delta k$  zu null gesetzt. In dem Fall ergibt sich  $\Delta \alpha$  ohne die oben genannten einschränkenden Annahmen aus

$$\begin{aligned} &{}^{c(l)}x_{c(k)} + {}^{c(l)}t_{c(k),00} \cdot (\xi(k,i) - \Delta \alpha \cdot \eta(k,i)) \cdot {}^{c(k)}z_{s(l)} \\ &+ {}^{c(l)}t_{c(k),01} \cdot (\eta(k,i) + \Delta \alpha \cdot \xi(k,i)) \cdot {}^{c(k)}z_{s(l)} + {}^{c(l)}t_{c(k),02} \cdot {}^{c(k)}z_{s(l)} \\ &= (\xi(l,0) - \Delta \alpha \cdot \eta(l,0)) \cdot {}^{c(l)}z_{s(l)} \quad \forall k. \end{aligned} \quad (15)$$

Da  ${}^{c(k)}y_{s(l)}$  und  ${}^{c(k)}z_{s(l)} = {}^{c(k)}\hat{z}_{s(l)}$  durch die Referenztrajektorie für jeden Abtastzeitpunkt  $l$  gegeben sind, erlaubt Gleichung (8) die näherungsweise Bestimmung von  $\eta(k,i)$ , das zur Messung von  $\xi(k,i)$  aus dem Bild vorgegeben werden muss. Somit führt die Messung der

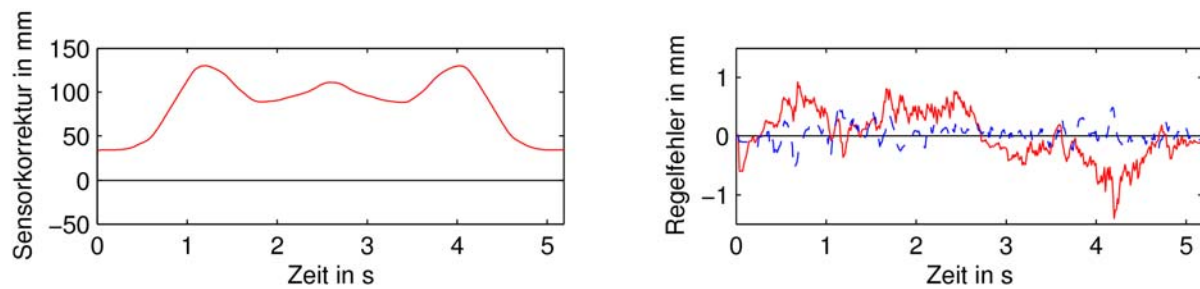


Bild 4: Aus der mittleren Bildzeile berechneter Regelfehler beim Verfolgen einer Linie: rot durchgezogen = ohne Kompensation, blau gestrichelt = mit Kompensation

Elemente von  ${}^{c(l)}\mathbf{T}_{c(k)}$  für jede Gleichung zu einem Wert für  $\Delta\alpha$ , der nur noch gefiltert werden muss. Durch iteratives Einsetzen des Ergebnisses im Kameramodul wird  ${}^{c(k)}\hat{y}_{s(l)}$  zu  ${}^{c(k)}y_{s(l)}$ , wodurch die ohnehin kleinen Approximationsfehler bei der Bestimmung von  $\eta(k,i)$  schließlich verschwinden.

### 3. Experimentelle Ergebnisse

Durch Kompensation der so geschätzten Messfehler wird das System verbessert, so dass sich der mittlere Regelfehler etwa um den Faktor 3 reduziert (Bild 4). Tabelle 1 zeigt, dass die hohe Genauigkeit erst bei Kompensation aller beschriebenen Einflüsse möglich ist. Dabei kann die Bedeutung der einzelnen Größen je nach Lage der Linie im Bild und je nach Änderungsgeschwindigkeit der Sensorkorrektur auch von der Beispieltrajektorie nach Bild 1 abweichen. Lediglich die Schätzung des Maßstabs kann bei genügend genauen a priori Informationen ggf. allgemein entfallen.

Die im Experiment ermittelten Parameterfehler betragen etwa 0,010 s beim Zeitfehler, 0,015 rad beim Orientierungsfehler und den Faktor 0,003 beim Maßstab.

Tabelle 1. Verbleibende mittlere Bahnabweichungen beim Verfolgen einer Linie. (Die maximal auftretenden Pixelfehler sind in Klammern angegeben.)

	Pixelfehler	Bahnfehler in x
Ohne Adaption	1,7 Pixel (4,8 Pixel)	0,68 mm
Mit Adaption von Zeitversatz und Maßstab	1,2 Pixel (2,2 Pixel)	0,50 mm
Mit Adaption der Orientierung	1,3 Pixel (4,5 Pixel)	0,53 mm
Mit Adaption von Zeitversatz, Maßstab und Ori.	0,4 Pixel (1,5 Pixel)	0,20 mm
Mit Adaption von Zeitversatz und Orientierung	0,5 Pixel (2,2 Pixel)	0,23 mm

#### 4. Zusammenfassung

Für das Problem der Verfolgung von im Bild sichtbaren Linien wurde die Adaption der Parameter von Regelung und Sensorik beschrieben. Im Gegensatz zu Objektverfolgungsaufgaben wie bei [9] kann die Genauigkeit beim Verfolgen von unbewegten Kanten sehr hoch sein, da keine Unsicherheit bezüglich zukünftiger Beschleunigungen besteht. Eine hohe Genauigkeit lässt sich aber nur erreichen, wenn Roboterregelung und Sensorik genau aufeinander abgestimmt sind. Dies ist insbesondere durch die gezeigte "erwartungstreue" Adaption während der Anwendungsaufgabe möglich.

Bei den in Abschnitt 3 dokumentierten Messwerten handelt es sich um das Ergebnis, das aus dem Zusammenspiel von Kamera, Bildverarbeitung, Regelung und Roboterdynamik bei einer schnellen Bewegung (0,7 m/s Bahngeschwindigkeit) resultiert. Insofern kann der erreichte mittlere Bildfehler von einem halben Pixel wohl nur mit hohem Aufwand unterschritten werden.

#### Literatur

- [1] F. Lange and G. Hirzinger. A universal sensor control architecture considering robot dynamics. In *Proc. Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 277–282, Baden-Baden, Germany, August 2001.
- [2] F. Lange und G. Hirzinger. Kameragestützte räumliche Regelung von schnellen Roboterarmen. In *VDI/VDE Konferenz Applied Machine Vision, VDI-Berichte 1800*, Seiten 77–84, Stuttgart, Oktober 2003, Video-Clips unter <http://www.robotic.dlr.de/Friedrich.Lange/>.
- [3] F. Lange and G. Hirzinger. Learning of a controller for non-recurring fast movements. *Advanced Robotics*, 10 (2): 229–244, April 1996.
- [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] 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.
- [6] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy analysis. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (10): 965–980, Oct. 1992.
- [7] <http://www.robotic.dlr.de/vision/projects/Calibration/>, 2004.
- [8] J.-M. Frahm and R. Koch. Robust camera calibration from images and rotation data. In *Pattern Recognition Symposium, DAGM'03*, Magdeburg, Sept. 2003. Springer-Verlag.
- [9] Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke. A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 12 (5): 651–670, Oct. 1996.