

SCIPOS – Schnelle Kalibrierung von Roboterarbeitszellen

Dipl.-Ing. Michael Schäfer,
Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha
Zentrum für Innovative Produktion (ZIP), Saarbrücken

Die positiven Effekte der Automatisierung mit Hilfe von Industrierobotern werden dann kontakariert, wenn der zeitliche Aufwand für Einricht- und Umrüstarbeiten den Produktivitätsgewinn zu nichte macht. Dies ist vor allem bei kleinen Losgrößen und den damit verbundenen häufigen Umrüstungen relevant. Aber auch, wenn ein Prozeß beispielsweise von einer Arbeitszelle in eine andere verlagert werden soll, würde ein System, das die übliche Teach-in-Programmierung des Roboters ersetzt, einen erheblichen Zeitvorteil beim Einrichten bringen. Ein solches System – SCIPOS – wird im folgenden beschrieben.

1 Einleitung

Aufgrund der exemplarspezifischen Posefehler von Industrierobotern (IR) erfordert die effiziente Anwendung fortgeschrittener Programmierverfahren (Off-line-Programmierung) aufwendige Kalibriermethoden sowohl für den verwendeten Roboter als auch für die ihn umgebende Arbeitszelle. Weiterhin ist die Portierung von Roboterprogrammen ohne Kalibriermaßnahmen von einer geteachten Anlage auf eine andere, gleichartige Anlage bei hohen Anforderungen an die Posegenauigkeit ohne Nachteachen der zweiten Anlage heute noch nicht möglich.

Mit SCIPOS (Sensor based Correction of Robot's Poses) wurde am Zentrum für Innovative Produktion (ZIP) in Saarbrücken ein Verfahren entwickelt, das

- a) die Off-line-Programmierung unter Vermeidung des Nachteachens und
- b) eine leichte und schnelle Portierung von Roboterprogrammen

in einem Ansatz umfassend und kostengünstig durchführt. Dabei werden Ungenauigkeiten sowohl des Industrieroboters als auch der Arbeitszelle in einem Zug erfaßt und korrigiert. Im Gegensatz zur manuellen Teach-in-Programmierung erhält man eine vollständig transparente Korrektur, womit aus dem Prozeß herrührende Qualitätsschwankungen nachvollziehbar werden (FMEA).

2 Systemkonzept

Im Unterschied zu Verfahren, die auf der Erhöhung der absoluten Posegenauigkeit von Industrierobotern in deren gesamtem Arbeitsbereich beruhen, korrigiert SCIPOS die Positionsfehler von am Roboter montierten Werkzeugen im Werkstückkoordinatensystem. SCIPOS ahmt gewissermaßen das konventionelle Teachen nach und automatisiert es. Dabei werden lediglich relevante Positionen einbezogen; Wartepositionen sowie Transfer- und Leerfahrten, etc. bleiben von einer Korrektur unberührt. Grundlage ist auch hier, wie bei fast allen Korrekturverfahren, ein Vergleich zwischen Soll- und Istgrößen.

Zur Akquisition der Solldaten bestehen bei dem hier vorgestellten Verfahren zwei Möglichkeiten: Die Sollpositionen werden durch graphische Simulationssysteme aus den CAD-Datenbasen von Werkstück und Arbeitszelle gewonnen. Durch Koordinatentransformationen können daraus die resultierenden absoluten Roboterpositionen berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht im *einmaligen Vermessen* einer bereits geteachten Szene. Das Sensorsystem dient dann auch zum Erlernen der Posen. Die Lage signifikanter Werkstückmerkmale wird im Sensorkoordinatensystem erfaßt.

Aus Soll- und Istposition kann dann der Korrekturdatenvektor \vec{d} über kinematische Transformationen, wie in Bild 1 dargestellt, ermittelt werden. Die Soll- und Istpositionen und -orientierungen werden jeweils als homogene Transformationsmatrizen $\underline{T}_{\text{Soll}}$ und $\underline{T}_{\text{Ist}}$ vom Werkzeugkoordinatensystem in bezug auf das Werkstückkoordinatensystem dargestellt.

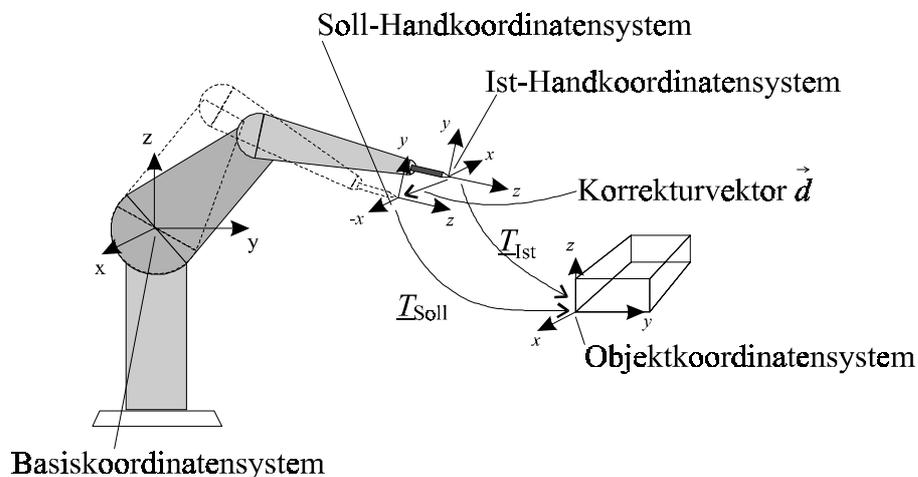


Bild 1: Transformationen zur Berechnung der Korrekturdaten

Homogene Transformationsmatrizen haben die Form

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{p} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

mit dem Rotationsanteil \underline{R}

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

und dem Translationsanteil \vec{p}

$$\vec{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Der mathematische Zusammenhang zwischen $\underline{T}_{\text{Soll}}$, $\underline{T}_{\text{Ist}}$ und \vec{d} lautet

$$\underline{T}_{\text{Soll}} = \underline{T}_{\text{Ist}} + \begin{bmatrix} \underline{E} & \vec{d} \\ \underline{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

mit der Einheitsmatrix \underline{E} .

Damit ist \vec{d} im Werkzeugkoordinatensystem bekannt. Da Industrieroboter im allgemeinen jedoch in ihrem Basiskoordinatensystem programmiert werden, muß \vec{d} in dieses Koordinatensystem transformiert werden:

$$\vec{d}_{\text{Rob}} = {}^6_0T \cdot \vec{d} \quad (5)$$

6_0T beschreibt die Transformation vom Werkzeugkoordinatensystem in das Roboterbasiskoordinatensystem. Die Korrekturvorschrift für die Position lautet damit

$$\vec{p}_{\text{Soll}} = \vec{p}_{\text{Ist}} + \vec{d}_{\text{Rob}} \quad (6)$$

\vec{p}_{Soll} und \vec{p}_{Ist} sind die jeweiligen Translationsanteile von $\underline{T}_{\text{Soll}}$ und $\underline{T}_{\text{Ist}}$. Die \vec{p}_{Soll} entsprechende Roboterposition ist nun um \vec{d} zu korrigieren, womit das angestrebte Ziel, die Korrektur einzelner Stellungen, erreicht ist.

Die Aufgabe eines Sensorsystems besteht nun darin, die Isttransformation $\underline{T}_{\text{Ist}}$ zu ermitteln.

3 Sensorsystem

Das Sensorsystem zur Erfassung der Szene besteht aus zwei miniaturisierten CCD-Kameras, die während der Kalibrierung an der mechanischen Schnittstelle (Flansch)

des Industrieroboters angebracht sind. Aus den damit erzeugten zwei Bildern einer Szene lassen sich 3-D-Informationen gewinnen.

3.1 Kalibrierung des Sensorsystems

Bei Verwendung eines solchen Sensorsystems ist der Kalibrierung der inneren und äußeren Kameraparameter größte Aufmerksamkeit zu schenken, wenn man das gesteckte Ziel - Korrektur im Rahmen der Wiederholgenauigkeit des Industrieroboters - erreichen will. Mit den inneren Parametern werden die Abbildungseigenschaften der Kamera beschrieben. Hierzu gehören z.B. die Brennweite, die Lage des Brennpunktes auf der Bildebene und darüber hinaus Parameter, die eine Verzeichnung der Linse(n) als Abweichung vom optischen Ideal einer Lochkamera beschreiben. Erst mit genauer Kenntnis dieser Parameter ist es möglich, die Fehler bei der Bildmessung (Bestimmung eines Punktes im Bild) zu eliminieren.

Die äußeren Parameter beschreiben die Position des Abbildungshauptpunktes des optischen Systems in einem Bezugskordinatensystem (hier: Roboterbasiskordinatensystem) und die Orientierung der optischen Achse in diesem System. Unter Verwendung der äußeren Kameraparameter kann die Transformation eines Bildpunktes in das Bezugskordinatensystem durchgeführt werden, wodurch - mit zwei Kameras - die räumliche Vermessung von Objektpunkten möglich wird.

In einem weiteren Schritt ist die Position der Kamera(s) in Werkzeugkoordinaten zu beschreiben (Hand-eye-calibration). Dies ist erforderlich, da die Lage der Kameras der Robotersteuerung nicht bekannt ist, und daher jede Position eines Objektpunktes in das Koordinatensystem des Werkzeuges umgerechnet werden muß. Kamerakalibrierung und Hand-eye-calibration werden im folgenden beschrieben.

3.1.1 Kamerakalibrierung

Zur Bestimmung der inneren und äußeren Kameraparameter nutzt man das Verfahren der Bündeltriangulation (Bild 2, s. nächste Seite). Aus verschiedenen Perspektiven wird ein Längennormal vermessen, dessen Paßpunkte eine der Meßaufgabe angepaßte, genügend kleine Positionsunsicherheit aufweisen.

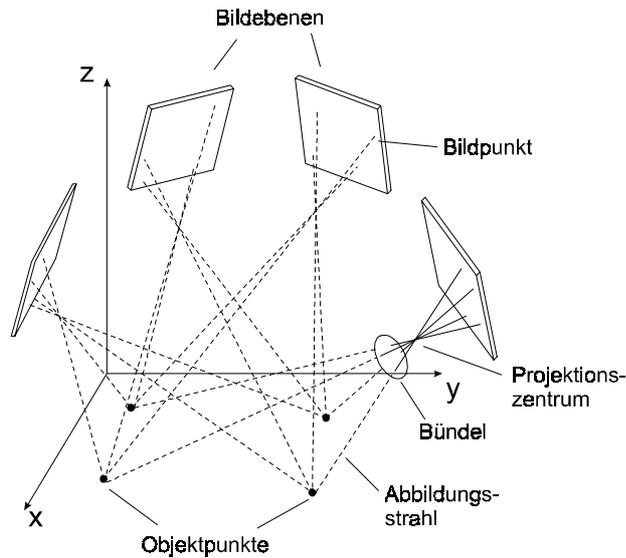


Bild 2: Paßfeld zur Kamerakalibrierung

Da in der hier vorgestellten Applikation die Posegenauigkeit von Industrierobotern erhöht werden soll, die durch den Wert der Wiederholgenauigkeit bestimmt wird, müssen die Koordinaten der Paßpunkte des Normal ungefähr um eine Zehnerpotenz genauer bekannt sein, als es dem Wert der Wiederholgenauigkeit des Industrieroboters entspricht. Brauchbar sind photogrammetrische Platten, bei denen die Lage der Paßpunkte mit einer Unsicherheit von $\leq 10\mu\text{m}$ bekannt ist. Bild 3 zeigt das Paßfeld, das hier verwendet wurde.

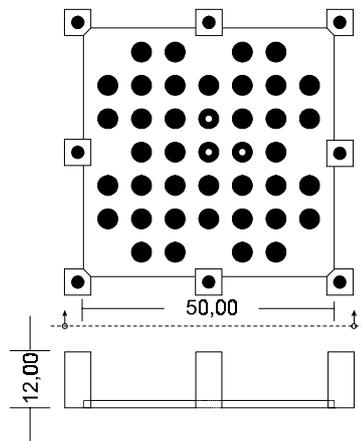


Bild 3: Längennormal zur Kamerakalibrierung

Aus verschiedenen Perspektiven wird das Paßfeld mit den am Roboter befestigten Kameras aufgenommen. Dabei sind solche Positionen vorteilhaft, bei denen sich die Lage des Paßfeldes im Sensorsystem der Kameras jeweils durch eine 90° -Drehung um die optische Achse von der vorherigen unterscheidet. Zusätzliche 3-D-Informationen werden durch Aufnahmen von der Seite gewonnen. Bilder 4a) bis 4c) zeigen beispielhafte Szenen. Eine Aufnahme vieler Paßpunkte, so wie es mit dem hier verwendeten Normal möglich

ist, bietet die Möglichkeit, sowohl die inneren Kameraparameter (Verzeichnungen) als auch die äußeren Kameraparameter (Position und Orientierung bzgl. des Normals) zum Aufnahmezeitpunkt zu bestimmen.

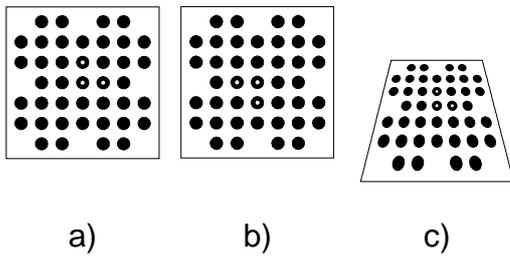


Bild 4: Unterschiedliche Perspektiven des Paßfeldes

- a) normal
- b) 180° um die z-Achse gedreht
- c) 45° um die x-Achse gedreht

a) b) c)

Allgemein gilt für die Abbildung der Paßpunkte das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ -c \end{bmatrix} = -\frac{1}{s_j} \cdot \underline{\underline{R}}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} X_{i,j} \\ Y_{i,j} \\ Z_{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{i,j} \\ \Delta y_{i,j} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7).$$

$x_{i,j}$ und $y_{i,j}$ sind die Sensorkoordinaten des Paßpunktes i in Stellung j , c ist der senkrechte Abstand zwischen dem Abbildungshauptpunkt und dem Sensor. s_j ist der Skalenfaktor bei Stellung j . $\underline{\underline{R}}_{i,j}$ beschreibt die Rotation vom Maßstabskoordinatensystem in das Sensorkoordinatensystem, das seinen Ursprung im Abbildungshauptpunkt hat. $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$ und $Z_{i,j}$ sind die Koordinaten des Paßpunktes i in Stellung j . Die Abbildungsfehler (Verzeichnungen) werden durch die Parameter $\Delta x_{i,j}$ und $\Delta y_{i,j}$ repräsentiert. Der Fehler in Richtung der optischen Achse (Fehleranteil der Bildweite c) ist in dem Parameter c enthalten. Aufgrund von n Messungen von jeweils m Paßpunkten ergibt sich ein Gleichungssystem des Grades $n \cdot m \cdot 3$, das nach $\underline{\underline{R}}_{i,j}$ sowie $\Delta x_{i,j}$ und $\Delta y_{i,j}$ aufzulösen ist. Dies ist allerdings, vor allem, was die Parameter $\Delta x_{i,j}$ und $\Delta y_{i,j}$ betrifft, nicht praktikabel; vielmehr sind in Gleichung 7 die Parameter $\Delta x_{i,j}$ und $\Delta y_{i,j}$ durch Funktionen von $x_{i,j}$ und $y_{i,j}$ zu ersetzen:

$$\begin{aligned} \Delta x_{i,j} &= f_x(x_{i,j}, y_{i,j}) \\ \Delta y_{i,j} &= f_y(x_{i,j}, y_{i,j}) \end{aligned} \quad (8).$$

Aus (7) und (8) ergibt sich das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ -c \end{bmatrix} = -\frac{1}{s_j} \cdot \underline{\underline{R}}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} X_{i,j} \\ Y_{i,j} \\ Z_{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x(x_{i,j}, y_{i,j}) \\ f_y(x_{i,j}, y_{i,j}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9).$$

Im Fall einer radialsymmetrischen Verzerrung haben die Verzeichnungsfunktionen f_x und f_y die Form

$$f_x(x_{i,j}, y_{i,j}) = f_y(x_{i,j}, y_{i,j}) = a \cdot (r_{i,j}^2 - r_0^2) \quad (10),$$

mit

$$r_{i,j}^2 = x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2, \quad (11),$$

woraus lediglich die poseunabhängigen Verzeichnungsparameter a , b und r_0 zu bestimmen sind. Der Parameter r_0 ist die erste Nullstelle der Verzeichnungsfunktion und beschreibt den Übergang von *dehnender* zu *stauchender* Verzerrung, a und b sind Skalenfaktoren.

Setzt man (11) in (10) ein und ersetzt in (9) die allgemeine Funktionschreibweise für die Linsenverzeichnung durch (11), erhält man die spezifische Abbildungsgleichung

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ -c \end{bmatrix} = -\frac{1}{s_j} \cdot \underline{\underline{R}}_{i,j} \cdot \begin{bmatrix} X_{i,j} \\ Y_{i,j} \\ Z_{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \cdot (x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2 - r_0^2) \\ a \cdot (x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2 - r_0^2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12).$$

Dieses Gleichungssystem kann nach den Parametern der Rotationsmatrix $\underline{\underline{R}}_{i,j}$ (s. Gleichung 2) sowie den Verzeichnungsparametern a und r_0 aufgelöst werden.

3.1.2 Hand-eye-calibration

Um später aus den gemessenen Bildkoordinaten auf die entsprechenden Objektkoordinaten umrechnen zu können, ist die Kenntnis der Lage der Kameras im Handkoordinatensystem, die sogenannte Hand-eye-calibration, des Roboters erforderlich. Mit Hilfe der Roboterpositionen und der Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.1 kann diese Transformation berechnet werden. Das Prinzip ist in Bild 5 (s. nächste Seite) dargestellt.

Danach ist folgende Gleichung nach $\underline{\underline{X}}$ aufzulösen

$$\underline{\underline{A}}_R \cdot \underline{\underline{X}} \cdot \underline{\underline{A}} = \underline{\underline{B}}_R \cdot \underline{\underline{X}} \cdot \underline{\underline{B}} \quad (13),$$

$\underline{\underline{A}}$ und $\underline{\underline{B}}$ ergeben sich aus den Ergebnissen der Kamerakalibrierung (Gleichung 9). $\underline{\underline{A}}_R$ und $\underline{\underline{B}}_R$ repräsentieren die Roboterpositionen. Mit diesen Informationen (innere und äußere Kameraparameter) ist eine 3-D-Vermessung von Objektpunkten mit dem beschriebenen Sensorsystem möglich.

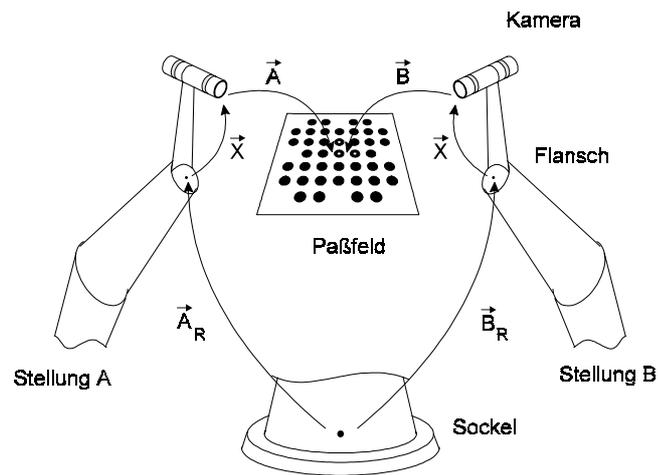


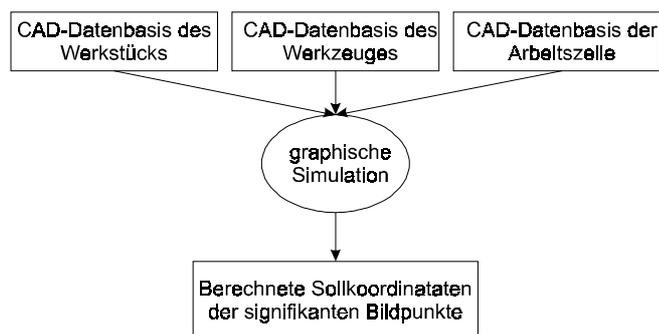
Bild 5: Prinzip der Hand-eye-calibration

4 Korrekturablauf

Nach der Off-line-Kalibrierung können mit diesem Meßsystem Koordinaten im Umfeld des Roboters vermessen und korrigiert werden. Da eine Korrektur immer auf dem Vergleich von Soll- und Istgrößen beruht, läuft sie in zwei Schritten ab.

4.1 Akquisition der Solldaten

Die Solldaten erhält man entweder aus den CAD-Datenbasen von Werkzeug, Werkstück und umgebender Arbeitszelle (Bild 6a) oder aus einem einmaligen Meßvorgang auf der Basis eines bereits geteachten Programmes (Bild 6b). Der erste Fall ist beispielsweise für die Off-line-Programmierung interessant. Der zweite Fall kommt zum Tragen, wenn ein Roboterprogramm in eine andere Arbeitszelle portiert werden soll.



a)

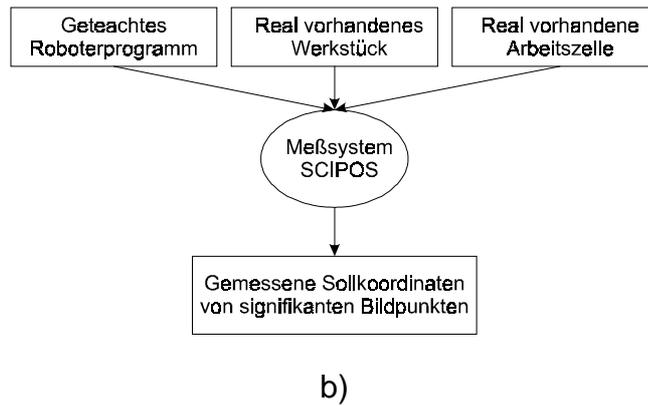


Bild 6: Akquisition der Solldaten

- a) Berechnung der Solldaten durch graphische Simulation
- b) Messung anhand eines geteachten Programmes

4.2 Akquisition der Istdaten

Die Istdaten werden durch Messung in der Ziellarbeitszelle gewonnen. Die Korrekturdaten werden durch Subtraktion und anschließender Transformation ins Roboterkoordinatensystem bestimmt. Mit Hilfe der Daten werden die im Roboterprogramm gespeicherten Positionen korrigiert (Bild 7).

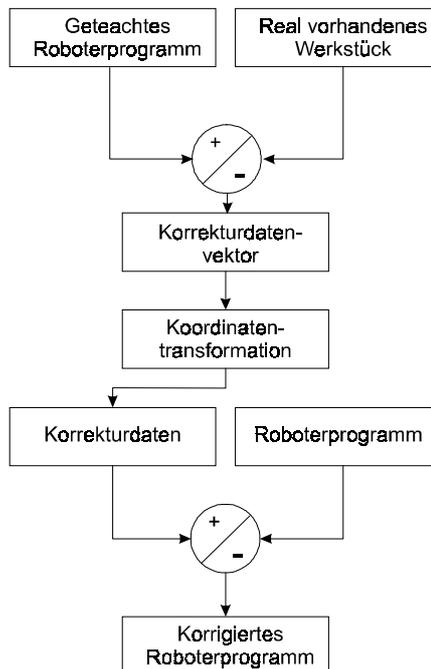


Bild 7: Korrektur von Roboterposen

Basierend auf einem Roboterprogramm, das von einer anderen Arbeitszelle stammt oder erzeugt wurde, wird durch die Vermessung in den zu korrigie-

renden Posen eine Korrektur durchgeführt. Auf Basis der CAD-Modelle von Werkzeug, Werkstück und Arbeitszelle kann die Solltransformation Werkzeug/Werkstück unter Anwendung graphischer Simulationssysteme berechnet werden. Mit Hilfe des Meßsystems läßt sich die entsprechende Isttransformation bestimmen. Durch Umformung der Transformationskette in Gleichung 13 ist die korrigierte Roboterposition zu bestimmen.

5 Ergebnis und Ausblick

Mit SCIPOS ist ein Meßsystem als Produkt verfügbar, das die in der Industrie immer noch weit verbreitete Teach-in-Programmierung in vielen Fällen ersetzen kann. Da mit SCIPOS der Zeitbedarf für Umrüstungen von Arbeitszellen wesentlich reduziert wird, liegt ein Hauptanwendungsfeld in der flexiblen Fertigung zur Herstellung kleiner Losgrößen. Aber auch dann, wenn im Rahmen ständiger Produktverbesserungen Roboterprogramme variiert werden müssen, kann SCIPOS sinnvoll eingesetzt werden, indem lediglich auf Basis der neuen CAD-Modelle die Korrekturdaten für die Roboterprogramme erzeugt werden können.

In einem weiteren Schritt kann das Verfahren leicht auf eine 6-D-Korrektur (Position und Orientierung) erweitert werden, indem mehrere Objektpunkte einer Szene in die Korrektur mit einbezogen werden.

6 Literatur

- /1/ Diewald, B., Janocha, H., Zapp, M.: *Bildverarbeitung beschleunigt 3-D-Koordinatenmessung*, QZ Qualität und Zuverlässigkeit, 2/1995, S. 211-216
- /2/ Engeln-Müllges, G., Reutter F.: *Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit C-Programmen*, BI Wissenschaftsverlag, Mannheim/Zürich/Wien 1990
- /3/ Hinüber, E., Diewald, B., Janocha, H.: *Kalibrieren von Industrierobotern mit einem Inertialmeßsystem*, MSR Magazin, 5-6/1993, S. 40-44
- /4/ Janocha, H., Diewald, B.: *New Methods of Measuring and Calibrating Robots*, Videometrics IV 1995, Proceedings of SPIE Vol. 2588, S. 689-699
- /5/ Janocha, H.; Zapp, M.: *Fertigungsnahe 3-D-Koordinatenmessung mit bewegter CCD-Kamera*, tm Technisches Messen 61 (1994), S. 329-334
- /6/ Lenz, R.: *Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit*, München, 1987
- /7/ Shiu, Y.C., Ahmad, S.: *Finding the Mounting Position of a Sensor by Solving a Homogeneous Transform Equation of the Form $AX = XB$* , Indianapolis, 1987