

Optimierung der Lage der Roboterbasis durch Kombination verschiedener Messverfahren

Markus Gapp¹, Tobias Weiser¹

*¹Hochschule Kempten, Institut für angewandte KI und Robotik, Schwabenstraße 102, 87616 Marktoberdorf
markus.gapp@hs-kempten.de*

Zusammenfassung

Die Steigerung der Absolutgenauigkeit von Robotern stellt seit vielen Jahren einen signifikanten Forschungszweig dar. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Simulation von Roboterzellen sowie die darauffolgende Offline-Generierung von Roboterprogrammen. Die Übereinstimmung der Koordinaten des Programms mit der realen Zelle muss dabei möglichst akkurat gewährleistet sein. Obwohl sich anfangs nur wenige Roboterhersteller mit dieser Thematik befassten, bieten inzwischen die meisten Industrieroboterhersteller und auch diverse Dienstleister eine Verbesserung der Roboter Genauigkeit an. Vor der Kalibrierung sind jedoch zwei wesentliche Vorarbeiten zu leisten: Die Ermittlung des Tool-Center-Points (TCP) und die Transformation zwischen dem Messsystem und der Roboterbasis. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Basis des Roboters.

Keywords: Robotik, Genauigkeit, Roboterbasis, optische Messverfahren

Einführung und Stand der Technik

Für einen Roboter mit hoher Absolutgenauigkeit [1] ist ein möglichst genauer TCP [2] mit Bezug auf den Roboterflansch und die Position der Roboterbasis von grundlegender Bedeutung. In der vorliegenden Abhandlung wird die Präzision der Basis des Roboters erörtert.

Die Ermittlung der Roboterbasis (RBF – Robot Base Frame) kann grundsätzlich mit den beiden Methoden "direkt" oder "indirekt" erfolgen.

Bei den indirekten Methoden erfolgt die Ermittlung der Transformation zwischen Messsystem und Roboterfuß/-basis mittels eines Optimierungsverfahrens, z. B. der Singulärwertzerlegung (SVD – Singular Value Decomposition [3]). Eine alternative Variante zur Bestimmung des Koordinatensystems besteht in der Messung der bewegten Achsen 1 und 2 über ein Kreis-Fitting [1, 4].

Die L-Methode sowie weitere indirekte Methoden wurden in [5] detailliert beschrieben.

Die direkten Methoden bedienen sich geometrisch bekannter Elemente auf der Aufstellplatte, die einen Bezug zur

Roboterbasis aufweisen. Abschließend ist es von essenzieller Bedeutung, dass der aufzustellende Roboter per Aufnahmestifte mit Passung auf die Platte gestellt wird. Andernfalls können erste Abweichungen auftreten. Nach Festlegung der geometrischen Elemente kann die Roboterbasis mithilfe der Vektorrechnung ermittelt werden.

Hinsichtlich der verwendeten Messsysteme in der Robotik wurde anfangs mit Theodoliten gearbeitet. Darauf aufbauend wurden kamerabasierte Systeme entwickelt [6, 7], die aufgrund der kontinuierlichen Steigerung von Auflösung und Genauigkeit auch heute [8] noch im Einsatz sind. Einen signifikanten Beitrag zur Präzision bei Robotikanwendungen leisten seit 1988 Lasertracker der Fa. API (Automated Precision Inc.), die entweder mit einer Laufzeitmessung arbeiten oder basierend auf der Interferometrie Genauigkeiten von unter 10 µm erzielen. Ein weiterer Vorteil des Lasertrackers ist die Erfassung eines Arbeitsraums von bis zu 80 m im Radius.

Messtechnischer Aufbau

In vorliegendem Beitrag findet eine CNC-bearbeitete Montageplatte als Roboter aufstellplatte Verwendung (vgl. Abb. 1). Sie eignet sich für den Einsatz mit verschiedenen Robotertypen und bietet zusätzliche

geometrische Elemente, die zur Ermittlung des Basiskoordinatensystems genutzt werden können.

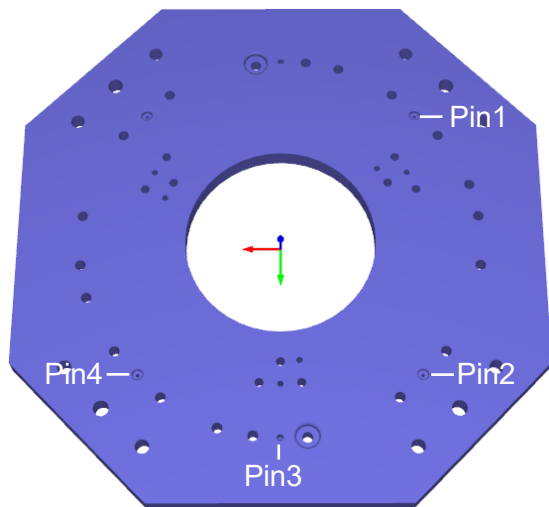


Abb. 1: CNC-bearbeitete Roboterplatte zur Montage unterschiedlicher Robotertypen über Zentrierstifte. Die gemessenen Bohrungen zur Aufnahme der Zentrierstifte, sind gekennzeichnet.

Als Roboter wurde ein KR30HA_3 verwendet, welcher eine maximale Reichweite von 2033 mm aufweist und somit der Kategorie des sogenannten "Medium Range" zugeordnet werden kann. Die Option "positioniergenau" war deaktiviert. Mit dieser Option bietet KUKA eine bessere, absolute Positionierung an, die in Anlehnung an [7] modellbasiert zum Einsatz kommt.

Das Messsystem ist ein Lasertracker der Firma API vom Typ RADIANT PLUS, der mit Laufzeitmessung arbeitet, jedoch auch 6D-Messungen durchführen könnte. Gemäß den Herstellerangaben beträgt die Grundgenauigkeit $15\ \mu\text{m} + 5\ \mu\text{m}/\text{m}$. Die vorliegenden Versuche im temperaturstabilen Labor weisen eine Messgenauigkeit von ca. $10\ \mu\text{m}$ im verwendeten Messbereich bis ca. 3 m auf.

Für die Messungen wurde ein Standard 1,5" Reflektor (SMR-Spherically Mounted Retroreflector) verwendet. Alternativ fand das von API verfügbare "Active Target" Anwendung, welches mit zwei Motoren ausgestattet ist und eine Nachführung des Laserstrahls ermöglicht. Dadurch ist die Erfassung großer Bewegungsbereiche möglich. Dieser Vorteil wird insbesondere bei der Messung der Achse-1-Bewegung genutzt.

Methode und Datenerfassung

Die Ermittlung des Basiskoordinatensystems eines Roboters erfolgt in der Regel auf Basis geometrischer Elemente. Im darauffolgenden Schritt wird das Roboter-Modell mittels sogenannter Zentrierstifte auf der Montageplatte positioniert. Dies kann in Abweichungen bei der Transformation zwischen dem Messsystem und der realen Basis des Roboters resultieren und hängt von der Position des Roboters ab. Beim verwendeten Typ wurde die max. Abweichung im mittleren Arbeitsbereich entsprechend Gl. (1) zu

$$AP \leq 0,06\ \text{mm}$$

berechnet. Dieser Wert wurde unter Verwendung der AP-Accuracy of Pose (ISO 9283 [9]) ermittelt, der Strahlensatz kam zur Anwendung. Der mittlere Arbeitsbereich ist zudem definiert als der in der ISO 9283 festgelegte ISO-Würfel. Für die Berechnung wurde die Position P1, der Würfelmittelpunkt, genutzt, siehe Abb. 2.

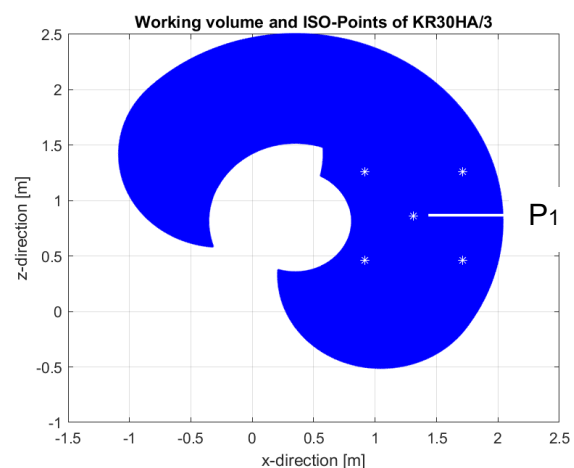


Abb. 2: Seitenansicht des Roboterarbeitsbereiches, der Roboterfuß steht im Ursprung, P_1 entspricht der Mitte des Würfels.

Abb. 3 zeigt die durchgeführten Messungen. Die Aufzeichnung der Achsbewegungen ist besonders gut sichtbar. Die Koordinatensysteme der Roboterbasis sind unterhalb der Achse-1-Aufzeichnung lokalisiert. Darüber hinaus wird das Koordinatensystem dargestellt, welches aus den Achsbewegungen und der Ebene (vgl. Abb. 4) konstruiert wurde. Aufgrund der präferierten Übersichtlichkeit werden die Messungen der Ebene jedoch nicht dargestellt. Die Pin-Aufnahmen auf der Aufstellplatte sind lediglich als ein Punkt zu sehen, dies führt bei

dieser Auflösung zu einer kaum wahrnehmbaren Erkennbarkeit. Auf der rechten Seite des Bildes befindet sich der Lasertracker des Herstellers API.

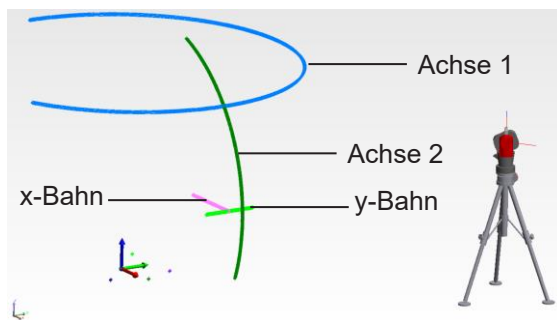


Abb. 3: Durchgeführte Messungen an der Aufstellplatte und die aufgezeichneten Bewegungen des Roboters (Achse 1 und 2, x- und y-Bahn [5]) ohne die Messungen auf der Ebene der Platte (siehe Abb. 4).

Im Rahmen der indirekten Methoden wurden folgende Varianten untersucht:

- Ermittlung über die Bewegungen der Achsen 1 und 2 des Roboters (1. Methode, M1), Prozedur aus RoboDK, Modul Roboterkalibrierung, [10]).
- Ermittlung mit Hilfe von Soll- und Ist-Positionen mittels der Singulärwertzerlegung (2. Methode, M2).

Für die direkten Methoden wurden die Zentrierbohrungen auf der Aufstellplatte Abb. 1 verwendet, die einen bekannten Bezug zum Ursprung des Roboterkoordinatensystems und somit zur Mitte der Aufstellplatte haben. Die Transformation T für dieses Koordinatensystem wurde unter Anwendung der Vektorrechnung und des Kreuzproduktes entsprechend Gl. (2) ermittelt (3. Methode, M3).

$$T_{API-Rob} = \begin{pmatrix} x \\ \frac{u}{|u|} \frac{v}{|v|} \frac{w}{|w|} y \\ z \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{pmatrix}_{4 \times 4}$$

Zur Bestimmung der Ebene der Aufstellplatte wurde die Oberfläche der Platte mit einem SMR gescannt. Daraus wurde die z-Koordinate für die direkten Methoden berechnet. Abbildung 4 zeigt die Messpositionen auf der Aufstellplatte.

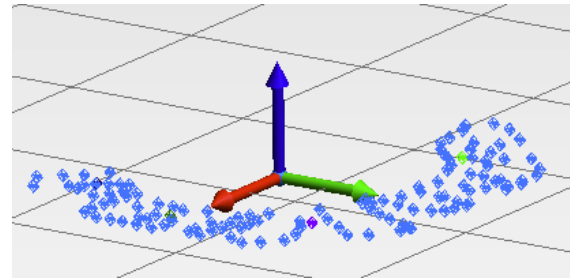


Abb. 4: Messpositionen auf der Ebene.

Im letzten Schritt wurde die zuletzt ermittelte Ebene mit den Kreisbewegungen (1. Methode) der indirekten Methode kombiniert (4. Methode, M4). Die These ist, dass der Ursprung des Koordinatensystems idealerweise durch den Mittelpunkt der Achse-1-Bewegung abgebildet wird. Ebenso wird die y-Richtung des Koordinatensystems durch die Achse-2-Bewegung am besten repräsentiert.

Zur Messdatenerfassung wurde die Achse A1 maximal bewegt und dabei der Roboterflansch mit dem "Active Target" erfasst. Dadurch konnten 240° des Kreises gemessen werden. Ebenso wurde die Achse 2 über einen Bereich von 120° verfahren und gemessen. Aus beiden Datensätzen wurden mit Hilfe eines Kreisfittings [11] der Mittelpunkt und der Radius berechnet.

Ergebnisse

Die maximale absolute Abweichung aufgrund der mechanischen Komponenten (Pins auf der Roboteraufstellplatte) ergibt sich bei einem mittleren Arbeitspunkt P_1 von $x = 1314$ mm und einem $TCP_z = 150$ mm zu 0,06 mm.

Der Arbeitspunkt P_1 wurde auch für die weiteren Vergleiche herangezogen.

Die max. mögliche Abweichung durch die Aufstellung addiert sich zu der absoluten Positioniergenauigkeit des Roboters am Arbeitspunkt.

Aus den drei Pin-Positionen kann der Ursprung und die Ausrichtung des Roboterkoordinatensystems berechnet werden. Abb. 5 zeigt die Lage dieses Koordinatensystems mit den verwendeten Konstruktionselementen.

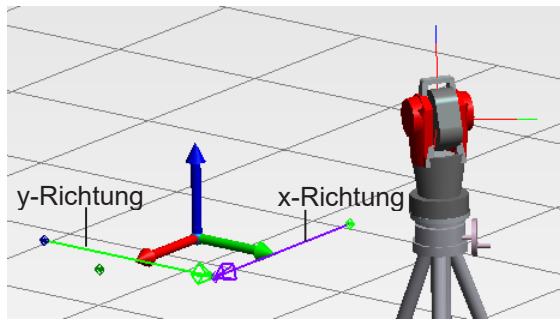


Abb. 5: Lage des Roboterkoordinatensystems auf der Basis von Methode 3. Die Pin-Positionen mit den entsprechenden Vektoren sind auch eingezeichnet. Die z-Koordinate wird bei beiden Methoden 3 und 4 über die gemessene Ebene festgelegt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Fitting-Funktionen [11] der Ebene und den Kreisen dargestellt. Die Ebene wurde mit einem SMR abgetastet, der in einem Nest lag, um Kratzer auf der Oberfläche des SMRs zu vermeiden. Durch Berücksichtigung der Nesthöhe kann z bestimmt werden. Der „Root-Mean-Square“ (RMS) Fehler ergab sich zu: 0,012 mm.

Ebenso wurde der RMS des Kreis-Geometrie-Fits mit 0,012 mm für die Achse A1 und 0,011 mm für die A2 ermittelt.

Die Ergebnisse der vier Methoden resultieren aus den Messungen, Berechnungen und dem Fitting der Kreise bzw. Ebene, wie in Tab. 1 dargestellt. Bezüglich der Methode 4 sei darauf hingewiesen, dass es sich um die Bezugsmethode handelt.

Tab. 1: Ursprung der unterschiedlichen Methoden, Bezug ist die Methode M4, bei der die Achse 1 (Drehachse) dem Ursprung entspricht. Die Darstellung (*) erfolgt im Rahmen des RMS-Fehlers der Kreise und der Ebene.

mm	Δx	Δy	Δz
M1	0,233	0,56	0,415
M2	1,048	-0,669	0,281
M3	0,236	0,524	0*
M4	0*	0*	0*

Im Gegensatz zu [5], bei der beliebig verteilte Positionen verwendet wurden, bezieht sich dieser Beitrag für die Methoden 3 und 4 auf den ISO-Würfel. Dort wurden die absoluten Abweichungen entsprechend [9] an den 8

Würfecken, zuzüglich P_1 , entsprechend Gl. (3) berechnet.

$$AP = \sqrt{(x_c - \bar{x})^2 + (y_c - \bar{y})^2 + (z_c - \bar{z})^2}$$

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der absoluten Positionierung des Roboters in Abhängigkeit von den beiden Verfahren direkt (M3) und kombiniert (M4).

Tab. 2: Absolute Positionierung des Roboters mit Bezug auf den ISO-Würfel. Inklusive P_1 sind dies neuen Positionen.

mm	Mittelwert	Max-Wert
M3	1,53	2,03
M4	1,35	1,82

Diskussion

Das kommerzielle Softwarepaket RoboDK ermittelt die Roboterbasis (Methode 1) über zwei Kreisbewegungen von 60° bzw. 55°. In Bezug auf die z-Koordinate findet das Nominalmodell des Roboters Anwendung. Es stellen sich robuste und wiederholbare Ergebnisse ein, die in der Regel zu einem Offset führen.

Bei der Methode 2, wird mit einem Soll-Ist-Vergleich eine möglichst gute Übereinstimmung erreicht. In diesem Beitrag wurde die Singularwertzerlegung eingesetzt. Je genauer der Roboter selbst positioniert, umso präziser kann auch die Transformation entsprechend Gl. 2 ermittelt werden.

Die Methode 3 basiert auf geometrischen Elementen, die sich auf einer bearbeiteten Fläche befinden. Diese entsprechen den Führungsbolzen der Roboteranstellung. Sowohl die Genauigkeit der Aufstellplatte als auch die Passung der Zentrierstifte führen zu einem Offset bezüglich Ursprung.

Die letzte untersuchte Methode kombiniert die Messung der Ebene der Aufstellplatte mit den Kreisbewegungen des Roboters. Da die aufgezeichneten Kreissegmente große Bereiche abdecken, ergibt sich bereits die umfangreichste Datenbasis. Physikalisch liegt der Ursprung des Roboterkoordinatensystems im Ursprung der Achse-1-Bewegung. Dieser Vorteil und auch der große Teilkreis werden bei der vorgeschlagenen Methode verwendet.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Tabelle 2 resultiert die Methode 4 in der

geringsten mittleren Abweichung von 1,35 mm, unter der Voraussetzung, dass ein Standardroboter mit Nullpunkt-Kalibrierung der bewegten Achsen zum Einsatz kommt. Die Methoden 1 und 2 weisen bereits im Ursprung eine z-Abweichung auf, da die Ebene nicht gemessen, sondern über die Kinematik bzw. durch eine Optimierung bestimmt wird. Für die Methode 2 wurde zudem die größte Abweichung in einer Richtung mit $\Delta x = 1,05$ mm ermittelt.

Fazit und Ausblick

Die Methode 4, die Kreismessungen mit der direkten Messung der Ebene kombiniert, führt bei der Prüfung der absoluten Referenzpositionen (9 Positionen des ISO-Würfels) zu den geringsten Abweichungen. Da durch die Rotation der Achse 1 der Ursprung ermittelt wird, kann hier von keiner weiteren Verbesserungsmöglichkeit ausgegangen werden.

Potential bietet eventuell die Ausrichtung der y – Achse. Erste Untersuchungen der L-Methode und deren y-Richtung führten zu keiner Verbesserung.

Von weiterem Interesse ist der Einfluss der gewählten Basisermittlung auf die Kalibrierung eines Roboters. Hierzu sind umfangreiche Untersuchungen notwendig, insbesondere da es auch diverse Verfahren zur Kalibrierung eines Roboters gibt.

Für die Robotikanwendungen stellt sich die Frage, ob durch die optimierte Basis auch die Offline-Programme effizienter in Betrieb genommen werden können.

Abschließend wurden die Daten dieser Arbeit mit einer Roboterkinematik ermittelt. Die Übertragbarkeit auf weitere Roboter oder auch andere Kinematiken wurde hier nicht untersucht.

Literaturnachweis

- [1] A. Nubiola, I. A. Bonev, Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a lasertracker, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 29 (2013) 236–245, DOI: 10.1016/j.rcim.2012.06.004
- [2] Roman Haas, Thomas M. Wendt, A Novel Vision-Based Method for Accurate Tool Center Point Calibration of Robots, IEEE Sensors (2025); DOI: 10.1109/SENSOR59705.2025.11330685
- [3] W. Dahmen, A. Reusken, Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer Verlag (2022), ISBN 978-3-662-65180-3, DOI: 10.1007/978-3-662-65181-0
- [4] Sergio Ferrarini, Pietro Bilancia, Roberto Raffaelli, Margherita Peruzzini, Marcello Pellicciari, A method for the assessment and compensation of positioning errors in industrial robots, Published by Elsevier Ltd. (2023), DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102622
- [5] Maxime Sélingue, Adel Olabi, Stephane Thiery, and Richard Béarée, Experimental analysis of robot base frame identification Methods, Sixth Iberian Robotics Conference, (2023), DOI: 10.1007/978-3-031-58676-7_41
- [6] Fa. Krypton/Metris/Nikon, www.metris3d.hu/k400_500_600_cmm_de_0905.pdf, (abgerufen am 30.03.2026)
- [7] U. Wiest, Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern, Réseau Scanning Kamera (S. 41), Dissertation, Universität Karlsruhe (2001), ISBN 978-3-8265-8609-5
- [8] Fa. Creaform, C-Track Stereokamera, <https://www.creaform3d.com>, (abgerufen am 30.03.2026)
- [9] ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots – performance criteria and related test methods, 1998
- [10] RoboDK Hilfe, <https://www.robodk.com/doc/en/Robot-Calibration-LaserTracker.html> (abgerufen am 17.04.2026)
- [11] Spatial Analyzer, Users Manual, <https://www.spatialanalyzer.com/download/> (abgerufen am 08.05.2026)