

Optimierung des Kalibrierungs- und Messvorgangs eines topometrischen 3D-Messsystems

P. Berssenbrügge*, M. Dekiff*, G. Bischoff*, Z. Böröcz*, D. Dirksen*, G. von Bally*, C. Denz**

*Labor für Biophysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

**Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

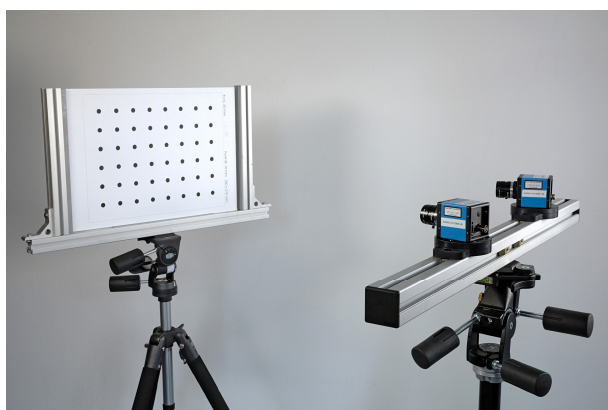
berssenbruegge@uni-muenster.de

Es wird der Einfluss verschiedener Parameter der Kalibrierung und Messung auf die Messgenauigkeit untersucht. Weiterhin gehen wir den Fragen nach, ob eine Selektion der Aufnahmen nach dem Reprojektionsfehler zweckmäßig ist und vergleichen zwei numerische Methoden zur Berechnung der Raumkoordinaten.

1 Einführung

Hinsichtlich der erreichbaren Messgenauigkeit optischer topometrischer Messverfahren, die auf fotogrammetrischen Grundlagen basieren, wie etwa der Streifenprojektionstechnik, spielt die präzise Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Abbildungsparameter eine besondere Rolle. Diese werden im Verlauf einer Kalibrierung mit numerischen Ausgleichsverfahren aus mehreren Aufnahmen eines Kalibrierobjektes ermittelt.

2 Der Messaufbau



Die untersuchte fotogrammetrische Komponente des Messsystems besteht aus zwei Schwarz-Weiß-CCD-Kameras mit digitaler Schnittstelle (IEEE 1394) und wird mit einem PC gesteuert.

Die Kalibrierung des Systems erfolgt mit einem von Zhang [1] vorgeschlagenen Algorithmus. Als Kalibrierobjekt dient dabei ein gedrucktes Muster kreisförmiger Zielmarken, das auf eine Glasplatte geklebt und mehrmals in verschiedenen Orientierungen aufgenommen wird. Als Resultat erhält man die Parameter des zugrunde liegenden (zentralperspektivischen) Abbildungsmodells [2] wie die Brennweite, die Lage der optischen Achse in der Bildebene, Korrekturterme für Verzeichnungen sowie einen Translationsvektor und eine Rotationsmatrix, die die Lage und die Orientierung der Kameras im Raum beschreiben.

3 Experimentelle Methoden

Als Messobjekte werden die gleichen Zielmarkentafeln verwendet wie bei der Kalibrierung. Die Identifizierung der Bildpunkte in den einzelnen Kamerabildern, die zu einem gemeinsamen Objektpunkt gehören, geschieht durch manuelle Auswahl der Zielmarken und mit Hilfe eines Ellipsenfitalgorithmus, der die Mittelpunkte der kreisförmigen Zielmarken bestimmt.

Um die Raumkoordinaten eines Objektpunktes i zu berechnen, wird ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem gelöst. Von jeder Kamera k stammen zwei Gleichungen, welche aus der folgenden Abbildungsgleichung in homogenen Koordinaten resultieren:

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ \lambda_k \end{pmatrix} = K_k R_k (E_3 | -C_k) \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Matrix K_k enthält die in der Kalibrierung bestimmten Parameter der inneren Orientierung; R_k ist die Rotationsmatrix und C_k der Translationsvektor. Es gibt also insgesamt von zwei Kameras vier Gleichungen bei drei Unbekannten.

Zur Quantifizierung der Messgenauigkeit werden die gemessenen Raumkoordinaten mit Referenzkoordinaten verglichen. Da die Koordinatensysteme der Referenz- und der gemessenen Koordinaten eine unterschiedliche räumliche Lage haben, ist ein „Matchen“ notwendig. Dabei wird die gemessene Punktwolke so im Raum verschoben und gedreht, dass die Summe über alle Abstände zu den Referenzpunkten minimal wird.

4 Ergebnisse

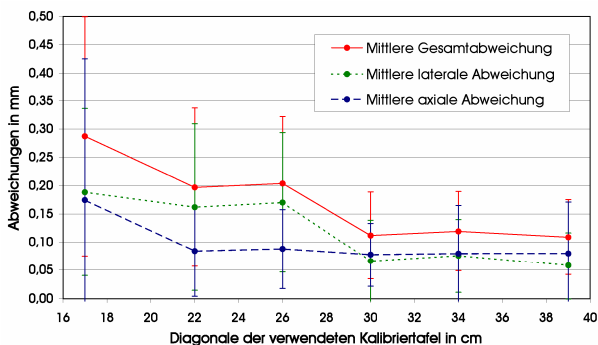
4.1 Vergleich zweier Verfahren zur Koordinatenberechnung

Es werden zwei verschiedene Methoden zur Lösung des Gleichungssystems (1) verwendet. Bei der ersten Methode wird das System mittels Singu-

lärwertzerlegung („Singular Value Decomposition“, SVD) gelöst. Bei der zweiten Methode werden die zwei Gleichungen, die von je einer Kamera stammen, separat gelöst und der Schnittpunkt (Ort des minimalen Abstands) der Bildstrahlen berechnet.

Beide Methoden liefern im Rahmen der Unsicherheit vergleichbar genaue Messwerte. Bei den weiteren Messungen wurde die erste Methode (SVD) verwendet.

4.2 Einfluss der relativen Größe der verwendeten Kalibriertafel im Bildfeld



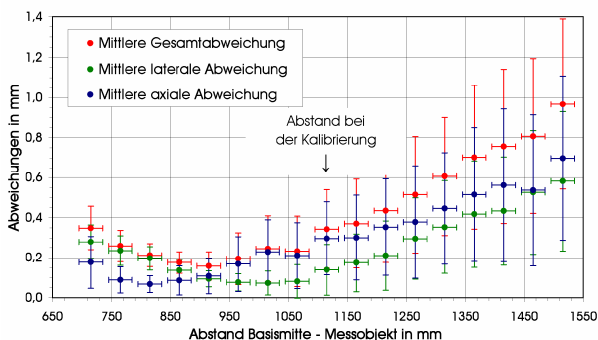
Das Messsystem wird mit unterschiedlich großen Kalibriertafeln kalibriert. Es zeigt sich, dass die Kalibriertafel das Bildfeld mindestens zu einem Drittel ausfüllen sollte.

4.3 Einfluss der Größe der Zielmarken

Es wird mit Zielmarken vom Durchmesser 5, 10 und 15 mm kalibriert und gemessen.

Die Messfehler sind beim Messen mit dem Zielmarkendurchmesser, mit dem auch kalibriert wurde, am kleinsten. Bei unterschiedlichem Durchmesser der Zielmarken beim Messen und Kalibrieren ist die Messgenauigkeit bei 10 mm um etwa ein Viertel höher.

4.4 Einfluss der Lage und Orientierung der Kalibriertafel bei der Kalibrierung in Bezug auf das spätere Messvolumen



Die Abbildung oben zeigt das Resultat einer Messreihe, bei der der Abstand des Messobjekts zu den Kameras variiert wird. Die Abweichungen durchlaufen ein Minimum bei einem Abstand, der geringer ist als der Abstand der Tafel bei der Kalibrierung. Das Minimum der axialen Abweichung liegt

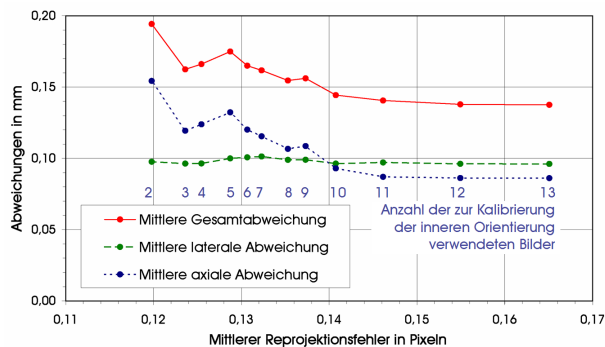
bei einem geringeren Abstand als das Minimum der lateralen Abweichung. Die Kalibrierung sollte also in einem größeren Abstand erfolgen als die Messung.

Unterschiedlich große Drehwinkel (15° bis 55°) der Kalibriertafel bei der Bestimmung der inneren Orientierung zeigen keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Systems.

4.5 Einfluss der Anzahl der zur Kalibrierung verwendeten Aufnahmen

Die Anzahl (≥ 2) der zur Bestimmung der inneren Orientierung verwendeten Bilder zeigt im Rahmen der Messunsicherheit keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Systems. Anzumerken ist, dass die Orientierungen der Kalibriertafel von Aufnahme zu Aufnahme nicht zu ähnlich sein dürfen, was besonders bei nur zwei Aufnahmen ins Gewicht fällt.

4.6 Selektion der Aufnahmen für die Kalibrierung nach dem Reprojektionsfehler



Es wird eine Kalibrierung der inneren Orientierung aus 13 Aufnahmen durchgeführt. Dann wird das Bild mit dem größten Reprojektionsfehler aussortiert und mit den verbleibenden Bildern erneut kalibriert. Dieser Vorgang wird bis zur Minimalanzahl von zwei Bildern für eine Kalibrierung wiederholt. Damit sinkt der mittlere Reprojektionsfehler mit der Anzahl der verwendeten Bilder. Mit jeder der so erhaltenen zwölf Kalibrierungen wird eine Messung durchgeführt. Es zeigt sich, dass dieses Verfahren kaum Auswirkung auf die laterale Abweichung hat, während die axiale Abweichung mit sinkendem Reprojektionsfehler bis zu einem Maximum bei 5 verwendeten Aufnahmen ansteigt. Daher ist ein Aussortieren der Bilder nach größtem Reprojektionsfehler bei der Kalibrierung nicht zweckmäßig.

Literatur

- [1] Z. Zhang: *A Flexible New Technique for Camera Calibration*, Technical Report MSR-TR-98-71, (Microsoft Research 1998)
- [2] K. Kraus: *Photogrammetrie*, (de Gruyter 2004)

Diese Arbeiten wurden finanziell unterstützt durch die Europäische Union im Rahmen des INTERREG-III-A-Programms sowie durch das IMF-Programm (Innovative Medizinische Forschung) der Medizinischen Fakultät der Universität Münster.