

Sichtfäden - Ein neuer Ansatz zur generischen Kamerakalibrierung

Shishir Gauchan*, Jonas Bartsch*, Ralf B. Bergmann**

*BIAS-Bremer Institut für angewandte Strahltechnik, Klagenfurter Str.5, 28359 Bremen, Germany

**Universität Bremen, Fachbereich 01: Physik / Elektrotechnik, Otto Hahn Allee NW1, 28359 Bremen

mailto: gauchan@bias.de

Optische Messverfahren wie die Streifenprojektionstechnik und die Phasenmessende Deflektometrie nutzen Kameras als Bildsensoren zur 3D-Koordinatenmessung. In diesem Beitrag stellen wir eine neue Methode zur generischen Kamerakalibrierung vor, evaluieren diese Methode anhand simulativer Untersuchungen und vergleichen sie mit bekannten Kalibrierverfahren.

1 Einführung

Optische Messtechniken auf Basis inkohärenter strukturierter Beleuchtung, wie Streifenprojektion und Phasenmessender Deflektometrie (PMD), ermöglichen hochpräzise, schnelle und berührungslose 3D-Formfassung. Die metrische Beziehung zwischen den 2D-Aufnahmen von Kameras und einem 3D-Objekt erfordert die Kenntnis der Abbildungseigenschaften. Dementsprechend hängt die Messgenauigkeit unmittelbar von der Güte der Kamerakalibrierung ab, die daher eine wesentliche Rolle für die 3D-Formmessung spielt.

Weit verbreitet ist die Kalibrierung im photogrammetrischen Kameramodell, das insbesondere zur Beschreibung niederfrequenter symmetrischer Abbildungsverzeichnungen geeignet ist. Dagegen bieten Kalibrierverfahren auf Basis generischer Kameramodelle, wie die Sichtstrahlkalibrierung [1], den Vorteil der Modellfreiheit und ermöglichen es somit auch, asymmetrische und hochfrequente Abbildungsfehler zu berücksichtigen. Entsprechend sind generische Kamerakalibrierungen auch für den Einsatz von beispielsweise Weitwinkel- oder katadioptrischen Objektiven geeignet.

2 Sichtstrahlkalibrierung

Für die Sichtstrahlkalibrierung wird ein Flüssigkristalldisplay (LCD) als aktives Kalibrierobjekt verwendet. Es ermöglicht den Einsatz der Phasenschiebetechnik [2]. Dabei wird, unter Verwendung von Serienphasenverschobener Sinus-Streifenmuster, eine vollflächige Ortskodierung der Anzeigefläche realisiert, die für jeden Kamerapixel den korrespondierenden Pixel der Anzeigefläche liefert. Sind zu mehreren Phasenmessungen die zugehörigen relativen Posen des Kalibrierobjekts bekannt, lässt sich für jeden Kamerapixel ein unabhängiger Sichtstrahl bestimmen. Entsprechend liefert die Bestimmung der Posen und Parameter des Kalibrierobjekts das Ergebnis der Sichtstrahlkalibrierung.

Zur Durchführung der Sichtstrahlkalibrierung werden entsprechende Posenparameter des Kalibrierobjekts durch photogrammetrische Kalibrierung bestimmt und als Anfangswerte verwendet.

Das Problem der Bestimmung der optimalen Posenparameter wird als Bündelausgleichsproblem formuliert, bei dem es den Reprojektionsfehler zwischen beobachteten und vorhergesagten Aufpunkten zu minimiert gilt. Hierfür eignen sich numerische, nicht-lineare Optimierungsverfahren auf Basis der kleinsten Quadrate wie der Levenberg-Marquardt-Algorithmus oder das Trust-Region-Verfahren [1].

3 Sichtfädenkalibrierung

Wie auch bei der Sichtstrahlkalibrierung dienen die 3D-Koordinaten der Aufpunkte, die mit den Anfangswerten der Systemparameter ermittelt werden, als Kalibrierdaten. Wir definieren Sichtfäden als Liniensegmente, die alle Aufpunkte, die einem Kamerapixel zugeordnet sind, miteinander verbinden. Dies ist in Abb. 1 als blaue Linien dargestellt. In Folge der endlichen Genauigkeit der Anfangswerte aus der photogrammetrischen Kalibrierung sowie durch Phasenrauschen verfolgen die Sichtfäden einen unregelmäßigen zickzackförmigen Weg im Raum. Die Geometrie dieser Sichtfäden wird verwendet, um daraus Kräfte und Drehmomente zu definieren, die auf das Kalibrierobjekt in seinen angenommenen Posen wirken [3]. Diese werden genutzt, um das virtuelle Kalibrierungsobjekt zu verschieben bzw. zu rotieren. Diejenigen Posenparameter, für die die Unregelmäßigkeiten der Sichtfäden minimiert werden, entsprechen den optimalen Posenparametern. Bei diesem Ansatz ist zu beachten, dass entweder die vorderste oder hinterste Pose des Kalibrierobjekts nicht mittels Sichtfädenkalibrierung optimiert werden kann, da sich keine entsprechenden Kräfte definieren lassen. In den nachfolgend vorgestellten Simulationsergebnissen wurde die hinterste Pose daher von vornherein auf den wahren Wert gesetzt und als bekannt vorgegeben.

4 Ergebnisse

Als Maß für die Kollinearität aller Aufpunkte zu den jeweiligen Kamerapixeln dienen die 2-Normen der

mittleren Kraftvektoren zu den Posen des Kalibrierobjekts. Abb. 2 zeigt den Verlauf dieser Größen als Funktion der Anzahl der Iterationen des Sichtfäden-Optimierungsverfahrens. Es zeigt sich ein global konvergierendes Verhalten mit langsamer Konvergenzrate.

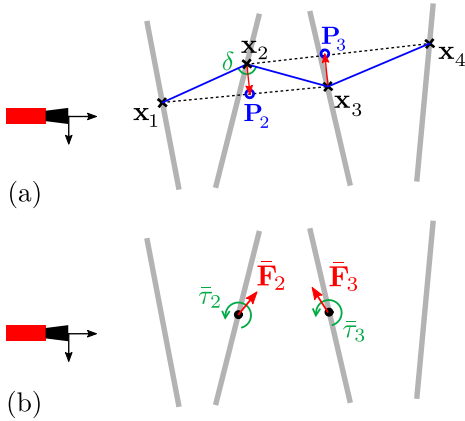


Fig. 1 (a) Bestimmung der Sichtfädenkräfte (rote Pfeile) für die Sichtfädenkalibrierung anhand der Aufpunkte (x_1, \dots, x_4) und des Winkels δ zwischen den Sichtfädensegmenten. (b) Der Betrag des Mittelwertes von der Kräfte \bar{F} und dem Drehmoment $\bar{\tau}$ wird zum Verschieben und Drehen des Kalibrierungsobjekts verwendet.

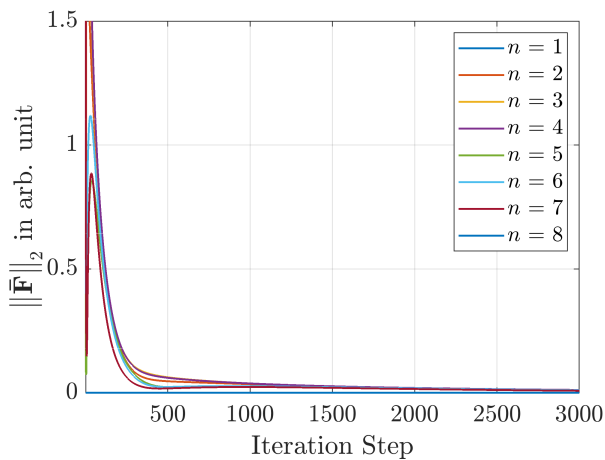


Fig. 2 Konvergenzverhalten der 2-Norm der mittleren Kraftvektoren $\|\bar{F}\|_2$ in Abhängigkeit von den Iterationsschritten. Der Index n bezeichnet die Nummerierung der Displayposen.

Um das neue Verfahren der Sichtfädenkalibrierung zu evaluieren, wurden Kalibriermessungen simuliert. Mit diesen Daten wurde die Kalibrierung der virtuellen Kamera sowohl mit einem photogrammetrischen Modell ohne Verzeichnungspolynome als auch mit der Sichtstrahlkalibrierung und der Sichtfädenkalibrierung durchgeführt. Anschließend erfolgte eine simulierte Streifenprojektionsmessung einer Kugel mit einem Radius von 300 mm. Die Auswertung erfolgte unter Verwendung der Kalibrierergebnisse dieser Verfahren hinsichtlich der re-

sultierenden Form des Testobjekts. Die Ergebnisse zeigt Tab. 1.

	Fitradius-abweichung (mm)	RMS-Wert der Formabweichung (μm)	Rechenzeit (s)
PHC	0.35	4.6	1
VRC	$2.8 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$	7
VTC	0.015	0.16	32

Tab. 1 Vergleich der Ergebnisse von photogrammetrischer Kalibrierung (PHC), Sichtstrahlkalibrierung (VRC) und Sichtfädenkalibrierung (VTC). Die Simulation wurde in MATLAB R2020 an einem PC mit Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz Prozessor und 16 GB RAM, ausgeführt.

Aus dem Vergleich der Werte in Tab. 1 geht hervor, dass die Sichtfädenkalibrierung zwar die Messgenauigkeit gegenüber dem Ergebnis photogrammetrischen Kalibrierung verbessert, allerdings sowohl ungenauer als auch langsamer ist als die Sichtstrahlkalibrierung.

5 Fazit

Die Sichtfädenkalibrierung ist eine neue Methode zur generischen Kamerakalibrierung. Unter der Annahme, dass die Parameter der Pose an einem Rand bekannt sind, liefert die Sichtfädenkalibrierung bessere Ergebnisse als die photogrammetrische Kalibrierung, allerdings auf Kosten einer höheren Rechenzeit. Da die Bestimmung der Pose-Parameter des Kalibrierungsobjekts am Rand bei der Sichtfädenkalibrierung zusätzliche Berechnungen erfordert, folgern wir, dass die Sichtstrahlkalibrierung die am besten geeignete Methode für die generische Kamerakalibrierung ist.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Forschungsarbeiten im Rahmen des Projekts KaSiFo (418992697).

References

- [1] Bartsch, J., Sperling, Y., Bergmann, R. B., "Efficient vision ray calibration of multi-camera systems," *Opt. Express* **29**(11), 17125–17139 (2021).
- [2] Zuo, C., Feng, S., Huang, L., Tao, T., Yin, W., Chen, Q., "Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review," *Optics and Lasers in Engineering* **109**, 23–59 (2018).
- [3] Gauchan, S., Bartsch, J., Bergmann, R. B., "Vision threads: a novel approach to generic camera calibration," in *Automated Visual Inspection and Machine Vision IV*, J. Beyerer and M. Heizmann, eds., vol. 11787, pp. 119 – 127, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2021).