

# On-Line Pose Messsystem für Roboter

Jürgen Hefe<sup>1</sup>

*Dieser Bericht beschreibt den Aufbau eines photogrammetrischen Messsystems zur Bestimmung der räumlichen Position und Orientierung des Tool Center Points eines Roboters, wie es am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelt wird. Prinzipiell stehen zwei Verfahren zur Verfügung, der räumliche Rückwärtseinschnitt und der räumliche Vorwärtseinschnitt. Dieser Bericht geht nun auf den räumlichen Rückwärtseinschnitt ein. Er beschreibt die verwendeten Algorithmen und zeigt die erreichbaren Genauigkeiten auf. Getestet wird das Verfahren an einem 6-Achs-Industrieroboter. Zum Einsatz kommt daneben noch eine hochauflösende Digitalkamera mit 12 Bilder/Sekunde. Verglichen werden die Ergebnisse mit einem hochgenauen kommerziellen Messsystem.*

## 1 Einführung

Massenproduktion von Gütern ist heutzutage ohne den Einsatz von Industrierobotern nicht mehr denkbar. Rohkarosserien beispielsweise werden nahezu vollständig von Robotern gefertigt. Bisher werden 95 Prozent der Roboter im so genannten Teach-in Verfahren programmiert. Das heißt nach der Installation des Roboters muss ein Werker die vorher definierten Raumpunkte über das Handsteuergerät einzeln anfahren und programmieren. Muss nun ein defekter Roboter ersetzt werden, so hat dies lange Stillstandzeiten der gesamten Anlage zur Folge. Bei Einsatz von kalibrierten Industrierobotern entfällt die aufwendige Handprogrammierung, da die Programme im Büro erstellt und getestet werden können. Auf Grund der konstruktiven Bauweise besitzen Industrieroboter eine relative Wiederholgenauigkeit (Anfahren des selben Punktes unter konstanten Bedingungen) von 0.03 – 0.15 mm. Kalibrierte Roboter erreichen in der Absolutgenauigkeit (Anfahren des Punktes auf unterschiedlichen Wegen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) Genauigkeiten in der gleichen Größenordnung (0.1 – 0.5 mm), nicht kalibrierte Roboter hingegen nur Genauigkeiten im Bereich von 2 bis 10 mm. Herstellerfirmen von Robotern bieten ihren Kunden als zusätzliche Option die Roboterkalibrierung an. Hier werden über verschiedene Messverfahren, auch unter Einsatz von photogrammetrischen Methoden, die Abweichungen von den Modellparametern (Länge der Achsen, Winkelfehler) bestimmt (WIEST, 2001). Durch das einmalige Kalibrieren der Roboter werden aber zeitliche Einflüsse wie Temperaturänderung, Abnutzung und dynamische Kräfte nicht berücksichtigt. Um den Einfluss dieser Fehler Rechnung zu tragen, müssen die Modellparameter des Roboters in kurzen Zeitabständen aktualisiert werden. Der erste Schritt dahin ist die on-line Bestimmung der Position und Orientierung (Pose) des Tool Center Points (TCP) des Roboters.

Bei bekannten Kameraparametern stellt die Photogrammetrie prinzipiell zwei Verfahren zur Bestimmung der Pose zur Verfügung: den räumliche Rückwärtsschnitt und den räumliche Vorwärtseinschnitt. Dieser Bericht zeigt unsere ersten Erfahrungen zur Bestimmung der Roboter Pose mit Hilfe des räumlichen Rückwärtsschnittes.

## 2 Pose Bestimmung der Kamera

Für den räumlichen Rückwärtsschnitt müssen sowohl Modellparameter der Kamera als auch 3D-Koordinaten von Messmarken vorliegen. Das verwendete Kameramodell und die

---

<sup>1</sup> Jürgen Hefe, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24, 70174 Stuttgart, e-Mail: juergen.hefe@ifp.uni-stuttgart.de

Erkennung der Messmarken werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Ebenso wird noch auf den verwendeten Algorithmus des räumlichen Rückwärtsschnittes eingegangen.

## 2.1 Kameramodell

Als Basis für das Kameramodell dienen Teile des Parametersatzes von BROWN (1971). Neben den Standardparametern Bildhauptpunkt und Kamerakonstante werden weitere Parameter zur Bildkorrektur bestimmt. Wir halten uns dabei an die Notation wie sie FRASER (1997) einführte. Die Korrektur setzt sich aus der radial-symmetrischen Verzeichnung  $(\Delta x_r, \Delta y_r)$ , der radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung  $(\Delta x_d, \Delta y_d)$ , sowie Parameter für die Affinität und Scherung  $(\Delta x_f, \Delta y_f)$ , zusammen.

Die Bestimmung des Parametersatzes und der Raumkoordinaten der Messmarken erfolgt über die freie Netzausgleichung mit dem Bündelprogramm Australis der Universität Melbourne (Australien).

## 2.2 Markenerkennung

Die Pose Bestimmung der Kamera erfolgt über ein ebenes Testfeld mit kreisförmigen retro-reflektierenden Messmarken (Abbildung 1). Für die automatische Identifizierung sind im Testfeld kodierte Marken vorhanden. Diese besitzen neben der kreisförmigen Messmarke (große Marken in Abbildung 1) zusätzlich einen radial um die Marke angebrachten Kode. Der Algorithmus berechnet den gewichteten Schwerpunkt jeder kreisförmigen Messmarke und ermittelt zusätzlich den Kode der kodierten Marken.

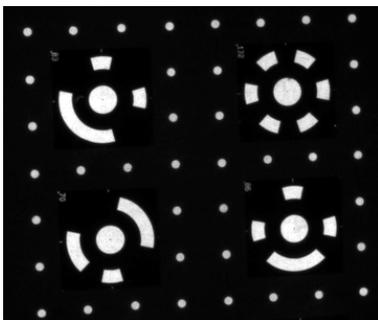


Abb. 1: Ausschnitt Testfeld

Im ersten Schritt der Markenerkennung wird das Grauwertbild der Kamera in ein Binärbild gewandelt. Die Schwellwertberechnung für die Binarisierung erfolgt nach der Methode von OTSU (1979). Nach der Binarisierung wird für jeden zusammenhängenden Bereich (Blob-Detection) die Fläche und die Kreisförmigkeit berechnet. Die Kreisförmigkeit  $C$  definiert sich durch:

$$C = \frac{F}{\pi m^2}$$

Wobei  $F$  die Fläche und  $m$  der größte Abstand vom Schwerpunkt zum Rand des Bereiches ist. Besitzt eine Fläche die Kreisförmigkeit  $C=1$ , so liegt ein Kreis vor. Als Messmarken werden somit jene Bereiche erkannt, deren Fläche größer als 10 Pixel und die Kreisförmigkeit größer als 0.5 ist. Die Kode suche erfolgt mit Hilfe einer Ellipsenschätzung. Um jeden kreisförmigen Bereich wird eine Ellipse geschätzt, die dann um einen konstanten Faktor (hier 2.7) vergrößert wird. Entlang der vergrößerten Ellipse wird dann der Kode gelesen. Nicht kodierten Messmarken wird der Kode 0 zugeordnet.

## 2.3 Räumlicher Rückwärtsschnitt

FISCHLER und BOLLES (1981) veröffentlichten eine direkte Lösung des räumlichen Rückwärtsschnittes ausgehend von vier, in einer Ebene liegenden, Punkten. Ihre Lösung wird zur Bestimmung der Kameraposition verwendet. Die Berechnung der Kameraorientierung erfolgt nach dem Verfahren wie sie KRAUS (1996) vorschlägt. Verwendet werden die 4 am weitesten auseinander liegenden kodierten Messmarken im Bild um eine möglichst optimale

Verteilung zu erhalten. Die Identifikation der nicht kodierten Marken erfolgt durch Transformation der Messmarken in den Bildraum. Um Singularitäten in der Drehmatrix zu vermeiden, wird die Drehmatrix mit Hilfe von Quaternionen parametrisiert:

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ \vec{q} \end{bmatrix} \text{ mit } q = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\vec{k}, \quad q_0 = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Dabei ist  $\vec{k}$  die Drehachse und  $\phi$  der Drehwinkel. Die Rotationsmatrix besitzt damit folgende Gestalt:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

Die Ausgleichung erfolgt dann nach dem Schema der Vermittelnden Ausgleichung mit folgender Bedingung zwischen den Unbekannten:

$$1 = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$$

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Verwendete Hardware und Software

Für die experimentelle Untersuchung benutzen wir den am Institut für Photogrammetrie vorhandenen 6-Achs-Industrieroboter KR15/2 der Firma Kuka aus Augsburg (Abbildung 3). Die maximale Tragfähigkeit des Roboters beträgt 15 kg bei einer Reichweite von ca. 1.5 m. Der Roboter hat laut Hersteller eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0.1$  mm. Über die Absolutpositioniergenauigkeit liegen keine Angaben vor.

Für die Bildaufnahme kommt die digitale Kamera Basler A113 mit einem 12 mm Objektiv zum Einsatz. Sie zeichnet sich durch eine hohe Auflösung von  $1300 \times 1030$  Pixel bei einer Bildrate von 12 Bilder/Sekunde aus. Die Datenübertragung in den PC erfolgt über die digitale Schnittstelle RS644 und der Framegrabber-Karte Matrox Meteor II DIG.

Um eine möglichst einfache Binärbilderzeugung zu erreichen, wird zur Beleuchtung einen LED-Ring mit IR-LEDs (Wellenlänge 880 nm) verwendet. Vor dem Objektiv befindet sich ein Tageslichtfilter, der das Licht im Frequenzbereich von 400 - 800 nm herausfiltert (Abbildung 3).

Das Grundgerüst für die Bildverarbeitung bildet die Software HALCON 6.0 der Firma MVTec. Über die vorhandene C-Schnittstelle wurde das System um die benötigten Funktionen, wie beispielsweise für den Bildeinzug über die Framegrabber-Karte Meteor II DIG, die Binärbilderzeugung nach Otsu, die Markenerkennung und natürlich für den räumlicher Rückwärtsschnitt, erweitert.



Abb.2: KR15/2

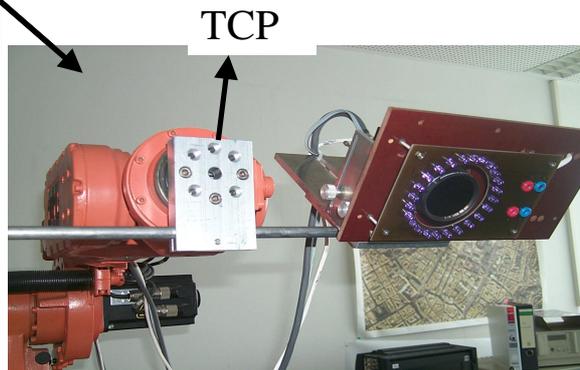


Abb.3: Basler A113 mit Beleuchtungsmodul

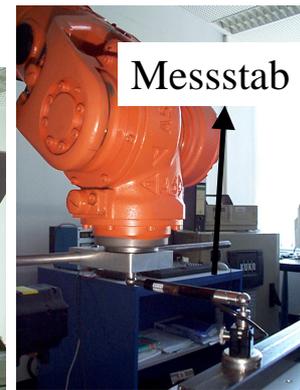


Abb. 4: Ball-Bar-System

### 3.2 Rechenzeiten

Der Zeitaufwand für die Bestimmung der Kameraposition und Orientierung auf einem handelsüblichen Pentium III Rechner (500 MHz, 128 MB RAM) beträgt durchschnittlich etwa 440 ms. Die Aufschlüsselung der Zeiten ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass für die Markenerkennung die meiste Zeit benötigt wird. Hier ist vor allem das Lesen der einzelnen Grauwerte aus dem Bild entlang des Codes sehr zeitintensiv.

In der Zeile Bildaufbereitung ist der Zeitaufwand für das Ermitteln des Schwellwertes, für die Binarisierung, die Binarisierung an sich und das Ermitteln der möglichen Kandidaten für die Marken, zusammengefasst.

Aktion	Zeit [ms]
Bildaufbereitung	90
Markenerkennung	330
Räumlicher Rückwärtsschnitt	20

Tabelle 1: Zeitaufwand

Bei etwa 30 kodierten und 200 unkodierten Marken pro Bild kommen werden 500 Marken /Sekunde erreicht, was im Schnitt 2-4 Bilder/Sekunde bedeutet.

### 3.3 Bestimmung der Bahngenauigkeit durch Kreisformtest

Im Maschinenbau wird im allgemeinen der Kreisformtest zur Bestimmung der Genauigkeiten einer programmierbaren Maschine benutzt. Dabei wird die Bewegung des TCP auf einer Kreisbahn registriert. Die Abweichung vom Idealkreis wird dann als Maß für die Genauigkeiten herangezogen. Um einen einheitlichen Test zu gewährleisten hat die „International Organisation for Standardization“ die Norm ISO230-4 (1996) herausgebracht. Diese beschreibt die exakte Vorgehensweise und die zu ermittelnden Parameter des Kreisformtests die da wären:

1. Durchmesser (Radius) des nominellen Kreises
2. Pfadverlauf

### 3. Maximale Abweichung vom Kreis

Mehrere kommerzielle Anbieter bieten in ihren Sortiment Geräte zur Durchführung des Kreisformtests an. Wir benutzen als Referenzsystem das „Ball-Bar-System“ der Firma Renishaw. Dieses besteht aus einem längenempfindlichen Messstab mit einer Länge von 150 mm der über Magnete an zwei Kugeln befestigt wird. Eine Kugel wird am TCP des Roboters montiert, die andere Kugel kommt in den Kreismittelpunkt wie es in Abbildung 5 zu sehen ist. Bewegt sich der Roboter auf einer Kreisbahn, so registriert der Messstab die radiale Abweichung vom Idealkreis. Die wichtigsten Parameter des Ball-Bar-System sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Auflösung	0.1 $\mu\text{m}$
Messgenauigkeit	$\pm 1 \mu\text{m}$
Messbereich	$\pm 1 \text{ mm}$
Messfrequenz	300 Hz

Tabelle 2: Ball-Bar-Messsystem

Der Kreisradius für den Test ist durch das Ball-Bar-System (Messstablänge 150 mm) fest vorgegeben. Die Bahngeschwindigkeit wurde auf 10 mm/s festgesetzt, so dass mit über 100 Pose Bestimmungen pro Vollkreis durch das photogrammetrische System zu rechnen ist. Tatsächlich waren es 125, während das Ball-Bar-System durch die hohe Messfrequenz 882 Messungen durchführte.

In Tabelle 3 sind die durch die Ausgleichsrechnung ermittelten Standardabweichungen unseres photogrammetrischen Systems aufgeführt .

	Simulation		Experimentelle Untersuchung
Bildmessgenauigkeit	1/5 Pixel	1/10 Pixel	1/10 – 1/20 Pixel
Rückwärtsschnitt in X	0.06 mm	0.03 mm	0.05 – 0.14 mm
Rückwärtsschnitt in Y	0.06 mm	0.03 mm	0.05 – 0.14 mm
Rückwärtsschnitt in Z	0.02 mm	0.009 mm	0.05 – 0.07 mm

Tabelle 3: Standardabweichungen des räumlichen Rückwärtsschnitts

Eine gleichzeitige Erfassung der Kreisbahn mit Kamera und Ball-Bar-System ist nicht möglich, da der Messstab des Ball-Bar-Systems einen Teil des Bildes verdecken würde. Untersuchungen zeigen aber, dass in kurzem zeitlichem Abstand durchgeführten Tests sich die Bahn nur sehr geringfügig ändert (Abbildung 5, Abweichungen gegenüber dem Idealkreis um Faktor 200 verstärkt abgebildet).

Abbildung 6 zeigt den Idealkreis und die Kreisbahnen wie sie mit Ball-Bar-System der Firma Renishaw und mit dem photogrammetrischen System registriert wurden (Abweichung vom Idealkreis um Faktor 200 erhöht). Das photogrammetrische System zeigt bei zweimaligen durchfahren des Kreises nur geringfügige Abweichungen die innerhalb der Mess- Ungenauigkeit liegen. Verglichen mit dem Referenzsystem zeigen sich aber deutliche Abweichungen (Maximal 0.4 mm). Die Ursache dürfte in den verschiedenen Aufnahmepunkten liegen. Während das Ball-Bar-System ungefähr im TCP befestigt wurde (Abstand circa 10 mm), musste auf Grund von mechanischen Gegebenheiten die Kamera (Projektionszentrum) circa 100 mm vom TCP entfernt befestigt werden. Kleine Änderung in der Orientierung des TCP haben über den größeren Hebel eine wesentlich stärkere Auswirkung auf die Kameraposition wie auf das Ball-Bar-System. Im nächste Schritt muss nun durch die Bestimmung der Transformation zwischen TCP und Kamera (Hand-Eye-Transformation) dieser Fehler eliminiert werden.

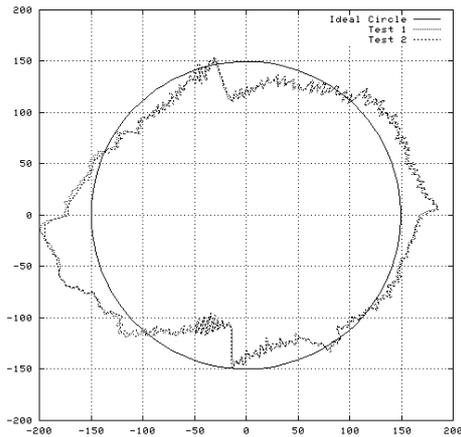


Abb. 5: Ball-Bar-System

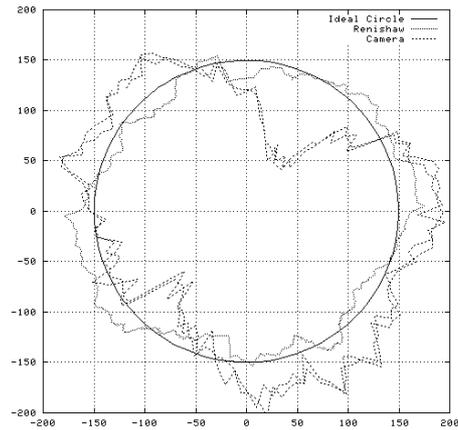


Abb. 6: Kamera-System

## 4 Zusammenfassung

Mit unserem jetzigen System erreichen wir nicht die Genauigkeiten wie sie von kommerziellen Systemen erreicht werden. Durch Verwendung von Objektiven mit kleinerer Brennweite ist eine Genauigkeitssteigerung erreichbar, so dass das photogrammetrische System zur Kontrolle eingesetzt werden kann. Ein großer Vorteil unseres Systems gegenüber anderen Systemen liegt in der flexiblen Handhabung und in der zusätzlichen Erfassung der Orientierung des TCP.

## 5 Literatur

- BROWN D.C., 1971: Close-Range Camera Calibration – Photogrammetric Engineering 37(8) 855-866
- FISCHLER, M. A. und BOLLES, R. C., 1981: Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – Communications of the ACM, 24(6):381-393, Juni 1981.
- FRASER, C., 1997: Digital camera self-calibration.- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52 149-159
- ISO, 230-4,1996: Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie Band 2, Dümmler Verlag
- OTSU, N., 1979: A Threshold Selection Method from Grey-Level Histograms. –IEEE Transactions on Systems , Man, And Cybernetics, SMC-9 (62-66, Januar 1979
- TSAI R.Y. and LENZ R.K., 1989: A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration. –IEEE Transaction on Robotics and Automation, 5(3) 345-358, Juni 1989
- WIEST, U., 2001: Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern, Shaker Verlag