

Vergleich von Kalibrierstrategien für musterprojektionsbasierte optische 3D-Scanner

Christian Bräuer-Burchardt*, Peter Lutzke*, Stefan Heist*, Peter Kühmstedt*, Gunther Notni*/**

*Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena

**Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau

<mailto:christian.braeuer-burchardt@iof.fraunhofer.de>

Die Kalibriergüte optischer 3D-Scanner auf Musterprojektionsbasis ist entscheidend für ihre Messgenauigkeit. Zwei unterschiedliche Strategien werden verglichen und die Ergebnisse bezüglich Kalibrieraufwand, Handhabbarkeit und Messgenauigkeit sowie Ansätze für die Verringerung des im Allgemeinen hohen Aufwandes für eine qualitativ hochwertige Kalibrierung vorgestellt und diskutiert.

1 Einführung

Die dreidimensionale Oberflächenerfassung unterschiedlichster Messobjekte mittels optischer 3D-Scanner ist heutzutage eine etablierte Messmethode. Anwendungsgebiete sind unter anderen die Industrielle Qualitätssicherung, Rapid Prototyping, medizinische Diagnose, Kriminalistik, Archäologie und Paleontologie, sowie Kunst und digitale Kulturerbe-Bewahrung.

Optische 3D-Scanner besitzen teilweise ein hohes Messgenauigkeitspotenzial, das aber häufig nicht voll ausgeschöpft wird. Ursache hierfür sind manchmal ungenaue Kalibrierungen, die aufgrund des hohen Aufwandes häufig nicht optimal durchgeführt werden. Tatsächlich ist die Güte einer solchen Kalibrierung jedoch in entscheidendem Maße für die 3D-Messfähigkeit und -genauigkeit eines solchen Systems verantwortlich.

2 Kalibrierstrategien

Aus der Literatur sind viele unterschiedliche Strategien bekannt [1]. An dieser Stelle sollen zwei typische Verfahren inklusive entsprechender Softwaretools untersucht und verglichen werden.

Zunächst betrachten wir das Verfahren der Selbst-Kalibrierung mit virtuellen Passmarken unter Verwendung einer stationären (objektfesten) Kalibrierkamera [2] und Benutzung der kommerziell erhältlichen BINGO-Software [3]. Dieses Verfahren wird im Folgenden mit FixKam bezeichnet.

Als zweite Strategie haben wir die Passpunkt-Kalibrierung unter Verwendung ebener strukturierter Kalibriermuster (Schachbrettmuster), die auf das Verfahren von Zhang [4] zurückgeht, unter Nutzung des OpenCV-Software-Tools [5] verwendet und untersucht. Dieses Verfahren wird im Folgenden mit OCV bezeichnet.

Der Ablauf des ersten Verfahrens ist folgender: Eine beliebige Szene wird vom Projektor des 3D-Scanners aus unterschiedlichen Positionen mit

einer Folge von sinusförmigen und Gray-Code-Streifenmustern beleuchtet von den Kameras des 3D-Scanners beobachtet. Dabei erfasst die stationäre Kamera (Fixkamera), deren Pixel virtuelle Passmarken auf dem Objekt bilden, die vollständige Szene. Die Verknüpfung aller Einzelmessungen erfolgt durch Bündelblockausgleich [1]. Vorteile des Verfahrens sind, dass kein Matching und keine Marker auf dem Objekt, sowie keine hochgenauen Handlingsysteme erforderlich sind und eine einfache Prozessintegration möglich ist.

Das Kalibrierverfahren nach Zhang [4] erfordert viele Aufnahmen des Schachbrettmusters in unterschiedlichen Positionen bezüglich des Scanners. Die eindeutige Identifizierung der Eckpunkte der weißen und schwarzen Felder muss durch eine Software gewährleistet sein. Unter Verwendung der bekannten Kantenlänge werden die inneren und äußeren Kalibrierparameter mittels OpenCV-Software [5] ermittelt.

3 Evaluierung

Die Evaluierung der Kalibrierungen erfolgt durch ein neues Verfahren, welches Kenngrößen zur Gütebewertung aus 3D-Messungen extrahiert. Diese Kenngrößen orientieren sich an der VDI/VDE-Richtlinie 2634 für optische 3D-Messsysteme mit flächenhafter Antastung [6]. Das Verfahren ist in [7] genauer beschrieben und verwendet zur Messwertaufnahme zwei spezielle Prüfkörper, eine ebene Granitplatte und eine Kugelhantel. Die Kenngrößen beschreiben mittleres (σ_{mean}) und maximales (σ_{max}) Rauschen der 3D-Messpunkte, Ebenheitsabweichung (Δ_{Ebene}) und Längenmessabweichung ($\Delta_{Länge}$) des 3D-Scanners für ein definiertes Messvolumen und die konkrete Kalibrierung, die durch den Satz der Kalibrierparameter eindeutig beschrieben ist.

Die exakten Definitionen der Kenngrößen sind in [7] beschrieben.

4 Experimente und Ergebnisse

Für die Experimente wurde ein handgeführter mobiler 3D-Scanner mit einem Messvolumen von ca. 325 mm x 200 mm x 100 mm [8] verwendet. Die integrierte Projektionseinheit ermöglicht sowohl die Erzeugung sinusförmiger und Gray-Code Streifenmuster-Sequenzen als auch Folgen aperiodischer Sinusmuster. Die optionale Farbkamera des Scanners wurde hier nicht verwendet.

Die Experimente wurden folgendermaßen durchgeführt. Zunächst erfolgte die Kalibrierung nach den beiden beschriebenen Strategien (FixKam und OCV). Zur Reduzierung von Ausreißer-Effekten wurde jede Kalibrierung zweimal durchgeführt.

Zusätzlich erfolgte noch eine Passpunkt-Kalibrierung unter Verwendung eines Gittermusters (B-Grid) und des Schachbrettmusters (B-Schach), jeweils unter Verwendung der BINGO-Software.

Anschließend wurden die Prüfkörper (ebene Granitplatte und Kugelhantel) zur Ermittlung der Kenngrößen in verschiedenen Lagen im Messvolumen vermessen und unter Verwendung einer eigenen Software die Kenngrößen zur Evaluierung der Kalibrierungen ermittelt.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der jeweils ersten (von zwei) für jede der vier unterschiedlichen Kalibrierungen (FixKam, OCV, B-Grid, B-Schach). Im Fall der B-Grid-Kalibrierung wiesen beide Kalibrierungen unterschiedliche Ergebnisse auf (siehe Tab. 1), bei allen anderen nahezu identische (deshalb in Tab. 1 weggelassen).

Methode Kenngröße	FixKam	OCV	B-Grid	B-Schach
σ_{mean} [mm]	0,037	0,042	0,037	0,037
σ_{max} [mm]	0,052	0,049	0,052	0,052
Δ Länge [mm]	0,29	2,65	0,30 / 0,40	0,36
Δ Ebene [mm]	0,13	2,68	0,13 / 0,27	0,50

Tab. 1 Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Kalibrierungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kalibrierung (FixKam) mit stationärer Kamera und Verwendung der BINGO-Software die besten Ergebnisse aufweist, während die OCV die ungenaueste Kalibrierung liefert.

5 Diskussion

Der Vergleich der beiden Kalibrierstrategien zeigt, dass es signifikante Qualitätsunterschiede bei den 3D-Messungen geben kann. Ursachen hierfür werden einerseits in der genaueren Planung der Kalibrierszene (räumlich ausgedehnter Kalibrierkörper) und andererseits in der aufwändigeren

Verzeichnungskorrektur der BINGO-Software vermutet. Erfahrungswerte bei anderen OpenCV-Kalibrierungen lassen vermuten, dass hiermit auch bessere Ergebnisse erzielt werden können, wenn z.B. die Verzeichnung mit den vorhandenen Parametern ausreichend genau beschrieben werden kann. Sehr gute Ergebnisse treten aber eher zufällig ein. Durch den bisher immer noch sehr hohen Evaluierungsaufwand lassen sich diese Vermutungen quantitativ jedoch nicht eindeutig belegen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der beschriebenen Studie wurde ein quantitativer Vergleich der Güte unterschiedlicher Kalibrierstrategien für optische 3D-Scanner mit strukturierter Beleuchtung durchgeführt. Dazu wurden neue Kenngrößen verwendet, die die 3D-Messgenauigkeit charakterisieren. Die Ergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen dem verwendeten Verfahren (Kalibrieraufwand) und der Güte der Messergebnisse.

Ursache für ungenaue Kalibrierungen ist häufig die Unsicherheit der Bewertung. Zukünftige Arbeiten sollten daher auf die Automatisierung sowohl von aufwändigen Kalibrierverfahren als auch der Evaluierung der Kalibrierungen fokussiert werden.

Literatur

- [1] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, I. Harley, *Close range photogrammetry*, (Wiley Whittles Publishing 2006)
- [2] W. Schreiber, G. Notni, „Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection techniques“ in: *Opt. Eng.* 39, 159-169 (2000)
- [3] GIP, Dr. Kruck & Co. GbR, <http://bingo-atm.de/> (Zugriff 24.07.2017)
- [4] Z. Zhang, „A flexible new technique for camera calibration“ in: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11): 1330–1334 (2000)
- [5] Open Source Computer Vision Library (OpenCV), <http://opencv.org/> (Zugriff 24.07.2017)
- [6] VDI/VDE 2634, „Optische 3D-Messsysteme mit flächenhafter Antastung“ VDI/VDE-Richtlinien, Blatt 2 (2008)
- [7] C. Bräuer-Burchardt, S. Ölsner, P. Kühmstedt, G. Notni, G. „Comparison of calibration strategies for optical 3D scanners based on structured light projection using a new evaluation methodology“ in: *Proc. SPIE 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 103320F1-10 (2017)
- [8] C. Bräuer-Burchardt, R. Ramm, M. Sgrenzaroli, S. Crabbe, A. Hendrix, W. van Spanje, M. Lucas, M. Oberholzer, P. Kühmstedt, G. Notni, „Mobiler hochauflösender 3D-Handscanner für forensische Anwendungen“ in: *Tagungsband 18. Workshop 3D-NordOst 2015, Berlin*, 135-144 (2015)