

Tool-Center-Point-Kalibrierung eines Werkzeuges für Kaltschmiedeprozesse

Benedikt Loris¹, Markus Gapp¹, Stefan J. Rupitsch², Tobias Weiser¹

¹Hochschule Kempten, Institut für angewandte KI und Robotik, Schwabenstraße 102, 87616 Marktoberdorf

²Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK, Georges-Köhler-Allee 201 D-79110 Freiburg

Zusammenfassung

Kaltschmiedeprozesse finden vorrangig Anwendung bei der Bearbeitung von Oberflächen aus Metall. Bei der Verwendung des Werkzeugs an einem Roboter ist der Tool-Center-Point (TCP) des Roboters für eine akkurate Bahnbewegung des Werkzeugs erforderlich. Da der Prozess mit einer Halbkugel realisiert wird, sind die in der Robotersteuerung verfügbaren Möglichkeiten zur TCP-Ermittlung nur bedingt geeignet. Mittels einer Low-Cost-Kamera bei gleichzeitig hoher Auflösung wird in diesem Beitrag der TCP durch ein externes System hochgenau ermittelt.

Keywords: Tool-Center-Point-Kalibrierung, Kaltschmiedeprozess, CMOS-Low-Cost-Kamera

Einführung

Kaltschmiedeverfahren werden verwendet, um Oberflächen zu vergüten. In diesem Kontext sind die Aspekte einer automatischen Bearbeitung von Interesse, beispielsweise unter Einsatz einer CNC-Maschine oder eines Roboters. Dabei ist der reduzierte Energieaufwand für den Prozess von Relevanz, bei gleichzeitig kleinflächiger Bearbeitung prozessrelevanter Oberflächenbereiche.

Die Ausführung von Kaltschmiedeprozessen erfolgt in Abhängigkeit des Materials mit unterschiedlichen Kugeldurchmessern [1]. Es konnte festgestellt werden, dass die Position der Halbkugel einen signifikanten Einfluss auf die Qualität des Prozesses hat. Im einfachsten Fall werden die verfügbaren Werkzeuge von einem Roboter geführt, dessen "Tool-Center-Point" (TCP) mit möglichst hoher Präzision bestimmt werden muss (vgl. [2]). Im Gegensatz zu [3], in dem kein physikalischer TCP zum Einsatz kommt, beschreibt dieser Beitrag eine Methode, mit der sich die Kugel effizient und mit einer kostengünstigen Kamera berührungslos [4] einmessen lässt.

Hardware- und Netzwerkarchitektur

Zu diesem Zweck wurde das Kaltschmiedewerkzeug "Forgefix" [5] der Firma Pokolm an einem KUKA KR3 R540 adaptiert.

Der Kameraschlitten zur TCP-Vermessung ist seitlich innerhalb der Zelle positioniert. Die

Kamera ist auf einer 3D-gedruckten Rundschiene montiert, die an ihrer Oberseite einen Zahnkranz aufweist. Die Bewegung der Kamera erfolgt auf einem Radius von ca. 400 mm über einen Winkel von 35°. Der Prozess wird durch einen Schrittmotor, zwei Zahnriemenscheiben, einen Zahnriemen und ein gedrucktes Zahnrad auf einer kugelgelagerten Welle realisiert. Der Verfahrweg der Kamera wird durch zwei Endschalter begrenzt, die darüber hinaus zur wiederholten Positionierung der Kamera für die Stereo-Bildaufnahme dienen.

Die Initiierung der Verfahrbewegung erfolgt durch einen Raspberry Pi, welcher mit einer Codesys-Applikation ausgestattet ist und eine Kommunikation mit einem Arduino ermöglicht. Gleichzeitig fungiert er als Kommunikationsschnittstelle zur Robotersteuerung, um Variablen per PROFINET auszutauschen, sowie zur Interaktion mit der installierten Kamera-Visualisierung. An den Arduino sind ein Schrittmotortreiber und die beiden Endschalter angeschlossen, um die Bewegung zu realisieren. Die vorliegende Kamera ist mit einem USB-Anschluss ausgestattet und ermöglicht die Aufnahme von Bildern mit einer maximalen Auflösung von 3264 x 2448 Pixeln bei einer Bildrate von 15 Bildern pro Sekunde im MJPEG- oder YUY2-Format.

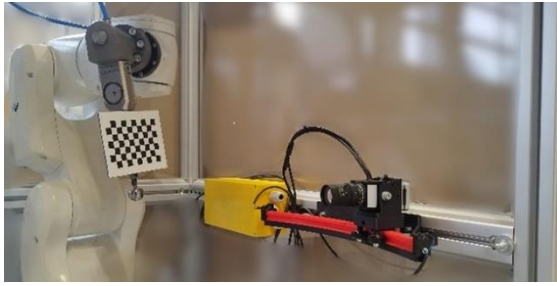


Abb. 1: Roboterzelle mit Kameraschlitten, Werkzeug und Kalibriermuster.

Aufbau der Software-Architektur

Das entwickelte Programm umfasst die Funktionen, Bildaufnahme und -verarbeitung, Kamerakalibrierung sowie die Kommunikation mit einer externen Steuerung über OPC UA. Die Struktur ist objektorientiert aufgebaut und nutzt eine grafische Benutzeroberfläche, die auf PySide6 basiert.

Zunächst wird die Kamera automatisch erkannt und initialisiert. Im Anschluss erfolgt eine kontinuierliche Aufnahme von Bilddaten mit definierter Auflösung und Bildrate. Die aufgenommenen Bilder werden gedreht und über ein Signal an andere Programmteile weitergeleitet. Darüber hinaus besteht die Option, Einzelbilder gezielt abzuspeichern, wobei zwischen Kalibrierungsbildern und sogenannten TCP-Bildern differenziert wird. Die Speicherung erfolgt in einer strukturierten Ordnerhierarchie, die durch eine fortlaufende Nummerierung gekennzeichnet ist.

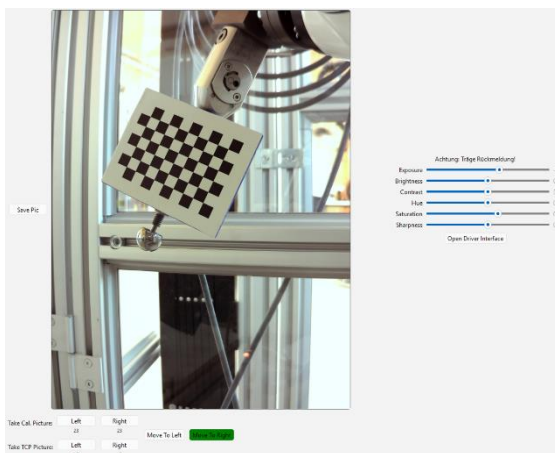


Abb. 2: „Image Capture“ der Visualisierung: Einstellen der Kameraparameter, Speicherung der Bilder für die Kalibrierung und Trigger des Kameraschlittens.

Parallel dazu wird eine Bildverarbeitung durchgeführt. Innerhalb eines auswählbaren

Bildausschnitts (Region of Interest, ROI) wird eine mehrstufige Verarbeitung durchgeführt. Diese umfasst die Grauwertumwandlung, die Kontrastverbesserung mittels CLAHE, die Glättung, die Kantendetektion über Sobel-Operatoren sowie die binäre Segmentierung durch Schwellwertverfahren. Im Anschluss sind morphologische Operationen wie Lochfüllung und Rauschunterdrückung vorgesehen.

Die Bestimmung geometrischer Eigenschaften erfolgt auf der Basis des resultierenden Binärbildes (Abb. 3). Dabei werden der Schwerpunkt sowie die Hauptachsen unter Verwendung der Kovarianzanalyse berechnet. Im Anschluss erfolgt eine Rotation des Bildes, wobei ein Referenzbild zur Bestimmung der optimalen Orientierung herangezogen wird. Nach der Ausrichtung werden Kanten extrahiert und relevante Punkte selektiert, um schließlich eine Kreisapproximation mittels Ausgleichsrechnung durchzuführen. Aus diesen Werten werden anschließend der Mittelpunkt und der Radius berechnet und sowohl lokal als auch global im Bildkoordinatensystem angegeben.

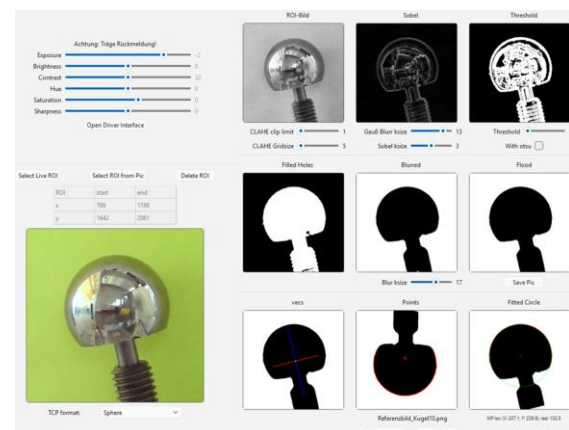


Abb. 3: „Image Processing“ innerhalb der Visualisierung: Extrahieren der Kugelgeometrie im ROI-Bild durch anpassbare Parameter und Anzeige der Pixel- und Bildkoordinaten.

Ein weiterer essenzieller Bestandteil ist die Kamerakalibrierung (Abb. 4). In diesem Verfahren werden anhand von Schachbrettmustern sowohl intrinsische Parameter, wie etwa die Verzerrungskoeffizienten und die Kameramatrix, als auch extrinsische Parameter für ein Stereokamerasystem bestimmt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Kalibrierdaten zu speichern und zu laden. Auf der Basis der Kalibrierung ist auch eine 3D-Rekonstruktion durch Triangulation möglich.

Image Capture Image Processing Calibration

Mono Calibration	Error: Reprojektionserror: 0.4528	Camera Matrix:	4553.897	0.000	1522.766	Save to File
			0.000	4555.775	1558.091	
			0.000	0.000	1.000	Load from File

Stereo Calibration	Error: Reprojektionserror: 1.0125	R:	0.810	-0.006	0.587	T:	-0.225	Save to File
			0.004	1.000	0.004		-0.000	
			-0.587	-0.001	0.810		0.008	Load from File

Abb. 4: „Calibration“ der Visualisierung: Durchführen der Kamerakalibrierung (Mono und Stereo) mit Fehlerbetrachtung, Anzeige der Kalibrierwerte und Speichern/Laden der Kalibrierdaten.

Die Anwendung verwendet zudem eine Schnittstelle zu einem OPC-UA-Server. Es besteht die Möglichkeit zur Steuerung des Kameraschlittens (links/rechts).

Die grafische Benutzeroberfläche dient der Anzeige des Livebildes, der Zwischenschritte der Bildverarbeitung sowie der Parametrierung. Mittels diverser Bedienelemente können Kameraeinstellungen angepasst, Bildverarbeitungsparameter modifiziert, Kalibrierungen initialisiert und Bilder aufgenommen werden. Darüber hinaus erlaubt die Oberfläche die Selektion von Bildausschnitten sowie die Anzeige berechneter Ergebnisse, wie etwa des ermittelten Mittelpunkts.

Methode und Datenerfassung

Zunächst erfolgt die Bestimmung der Kameramatrix über ein Schachbrett-Kalibriermuster am Werkzeugschaft. Zu diesem Zweck wird der Roboter auf verschiedene Positionen und Orientierungen verfahren und anschließend jeweils ein Bild in beiden Kamerapositionen aufgenommen. Die Bestimmung der Kameraparameter erfolgt durch einen Algorithmus von OpenCV [6]. Die zugrunde liegende Kalibriermethode nach Zhang [7], Gl. (1), bildet die Basis dieses Algorithmus.

$$s\tilde{m} = A \cdot [R \quad t] \cdot \tilde{M}$$

mit s - Skalierungsfaktor,
 $\tilde{m}$ - Bildpunkt in homogenen Koordinaten,
 A - intrinsische Kameramatrix,
 R, t - Rotation und Translation,
 $\tilde{M}$ - 3D-Weltpunkt

Die intrinsische Matrix lautet (Gl. 2):

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

mit α, β - Brennweite in Pixeln,
 γ - Scherparameter,
 u_0, v_0 - Hauptpunkt

In der Folge wird der Prozess in einer iterativen Abfolge wiederholt, wobei die Bildaufnahmen über definierte Kamerapositionen (Endschalter am Aufbau) erfolgen. Nach Abschluss des Speichervorgangs der Bilddateien erfolgt die Stereokalibrierung. Zu diesem Zweck werden mit dem Roboter verschiedene Posen angefahren und jeweils ein Bild in der linken und rechten Endlage mit der Kamera erfasst. Die konstruktive Gestaltung des Werkzeugs ermöglicht die Erfassung von Tiefeninformationen aus den Aufnahmen. Im Rahmen einer 4-Punkt-Kalibrierung des TCP kann nach jeder Umlagerung des Roboters die Position der Mitte der Werkzeug-Halbkugel bestimmt werden. Gemäß der vorliegenden Evidenz wird der Roboter nach einer erfolgten Umlagerung mittels eines Programmaufrufs und übergebenen Variablen wieder auf den ursprünglichen Mittelpunkt bewegt. Die Ergebnisse der TCP-Kalibrierung werden mit einem Lasertracker der Fa. API verifiziert.

Ergebnisse

Die Abweichung der TCP-Vermessung von 0,17 mm beim Abgleich mit der Kamera wird in Tab. 1 dargestellt. Dieser Wert ist um mindestens den Faktor zwei kleiner als derjenige, der mit dem Roboter selbst ermittelt werden kann.

Tab. 1: Ergebnis der KUKA 4-Punkt-Kalibrierung mit Transformation, die Abweichung liegt bei 0,17 mm.

mm	x	y	z	Fehler
TCP	198,42	0,3	61,67	0,17

Für die Messung mit dem Lasertracker wurde ein Referenzbild der Werkzeugkugel aufgenommen und dessen Mittelpunkt bestimmt. Nach der manuellen Umlagerung des Werkzeugs erfolgte die Vermessung des Kugelschwerpunkts mit der Kamera. Die Position wurde so lange korrigiert, bis die Abweichung zwischen Referenzmittelpunkt und neuem Mittelpunkt entsprechend der Kamera in allen drei Achsen einen Wert von kleiner als 0,02 mm hat. Im Rahmen der Untersuchung wurde ein Vergleich der beiden Positionen der Kugel unter Zuhilfenahme des Lasertrackers durchgeführt. Dabei konnte eine Abweichung von 0,1 mm (Abb. 5) festgestellt werden.

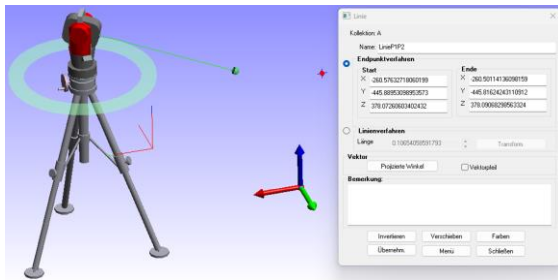


Abb. 5: Vergleichsmessung mit dem Lasertracker, die Abweichung liegt bei 0,1 mm.

Diskussion

Die vorliegende TCP-Vermessung ermöglicht eine mindestens zweifache Verbesserung der Ermittlung des TCPs. Im Vergleich zu Koordinatenmessmaschinen, Messarmen oder optischen Systemen ist der verwendete Aufbau erheblich kostengünstiger. Es besteht die Möglichkeit, dass dieser Aufbau bei Roboterzellen mit einer regelmäßigen TCP-Prüfung dauerhaft verbaut ist.

Die Vergleichsmessung mit einem Lasertracker zeigt eine Abweichung in ähnlicher Größenordnung und bestätigt daher den kamerabasierten Ansatz.

Die Anforderungen an die Genauigkeit des Messsystems hängen von den geforderten Prozessparametern ab. In der Hubrichtung des Werkzeuges ist eine Abweichung weniger kritisch, da das Werkzeug selbst einen Hub von ca. 2 mm zurücklegen kann. Wichtiger ist die Genauigkeit in Bahnrichtung, da der Zeilenabstand des Werkzeuges hier einen Wert von 0,1 mm erreichen kann.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Methodik zur kamerabasierten Tool-Center-Point-Kalibrierung eines Kaltschmiedewerkzeugs zeigt, dass durch den Einsatz einer kostengünstigen CMOS-Kamera eine hochgenaue und berührungslose Vermessung des TCPs realisiert werden kann. Im Vergleich zur manuellen 4-Punkt-Kalibrierung kann die Genauigkeit deutlich gesteigert werden.

Die Verifikation mittels Lasertracker bestätigte die erreichte Messgenauigkeit sowie die Eignung des entwickelten Ansatzes für Kaltschmiedeprozesse. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich der entwickelte Aufbau in eine bestehende Roboterzelle integrieren lässt und eine automatisierte Kalibrierung ermöglicht. Besonders die

Kombination aus stereoskopischer Bildaufnahme, Bildverarbeitung und Triangulation erwies sich als geeignet, um die Position der Werkzeugkugel reproduzierbar zu bestimmen.

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten könnten weitere Optimierungen des Systems untersucht werden. Dabei ist zu evaluieren, inwieweit eine Reduzierung der Bildauflösung bei vergleichbarer Genauigkeit zu einer geringeren Rechenzeiten beitragen kann. Zusätzlich soll geprüft werden, ob durch eine Mittelwertbildung über mehrere Livebilder eine weitere Stabilisierung und Verbesserung der Messergebnisse erreicht werden kann. Weiterhin ist der Einfluss der Größe des verwendeten Schachbrett-Kalibriermusters auf die Genauigkeit der intrinsischen und extrinsischen Kamerakalibrierung zu analysieren.

Literaturnachweis

- [1] Wai Luen Chan, Henry Kuo Feng Cheng, Hammer peening technology—the past, present, and future; Springer, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2022), doi: 10.1007/s00170-021-07993-5
- [2] Albert Nubiola, IlianA.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
- [3] Cheng-Kai Huang, Hao-Yun Zhan, A novel calibration method for robotic arm tool center point without a physical tool apex, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2025), doi: 10.1007/s00170-024-14906-9
- [4] Fakherddine Fares, Haïfa Souifi, Yassine Bouslimani, Mohsen Ghribi, Tool Center Point Calibration Method for an Industrial Robots based on Spheres Fitting Method, IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (2021), doi: 10.1109/ROSE52750.2021.9611759
- [5] Forgefix, Pokolm, Produkte, <https://www.pokolm.com/produkte/forgefix> [abgerufen am 29.04.2026]
- [6] OpenCV, Camera Calibration, https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html [abgerufen am 29.04.2026]
- [7] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, vol. 22, no. 11 (2000) 1330-1334, doi: 10.1109/34.888718