

Orientierung und Kalibrierung eines Rangesensors unter Nutzung geometrischer Objektinformation

Thomas Hau ¹

Abstract: In the field of reverse engineering the methods of stripe projection are predestined to record smooth homogeneous object surfaces. A disadvantage of these methods is the low level of accuracy. Photogrammetric techniques, on the other hand, offer highly accurate methods for orientation, calibration and object reconstruction. For a more efficient and accurate surface recording we propose a fusion of both techniques: photogrammetry and methods of stripe projection. This combination includes an automated orientation and calibration procedure for a stripe sensor which works according to the principle of coded light. The paper focusses on the automatic determination of approximate values and the structure of the calibration process.

1 Motivation

Die Fusion von Sensoren und Daten unterschiedlicher Fachdisziplinen hat sich aufgrund einer Vielzahl von Vorteilen zu einem probaten Mittel in der Photogrammetrie und im Computer Vision Bereich entwickelt. Im Bereich des Reverse Engineering werden häufig aktive und passive Sensorkomponenten zur Oberflächenabtastung miteinander kombiniert. Einer dieser Sensoren ist der nach dem Triangulationsprinzip arbeitende Streifenprojektionssensor, der in seiner Minimalkonfiguration aus einem aktiven Sensor, einem Streifenprojektor, und einem passiven Sensor, einer CCD-Kamera besteht. Unter Nutzung des Prinzips des Codierten Lichtansatzes (CLA) ist er in dieser Konfiguration Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Besonders effektiv gestaltet sich die Kombination photogrammetrischer Methoden mit Verfahren der Streifenprojektion zur Orientierung und Kalibrierung. Photogrammetrische Verfahren setzen häufig iterative Schätzverfahren ein, die aufgrund der meist nichtlinearen Fehlergleichungen Start- bzw. Näherungswerte der zu schätzenden Größen erfordern. Die Beschaffung dieser Werte wird in fast allen Publikationen zur Strukturierten Beleuchtung vernachlässigt, da häufig Trägersysteme und Schlittensysteme Näherungswerte für die Orientierungsparameter vorgeben. Nun sind diese Systemaufbauten unflexibel und kostenintensiv und somit nicht für jedermann verfügbar. Aus diesem Grund wird in dem vorliegenden Beitrag ein Verfahren zur Orientierung und Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors vorgestellt, das die freie Positionierung der Sensorkomponenten zulässt und eine flexible Handhabung des Sensors ermöglicht.

2 Prinzip des Codierten Lichtansatzes

Streifenprojektionssensoren werden häufig nach dem Verfahren des Codierten Lichtansatzes betrieben. Das Prinzip basiert auf einer Raum-Zeit-Codierung und lässt sich mit

¹Dipl.-Ing. Thomas Hau, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nußallee 15, 53115 Bonn, tel: +49-228-732900, fax: +49-228-732712, e-mail: hau@ipb.uni-bonn.de

Hilfe von Abbildung 1 erläutern: Der Streifenprojektor projiziert eine Sequenz von n Binärmustern auf die Objektoberfläche, die mit der gleichen Anzahl n Aufnahmen von der CCD-Kamera aufgenommen werden. Jedem projizierten Streifen des Projektors in seiner höchsten Auflösung läßt sich ein Codewort, der sogenannte Bit-Plane-Stack zuordnen. Für jedes Pixel des CCD-Bildes läßt sich aus den binarisierten Bildern der Sequenz ebenfalls das Codewort bestimmen. Aufgrund der Eindeutigkeit der Codierung läßt sich der Bezug der Projektionsstreifen zu den korrespondierenden Bildpixeln der CCD-Kamera herstellen. Mit Hilfe der Orientierungs- und Kalibrierungsparameter wird über einen Schnitt der von einem projizierten Streifen aufgespannten Lichtebene mit dem Abbildungsstrahl des CCD-Punktes der dreidimensionale Oberflächenpunkt berechnet. Zur Steigerung der Auflösung am Objekt wird das Verfahren des Codierten Lichtansatzes mit dem Phasen-Shift-Verfahren kombiniert. Dabei wird jeder Streifen der höchsten Auflösung mit Hilfe eines intensitätsmodulierten, cosinusförmigen Signals dargestellt (Strutz 1993).

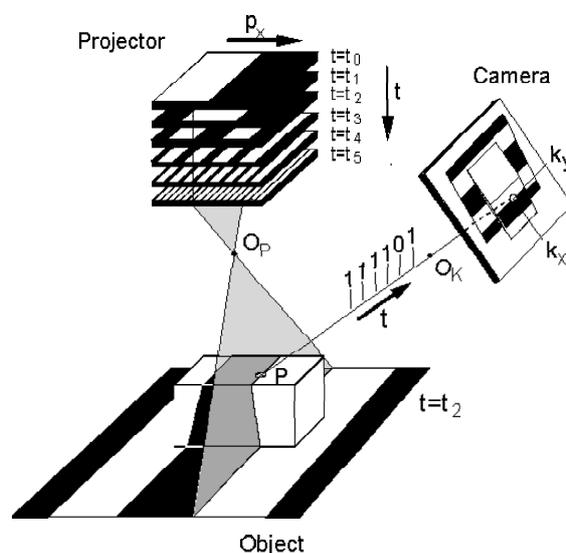


Abbildung 1: Prinzip des Codierten Lichtansatzes

3 Kalibrierung des Sensorkopfes

Die CCD-Kamera wird in einer Vorabkalibrierung kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt testfeldbasiert (Wester-Ebbinghaus 1983; Abraham und Hau 1997). Das Ergebnis der Kalibrierung wird bei der Orientierung und Kalibrierung des Gesamtsensors als bekannt vorausgesetzt.

In Abschnitt 3.1 wird die Vorgehensweise zur Ableitung von Bildkoordinaten zur Näherungsorientierung des Sensors dargestellt. Abschnitt 3.2 beschreibt die Ableitung der relativen Orientierung ohne Startwerte und in Abschnitt 3.3 wird die Kalibrierstrategie erläutert.

3.1 Ableitung der Bildkoordinaten zur Näherungswertbestimmung für die relative Orientierung

Aus der Projektion einer Streifenmustersequenz müssen Beobachtungen zur Bestimmung von Näherungswerten für die Orientierung und Kalibrierung des Sensors abgeleitet werden. Problematisch ist, daß nach Installation der Sensorkomponenten keine Orientierungs- und Kalibrierungsparameter vorliegen und die zweiten Bildkoordinatenkomponenten des Projektors nicht bestimmt werden können. Für eine erste Näherung werden daher die Eckpunkte der Streifensegmente eines in unterschiedliche Ebenen projizierten Streifenmusters als Punktbeobachtungen genutzt. Das raum-zeit-codierte Muster wird in zwei Ebenen unterschiedlicher Höhe projiziert und von der Kamera aufgenommen (Abbildung 2), da zur Bestimmung der Orientierungsparameter ohne Startwerte und ohne a priori Wissen räumlich verteilte Punkte notwendig sind.

Zur Ableitung von Bildkoordinaten wird jeweils eine beliebige Aufnahme der beiden Sequenzen binarisiert. Durch Elimination der in einem Segment liegenden Punkte erhält man eine Umringslinie für jedes Segment. Eine Skelettierung der Randlinie liefert eine 1 Pixel dicke Umrangungslinie. Nach einer Vektor-Raster-Konvertierung werden die Umringspolygone auf die vier eindeutigen Eckpunkte reduziert. Diese Ausdünnung erfolgt über eine Prüfung der Pfeilhöhen dreier aufeinander folgender Punkte (Weidner 1997). In den Mitten der kürzeren Polygonseiten werden im Originalbild mit einem Kantensfilter die Endkanten der Segmente detektiert. Ausgehend von diesen Segmentendpunkten werden die oberen und unteren Segmenteckpunkte (Abbildung 3) durch den Schnitt der horizontalen und vertikalen Kantengeraden gefunden. Näherungswerte der jeweiligen Kantengeraden werden mit Hilfe des Least-Median-Squares (LMS) Schätzers bestimmt (Kim et al. 1989). Mit Hilfe der gefundenen Geradenparameter werden diejenigen Punkte aussortiert, deren Abstand einen gewissen Schwellwert übersteigen. Mit den verbleibenden Punkten wird eine lineare Regression gerechnet. Die Zuordnung der gefundenen Segmenteckpunkte (siehe Abbildung 3) zu den Bildkoordinaten des Projektors erfolgt mit Hilfe der Codierung.

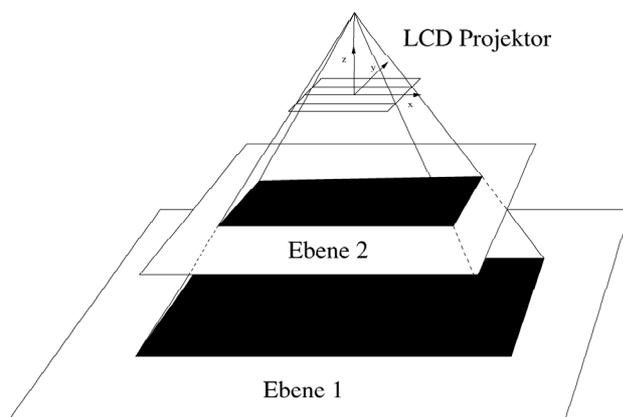


Abbildung 2: Projektion des Musters in zwei Ebenen zur Kalibrierung

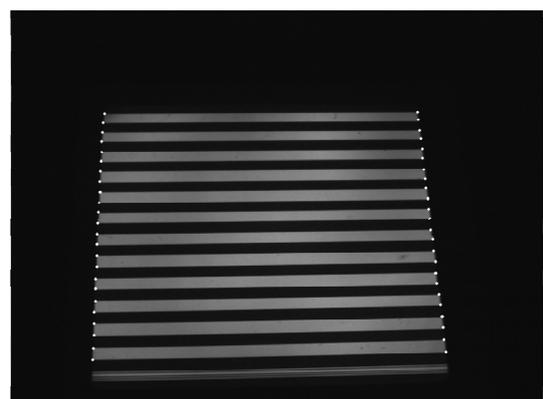


Abbildung 3: Eckpunkte der Streifensegmente mit Subpixelgenauigkeit

3.2 Bestimmung der Parameter der relativen Orientierung als Startwerte für die Kalibrierung

Die Bestimmung der relativen Orientierung ist in zwei Teilabschnitte unterteilt. Im ersten werden Startwerte für die im zweiten Teil eingesetzte iterative Schätzung der relativen Orientierung abgeleitet.

Die Nutzung der essentiellen Matrix (E-Matrix) oder Korrelationsmatrix zur relativen Orientierung (Thompson 1959) geht aus der Koplanaritätsbedingung

$$[\mathbf{m}'_i \mathbf{b} \mathbf{R} \mathbf{m}''_i] = 0 \quad (1)$$

hervor:

$$\mathbf{m}'_i{}^T \mathbf{E} \mathbf{m}''_i = 0 \quad (2)$$

worin \mathbf{m}'_i und \mathbf{m}''_i die homogenen Koordinaten $\mathbf{m}'_i = (u'_i, v'_i, 1)$ und $\mathbf{m}''_i = (u''_i, v''_i, 1)$ homologer Bildpunkte in den zwei Bildern sind. Der Vektor \mathbf{b} stellt den Basisvektor und \mathbf{R} die Rotation zwischen beiden Bildern dar. Die essentielle Matrix \mathbf{E} definiert demnach die relative Lage der Bilder zueinander unter Nutzung der inneren Geometrie der Sensoren. Die innere Orientierung der Kamera ist aus der Vorabkalibrierung bekannt und für den Projektor werden plausible Annahmen getroffen.

Gleichung 2 stellt ein lineares Gleichungssystem dar, das mit Hilfe von mindestens acht homologen Punkten gelöst werden kann, da die Matrix \mathbf{E} den Rang 2 besitzt. Die acht Parameter werden mittels eines linearen Gleichungssystems $\mathbf{A} \mathbf{e} = 0$ bestimmt, wobei der Vektor \mathbf{e} die Parameter der Matrix \mathbf{E} enthält und die Matrix \mathbf{A} die Koeffizienten der Gleichung

$$u'_i u''_i e_{11} + u'_i v''_i e_{21} + u'_i e_{31} + v'_i u''_i e_{12} + v'_i v''_i e_{22} + v'_i e_{32} + u''_i e_{13} + v''_i e_{23} + 1 = 0 \quad (3)$$

eines jeden Punktpaares korrespondierender Punkte enthält (Hartley 1995). Aus den Komponenten der Matrix \mathbf{E} lassen sich nun die Parameter der relativen Orientierung direkt bestimmen (Weng et al. 1989).

Die Basiskomponenten \mathbf{b} erhält man über den Eigenvektor des kleinsten Eigenwertes von $\mathbf{E}\mathbf{E}^T$. Es gilt:

$$\mathbf{E}\mathbf{E}^T = (\mathbf{S}_b \mathbf{R})(\mathbf{R}^T \mathbf{S}_b^T) = \mathbf{S}_b \mathbf{S}_b^T = -\mathbf{S}_b^2 \quad (4)$$

wobei \mathbf{S}_b die schiefsymmetrische Matrix der Basiselemente darstellt.

Aus der Darstellung $\mathbf{E} = \mathbf{S}_b \mathbf{R}$ erhält man zur Lösung des Rotationsproblems die Minimierungsaufgabe

$$\| \mathbf{R}^T \mathbf{S}_b^T - \mathbf{E}^T \| \rightarrow \min \quad \text{bzw.} \quad \| \mathbf{R} \mathbf{C} - \mathbf{D} \| \rightarrow \min \quad (5)$$

mit $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \mathbf{c}_3]$ und $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3]$. Eine direkte Lösung für die Rotationsparameter erhält man mit einer 4x4 Matrix \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_i, \quad \text{mit} \quad \mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} 0 & (\mathbf{c}_i - \mathbf{d}_i)^T \\ \mathbf{d}_i - \mathbf{c}_i & \mathbf{S}_{(\mathbf{d}_i + \mathbf{c}_i)} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

\mathbf{S} gibt wiederum eine schiefsymmetrische Matrix an. Die Parameter der Rotationsmatrix, repräsentiert in einer Quaternionendarstellung, erhält man dann durch den Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert der Matrix \mathbf{B} .

Mit dieser Näherungslösung werden nun in einer kleinste Quadrateschätzung in Form des Gauß-Markoff-Modells mit Restriktionen die Parameter der relativen Orientierung basierend auf dem Ansatz der Kollinearitätsgleichung bestimmt:

$$E(\Delta \mathbf{y}) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad \text{mit} \quad \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{w}_c \quad (7)$$

$$\text{und} \quad D(\Delta \mathbf{y}) = \sigma_0 \mathbf{Q}_{yy} = \mathbf{C}_{yy} \quad (8)$$

wobei:

- $\Delta \mathbf{y}$ den $n \times 1$ großen Zuschlagsvektor der Beobachtungen im linearen Modell,
- \mathbf{A} die Koeffizientenmatrix (Designmatrix),
- $\Delta \mathbf{x}$ den $u \times 1$ großen Vektor der unbekannt Parameterzuschläge und
- \mathbf{C}_{yy} die Varianz-/Kovarianzmatrix der Beobachtungen bedeutet.
- \mathbf{Q}_{yy} stellt die Gewichtsreziprokenmatrix dar.
- σ_0 ist die a priori Varianz der Gewichtseinheit,
- n gibt die Anzahl der Beobachtungen an, u die Anzahl der unbekannt Parameter.
- Die Matrix \mathbf{H} ist die $h \times u$ große Koeffizientenmatrix der Restriktionen, wobei h die Anzahl der Restriktionen angibt und
- der Vektor $\Delta \mathbf{w}_c$ die Zuschläge der Absolutwerte der Restriktion enthält.

Lediglich die Parameter der äußeren Orientierung der CCD-Kamera werden geschätzt. Da die relative Orientierung nur aus fünf Parametern besteht, ist in die Ausgleichung eine Restriktion für die Basislänge einzuführen.

3.3 Kalibrierung des Streifenprojektionssensors

Nun lassen sich bei der Abtastung eines Objekts mit Hilfe der Streifenprojektion von unterschiedlichen Standpunkten aus keine korrespondierenden Punkte ausmachen. Die Korrespondenzen bestehen nur zwischen dem Projektor und der Kamera auf dem jeweiligen Standpunkt. Redundante Beobachtungen durch die Aufnahme von unterschiedlichen Standpunkten aus sind somit nicht erzielbar. Daher kommt man im Gegensatz zu den Kamerakalibrierverfahren ohne einen a priori bekannten Kalibrierkörper nicht aus. Es wurde daher ein Kalibrierkörper, der in Abbildung 4 dargestellt ist, mit einer Bildsequenz abgetastet.

Für jedes Pixel des CCD-Bildes werden mittels Epipolargeometrie und Codierung die korrespondierenden Bildkoordinaten des Projektors bestimmt. Der Schnitt des Abbildungsstrahls mit der vom Projektor aufgespannten Ebene liefert die 3D-Koordinate des Oberflächenpunktes. Als Orientierungsparameter werden die geschätzten Parameter der relativen Orientierung genutzt.

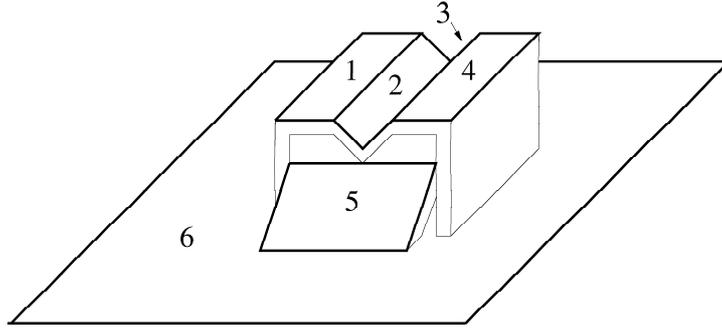


Abbildung 4: Parametrisierter Kalibrierkörper

Um die Parameter des bekannten Kalibrierkörpers in die Ausgleichung einführen zu können, werden die Orientierungsparameter zwischen dem Koordinatensystem der relativen Orientierung und dem Kalibrierkörpersystem mittels einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation bestimmt. Die Orientierungsparameter beider Sensorkomponenten und auch die 3D-Oberflächenpunkte aus der Streifenprojektionsauswertung werden ins Kalibrierkörpersystem transformiert. Sie dienen als Startwerte für die Ausgleichung.

Da bei der Schätzung der relativen Orientierung die Abweichungen von der strengen Zentralprojektion vernachlässigt wurden, sind die Orientierungsparameter nicht optimal, so daß für die Beobachtungen des LCD-Projektors entsprechende Varianzen/Kovarianzen \mathbf{C}_{yy} in der Ausgleichung einzuführen sind. Die Ausgleichung wird wiederum mit Hilfe des Gauß-Markoff-Modells mit Restriktionen (Gl. 8) vorgenommen. Als Restriktionen werden die Bedingungen, daß die Oberflächenpunkte in den entsprechenden Ebenen des Kalibrierkörpers liegen, formuliert:

$$a_j x_i + b_j y_i + c_j z_i + d_j = 0 \quad (9)$$

wobei die Parameter a_j, b_j, c_j und d_j die j -te Ebene des Kalibrierkörpers repräsentieren und x_i, y_i, z_i den i -ten Oberflächenpunkt darstellen.

In dieser Konfiguration werden nun die Parameter der äußeren und inneren Orientierungen geschätzt. Problematisch ist die Tatsache, daß aufgrund nur zweier Sensorkomponenten keine hohe Redundanz bei den Beobachtungen im Normalgleichungssystem zu erzielen ist und somit die Ausgleichung relativ instabil wird. Es ist somit erforderlich zu prüfen, welche Parameter mit vorgegebener Aufnahmekonfiguration überhaupt schätzbar sind. Dies kann mit Hilfe fiktiver Beobachtungen geprüft werden (Förstner 1980). Parameter, deren Schätzbarkeit fraglich ist und die die Kondition des Normalgleichungssystems negativ beeinflussen, werden als beobachtete Größen in Form gewichteter Parameter in die Ausgleichung eingeführt. Adäquate Werte für diese Parameter werden aus älteren Schätzungen oder heuristisch abgeleitet. Mit Hilfe des Grenzwertes

$$\nabla_0 x_i = \sigma_{x_i} \delta_0 \sqrt{\frac{1 - r_i}{r_i}}. \quad (10)$$

läßt sich eine Aussage darüber machen, ob der jeweilige Parameter bestimmbar ist oder

nicht. Die Größen r_i stellen die Redundanzanteile der gewichteten Parameter dar, die Größen σ_{x_i} die a priori Standardabweichungen der geschätzten Parameter. δ_0 ist der Nichtzentralitätsparameter, der von einem vorgegebenen Signifikanzniveau $(1-\alpha_0)$ und der Wahrscheinlichkeiten β_0 abhängig ist. Parameter, deren Absolutbetrag nun unterhalb des Grenzwertes liegen, können mit dem vorgegebenen Signifikanzniveau $(1-\alpha_0)$ und der Wahrscheinlichkeiten β_0 nicht nachgewiesen werden. Sie sind somit nicht schätzbar. Werte für den Nichtzentralitätsparameter δ_0 lassen sich z.B. Förstner (1979) entnehmen.

4 Ergebnisevaluierung

Als Ergebnis der Kalibrierung lassen sich sicherlich die geschätzten Parameter der äußeren und inneren Orientierung interpretieren, die jedoch keine Aussage über die Genauigkeit im dreidimensionalen Raum ermöglichen. In der industriellen Praxis werden daher Prüfkörper zum Nachweis der Genauigkeit im Meßvolumen herangezogen. Ein Vergleich der Körpergeometrie mit den Parametern, die aus den Messungen des Prüfkörpers abgeleitet werden, zeigt das Verhalten des Sensors im Meßvolumen. Das für die Kalibrierung gewählte Meßvolumen betrug etwa $500 \times 500 \times 300 \text{mm}^3$. Zur Prüfung standen keine hochgenauen Prüfkörper zur Verfügung, so daß zum einen erneut der Kalibrierkörper (Abbildung 4) aufgenommen wurde und als zweites Objekt eine Ebene verwendet wurde.

Das Ergebnis des Vergleichs der Geometrieparameter kann als äußere Genauigkeit interpretiert werden. Sie ist zu unterscheiden von der inneren Genauigkeit, die durch die Streuung σ_{\perp} der senkrechten Abstände der Meßpunkte von der ausgleichenden Fläche des Prüfkörpers repräsentiert wird.

Die Geometrieparameter des Kalibrierkörpers in Form der Ebenenparameter können nach Ausgleichung der Punkte entsprechender Ebenen miteinander in Bezug gesetzt werden. Mit der in Gleichung 9 dargestellten Parametrisierung der Testkörperebenen wurden die Abstände der Ebenen vom Ursprung (Parameter d_i) miteinander verglichen. Die Differenz der Abstandsparameter (d_i) der Ebenen zu ihren Sollabständen betragen bis zu 3.4mm . Um die übrigen Ebenenparameter miteinander vergleichen zu können wurden die Winkel zwischen den Sollebenennormalen und den abgeleiteten Ebenennormalen berechnet. Die Differenzen wiesen Winkel bis zu 1.3gon auf. Die innere Genauigkeit, repräsentiert durch die Standardabweichung der mittleren senkrechten Abstände von der Ausgleichsfläche σ_{\perp} , lag beim Ebenenprüfkörper und bei den Ebenen des Kalibrierkörpers zwischen 0.05mm und 0.3mm .

Die Ergebnisse zeigen, daß die innere Genauigkeit repräsentiert durch die Streuung σ_{\perp} der Punktabstände relativ gut ausfällt. So lassen sich Relativgenauigkeiten von etwa $1 : 2500$ basierend auf der Streuung σ_{\perp} und der Meßvolumendiagonale erzielen. Die äußere Genauigkeit läßt sich durch die unzureichende Geometrie des Kalibrierkörpers zur Orientierung und Kalibrierung begründen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Verfahren zur Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors vorgestellt, das auf der Kombination von Verfahren der Streifenprojektion mit photogrammetrischen Verfahren beruht. Die Kalibrierung ist bis auf den Aufnahmevorgang und die Zuordnung der Punkte zu den Flächen des Kalibrierkörpers für die Ausgleichung im Gauß-Markoff-Modell vollautomatisiert und somit flexibel zu handhaben. Die Näherungswertbestimmung arbeitet sehr robust und zuverlässig. Die innere Genauigkeit der dreidimensionalen Abtastung reicht mit der Relativgenauigkeit von 1 : 2500 an die Genauigkeiten anderer Veröffentlichungen heran. Für den industriellen Einsatz ist sie jedoch noch nicht zufriedenstellend. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß kein Kalibrierkörper mit übergeordneter Genauigkeit genutzt werden konnte, so daß Modelldeformationen zu erwarten waren. Auch die Struktur des Körpers ist nicht ausreichend für eine hochgenaue Orientierung und Kalibrierung. Ein Kalibrierkörper, der ähnlich den Testfeldern zur Kamcrakalibrierung (Abraham und Hau 1997) aufgebaut ist und der statt kreisrunder Marken Kugeln besitzt, weist sicherlich eine stabilere Netzgeometrie für die Kalibrierung auf.

Literatur

- Abraham, S. und T. Hau (1997). Towards autonomous high-precision calibration of digital camcras. In S. El-Hakim (Ed.), *Videometrics V*, Seiten 82–93. SPIE, Vol. 3174.
- Förstner, W. (1979). Das Programm TRINA zur Ausgleichung und Gütebeurteilung geodätischer Lagenetze. *Zeitschrift für das Vermessungswesen*, 61–72.
- Förstner, W. (1980). Zur Prüfung zusätzlicher Parameter in Ausgleichungen. *Zeitschrift für das Vermessungswesen*, 510–519.
- Hartley, R. I. (1995). In defence of the 8-point algorithm. In *5th International Conference on Computer Vision*, Seiten 1064–1070.
- Kim, D. Y., J. J. Kim, P. Meer, D. Mintz und A. Rosenfeld (1989). Robust computer vision: A least median of squares based approach. In *DARPA Image understanding workshop*, Seiten 1117–1134.
- Strutz, T. (1993). *Ein genaues aktives optisches Triangulationsverfahren zur Oberflächenvermessung*. Technische Universität zu Magdeburg.
- Thompson, E. H. (1959). A rational algebraic formulation of the problem of relative orientation. *Photogrammetric Record* 3(14), 152–159.
- Weidner, U. (1997). *Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen*. DGK Reihe C, Band 474.
- Weng, J., T. S. Huang und N. Ahuja (1989). Motion and structure from two perspective views: Algorithms, error analysis, and error estimation. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence* II(5), 451–476.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1983). *Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung - ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern*. DGK, Reihe C, Nr. 289. Universität Bonn.