

Identifikation der Hand-Auge-Korrespondenz durch Pose-Graph-basierte Referenzposenoptimierung

Hagen Bossemeyer*, Markus Kästner*, Eduard Reithmeier*

*Institute of Measurement and Automatic Control, Leibniz Universität Hannover

[mailto: hagen.bossemeyer@imr.uni-hannover.de](mailto:hagen.bossemeyer@imr.uni-hannover.de)

Zur Bestimmung der Hand-Auge-Korrespondenz wird ein Kalibrierobjekt vor der Kamera positioniert und das System kinematisch angeregt. Das Kamerasichtfeld von Positioniersystemen mit großem Bewegungsraum verlässt jedoch bei geringen Auslenkungen schnell das Kalibrierobjekt. Die Identifikation eines Pose-Graph Netzes aus vielen kleinen Kalibrierkörper überwindet diese Limitierung.

1 Einführung

Die Identifikation der Hand-Auge-Korrespondenz ist elementarer Bestandteil der Systemkalibrierung vieler opto-mechatronischer Systeme. Die Hand-Auge-Korrespondenz stellt dabei die Koordinatentransformation zwischen Kamera und Endeffektor her. Zur Konditionierung des zugrundeliegenden Optimierungsproblems wird ein Kalibrierobjekt vor der Kamera positioniert und das System, wie in **Abb. 1** dargestellt, kinematisch angeregt. Positioniersysteme mit großem Bewegungsraum führen je-

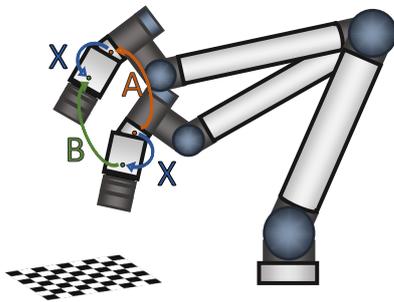


Abb. 1 Schematische Darstellung der Hand-Auge Korrespondenz. Die Hand-Auge-Korrespondenz ist die Transformation X zwischen dem Endeffektorkoordinatensystem und dem Kamerakoordinatensystem. Das Optimierungskriterium ergibt sich folgend zu $AX=XB$.

doch bei geringen Auslenkungen oder Rotationen dazu, dass das Kalibrierobjekt das Kamerasichtfeld verlässt. Da kinematische Kalibrierkörper nicht beliebig skalierbar sind wird im Rahmen dieser Studie ein neuartiges Kalibrierkonzept auf Basis der Identifikation eines kinematischen Netzes (Pose-Graph) bezüglich vieler kleiner Kalibrierkörper vorgestellt. Auf Grundlage der so ermittelten Kalibrierkörperposen erfolgt anschließend eine robuste Kalibrierung der Hand-Auge-Korrespondenz. Abschließend wird das Verfahren durch den Vergleich mit der konventionellen Hand-Auge Kalibrierung validiert.

2 Versuchsaufbau

Im zugrundeliegenden Anwendungsfall handelt es sich um einen Lasertriangulationssensor dessen Messkopf über eine Rotationsachse zur Messung des Innendurchmessers von großen zylindrischen Objekten positioniert werden kann. Der Innendurchmesser wird hierbei sequentiell in mehreren Rotationsschritten erfasst und anschließend zusammengesetzt. Hierfür muss die Achse über die verbaute Kamera kalibriert werden. Der Sensorkopf kann nur etwa 8° rotiert werden bevor die Ursprungsmarkierung des Kalibrierkörpers das Kamerabild verlässt. Eine vollständige Rotation kann nur eine Verkettung

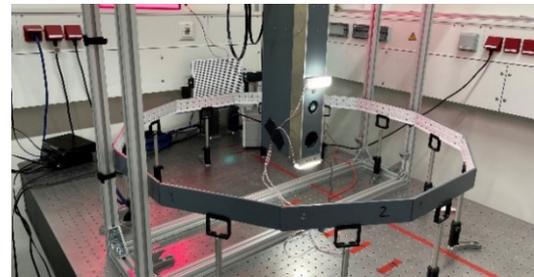


Abb. 2 Versuchsstand. Die Kamera des Lasertriangulationssensors ist inmitten der Musterplattenanordnung positioniert.

mehrerer Kalibrierkörper abgedeckt werden. Erreicht wird dies über eine Dodekagonanordnung von 240 Punktemustern auf 12 planaren Trägerplatten, wie in **Abb. 2** abgebildet. Der Koordinatenursprung ist auf jedem Muster ist durch drei Ringe gekennzeichnet. Darüber hinaus ist jedes Muster über Aruco-Marker [1] eindeutig identifizierbar. Mit der Rotationsachse werden 121 Positionen in 3° Schritten angefahren, so dass sich immer vier Muster in einem Bild befinden. Der Start- bzw. Endpunkt wird zweimal aufgenommen, um den Schluss der Transformationskette sicherzustellen. Die Kamera des Triangulationssensors wird mit einem lithographisch hergestellten Normal nach [2] kalibriert.

3 Pose-Graph Optimierung

Für jedes Muster werden die Bildpunkte aller Merkmale aus den aufgenommenen Bildern bestimmt. Damit kann die Lage jedes Musters in Bezug zum Kamerakoordinatensystem approximiert werden. Zwischen Mustern, die in einem Kamerabild zu sehen sind, kann über das Kamerakoordinatensystem eine Transformation ermittelt werden. Aufgrund der überschneidenden Aufnahmebereiche kann eine vollständige Verkettung der Einzelmuster realisiert werden. Die Bestimmung der Transformation basierend auf einer einzelnen Aufnahme ist durch die ge-

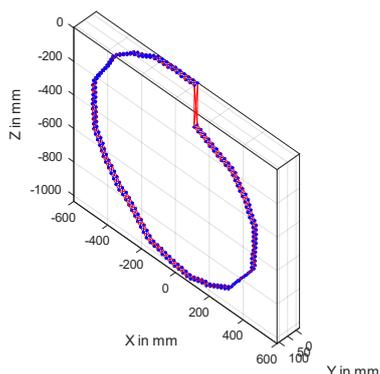


Abb. 3 Pose-Graph vor der Optimierung. In blau sind initialen Transformationen zwischen den Posen dargestellt. In Rot sind die zusätzlichen Transformationen, die Schleifenschlüsse dargestellt.

ringe Ausdehnung des Musters im Kamerabild mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Entlang der sequentiell aufgezeichneten Kette akkumuliert sich der Fehler und sorgt schließlich für eine hohe Abweichung am Schluss der Kette. Hier kann der Ansatz des Pose-Graph Optimierungsverfahrens [3] genutzt werden. Pose-Graph-Optimierung ist ein Verfahren aus der Robotik, mit dem die genaue räumliche Position und Ausrichtung eines Roboters basierend auf einer Abfolge von sensorbasierten Messungen optimiert wird. In dem vorgestellten Ansatz wird das g2o Netzwerk verwendet [4].

Übertragen auf den beschriebenen Versuchsaufbau stellt jedes Muster eine Pose, oder auch Knoten, im Pose-Graph dar. Die verbindenden Transformationen stellen die Kanten des Graphen dar. Sie sind mit einer Information über die Unsicherheit der zugrundeliegenden Messung versehen. Hier wird die Unsicherheit zwischen Mustern verschiedener Platten aufgrund des Rückprojektionsfehlers der Posenschätzung bestimmt. Die Transformationen auf einer Trägerplatte werden als planar angenommen und aus den 2D-Koordinaten der Muster abgeleitet. Die Unsicherheit wird dabei aus der Genauigkeit des Herstellungsverfahrens der Muster bestimmt. Zunächst werden die initialen Transformationen von benachbarten Posen als Kanten sequentiell hinzugefügt. Da in den Bildern der Kamera vier Muster erfasst werden, können auch weitere

Transformationen bestimmt und hinzugefügt werden. Hierbei ergeben sich bereits Schleifenschlüsse. Für die Optimierung des Graphen bedeutender sind jedoch die Schleifenschlüsse, die sich zwischen Beginn und Ende der Transformationskette ergeben. In **Abb. 3** ist der Pose-Graph vor der Optimierung graphisch dargestellt. Die große absolute Distanz zwischen der ersten und letzten Pose ist erkennbar. Die anschließend durchgeführte Pose-Graph Optimierung minimiert die Fehler zwischen den gen Posen, unter Berücksichtigung der Informationen aus der Unsicherheitsbetrachtung. In

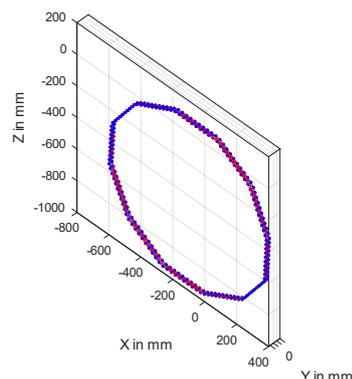


Abb. 4 Pose Graph nach der Optimierung.

Abb. 4 ist der optimierte Pose-Graph dargestellt. Die starke Distanz am Kettenschluss wurde reduziert und der Graph nimmt erkennbar eine Dodekadonanordnung ein. Es liegt somit ein virtueller Gesamtkalibrierkörper entlang des kompletten Rotationspfades vor, dessen Objektpunkte durch die Aruco-Marker identifiziert und durch die optimierten Posen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden können. Dieses Gesamtkalibriermuster kann anschließend für eine Hand-Auge-Kalibrierung des Systems genutzt werden.

Literatur

- [1] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas und M. J. Marín-Jiménez, „Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion,“ *Pattern Recognition*, Jg. 47, Nr. 6, S. 2280–2292, 2014, doi: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.
- [2] Z. Zhang, „A flexible new technique for camera calibration,“ *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Jg. 22, Nr. 11, S. 1330–1334, 2000.
- [3] G. Grisetti, R. Kummerle, C. Stachniss und W. Burgard, „A Tutorial on Graph-Based SLAM,“ *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, Jg. 2, Nr. 4, S. 31–43, 2010, doi: 10.1109/MITS.2010.939925.
- [4] R. Kummerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige und W. Burgard, „G²o: A general framework for graph optimization,“ in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, Mai. 2011 - Mai. 2011, S. 3607–3613, doi: 10.1109/ICRA.2011.5979949.