

Modellbasierte Kalibrierung von Streifenprojektionssystemen mit telezentrischer Kamera

Model Based Calibration of Fringe Projection Systems Using a Telecentric Camera

Klaus Haskamp, Markus Kästner, Eduard Reithmeier, Leibniz Universität Hannover

Zusammenfassung Für die Messung von Bauteilgeometrien mittels Streifenprojektionstechnik ist es zunächst notwendig, eine Kalibrierung des Sensors vorzunehmen, um das Sensorverhalten über Blackbox- oder physikalisch-mathematische Modelle zu charakterisieren. In diesem Artikel erfolgt zunächst eine Beschreibung des Modells des Streifenprojektionssystems auf Basis der projektiven Geometrie, wobei die objektseitige Telezentrie des Kameraobjektivs berücksichtigt wird. Anschließend wird eine Kalibrierstrategie zur Ermittlung aller modellierten Systemparameter vorgestellt. Das so ermittelte Sensormodell soll als numerische Simulation im Rechner umgesetzt und in Verbindung mit Monte-Carlo-Methoden zur Unsicherheitsanalyse verwendet werden. Es ist geplant, mit Hilfe dieser Simulation den Einfluss der einzelnen Systemparameter hinsichtlich der Messgenauigkeit näher zu untersuchen.

►►► Summary For the measurement of components geometries using fringe projection the sensor has to be calibrated. After the calibration procedure the sensor behaviour is described through a blackbox- or a physical model. This article describes first the model of the fringe projection system by means of the projective geometry in detail, with taking into account the object-sided telecentricity of the camera lens. Afterwards the calibration strategy for the identification of all system parameters is presented. The sensor model identified will be implemented as a numerical simulation into a computer program. Furthermore the simulation is combined with Monte-Carlo-methods to calculate measurement uncertainties. The simulation is planned to be used for the influence-analysis of the system parameters onto the overall measurement uncertainty of the system.

Schlagwörter Streifenprojektion, Modellierung, Kalibrierung, telezentrische Kamera ►►► **Keywords** Fringe projection system, modelling, calibration, telecentric camera

1 Einleitung

Mit den stetig steigenden Anforderungen an Werkstücke, wie Rauheiten im Submikrometerbereich oder Formabweichungen von wenigen Mikrometern, wachsen auch die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Messgeräte, um die Bauteile hinsichtlich der vorgegebenen Toleranzen prüfen zu können. Damit der Qualitätsnachweis mit Hilfe der Messgeräte durchgeführt werden kann, müssen die Messunsicherheiten der eingesetzten Sensoren um ein Vielfaches geringer sein als die zu prüfenden Bauteiltoleranzen. Für die flächenhafte Messung von Bauteilgeometrien hat sich der Einsatz moderner

Streifenprojektionssensoren aufgrund der hohen Informationsdichte (10^6 Punkte) und der kurzen Messzeiten etabliert.

Das mathematische Abbild des Streifenprojektionssensors und die verwendete Kalibrierstrategie nehmen, neben den physikalischen Komponenten wie Optiken oder Lichtquellen, einen wesentlichen Einfluss auf die zu erreichende Messunsicherheit. Die Erweiterung bestehender Modelle um zusätzliche Systemparameter ermöglicht eine immer bessere Beschreibung der Realität und kann in Kombination mit einer an das Modell angepassten Kalibrierstrategie einen wesentlichen Beitrag zur Ver-

ringerung der Messunsicherheit liefern. Aufgrund der höheren Komplexität des Modells wächst auch der Zeit- und Rechenaufwand der Kalibrierstrategie, um alle Systemparameter mit einer ausreichenden Genauigkeit bestimmen zu können. Nach dem Identifizierungsprozess besteht die Möglichkeit, das mathematische Abbild des Sensors zur Abschätzung der Beiträge der Systemkomponenten zur Messunsicherheit einzusetzen. Mit Hilfe des virtuellen Messsystems besteht zudem die Möglichkeit, zeitoptimierte Messstrategien zu entwickeln.

Üblicherweise werden die Kamera und der Projektor des Streifenprojektionssystems über ein Pinholemodell beschrieben und die Parameter über eine zweistufige Kalibrierstrategie nach Tsai ermittelt [1–3]. In unserem Fall weist das Kameraobjektiv eine objektseitige Telezentrie auf. Um mit den gängigen Kalibriermethoden die Systemparameter ermitteln zu können, müsste die Telezentrie durch ein weit entferntes Pinhole nachgebildet werden, was zu Modellgenauigkeiten führt. Zur Vermeidung von Modellierungsfehlern wurde die Telezentrie des Kameraobjektivs nicht mit einem Pinhole nachgebildet, sondern als solche berücksichtigt, um ein möglichst realitätsnahes Abbild des Sensors zu schaffen. Damit ergibt sich die Problemstellung, dass eine neue Kalibrierstrategie entwickelt werden muss, um alle Systemparameter mit einer ausreichenden Genauigkeit identifizieren zu können.

In diesem Beitrag wird ein virtuelles Streifenprojektionssystem auf Basis einer numerischen Computersimulation vorgestellt. Im Vordergrund steht dabei der Abgleich des virtuellen Systems mit dem realen System. Dabei wird zunächst auf die mathematische Modellierung ein-

gegangen. Anschließend werden die Besonderheiten des Versuchsstands und die einzelnen Schritte des Kalibrierverfahrens beschrieben.

2 Modellierung der Systemkomponenten

Ein Streifenprojektionssystem besteht im Wesentlichen aus einer Kamera- und einer Projektionseinheit. Mathematisch lassen sich Kameras über die projektive Geometrie beschreiben [4; 5]. Diese Form der Darstellung liefert eine kompakte Beschreibung von Transformationen und Abbildungen von Systemen, die auf der geometrischen Optik basieren. Bei der Modellierung von Projektoren kann ähnlich wie bei der Kamera vorgegangen werden, da der Projektor auch als inverse Kamera betrachtet werden kann [3].

Im diesem Kapitel soll der Aufbau der Komponenten Kamera und Projektor beschrieben werden, um alle verwendeten Modellparameter vorzustellen. Hierbei wird insbesondere die objektseitige Telezentrie der Kamera berücksichtigt.

2.1 Mathematisches Modell der Kamera

Die Beschreibung der Abbildung eines 3D-Punktes $X = [x, y, z, 1]^T$ auf einen 2D-Bildpunkt $\eta = [i, j, 1]^T$ erfolgt in homogenen Koordinaten. Für die weiteren Betrachtungen ist es zweckmäßig, ein globales Koordinatensystem zu definieren. Das Koordinatensystem wird als Objektkoordinatensystem KS_{Obj} bezeichnet und stellt ein Bezugssystem dar, das sich in Anlehnung an [6] in der Mitte des Messvolumens befindet (siehe Bild 1). Um die Zugehörigkeit der Punkte zu den jeweiligen Koordinatensystemen kenntlich zu machen, wird den Vektoren

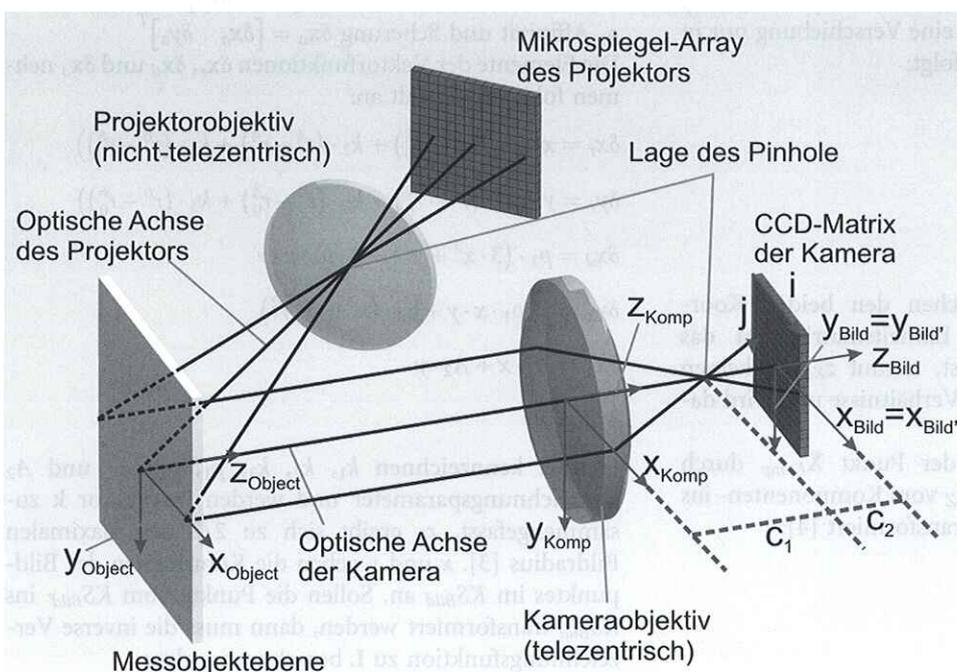


Bild 1 Modell des Streifenprojektionssystems.

die Bezeichnung des Koordinatensystems als Index nachgestellt.

Im ersten Schritt wird der Punkt \mathbf{X}_{Obj} durch eine räumliche Transformation \mathbf{T}_{Obj}^{Komp} vom Objektkoordinatensystem in ein Koordinatensystem transformiert, das in der Mitte des Kameraobjektivs liegt und als Komponentenkoordinatensystem KS_{Komp} bezeichnet wird [4]. Dabei wird \mathbf{T}_{Obj}^{Komp} auch als extrinsische Matrix bezeichnet [5]:

$$\mathbf{T}_{Obj}^{Komp} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Obj}^{Komp} & \mathbf{r}_{Obj} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

mit

$$\mathbf{X}_{Komp} = \mathbf{T}_{Obj}^{Komp} \cdot \mathbf{X}_{Obj}$$

Hierbei stellt \mathbf{R}_{Obj}^{Komp} die Rotationsmatrix dar, deren Elemente beispielsweise durch Anwenden der Euler-, der Kardan- oder der RPY-Winkel berechnet werden können. \mathbf{r}_{Obj} ist der Vektor vom Ursprung des Koordinatensystems KS_{Obj} zum Ursprung des Koordinatensystems KS_{Komp} und $\mathbf{0}^T$ ein transponierter Nullvektor. Die Abbildung vom Komponenten- ins Objektkoordinatensystem erfolgt durch Inversion der Matrix \mathbf{T}_{Obj}^{Komp} [7]:

$$\mathbf{T}_{Komp}^{Obj} = \left(\mathbf{T}_{Obj}^{Komp} \right)^{-1}$$

$$\mathbf{T}_{Komp}^{Obj} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{R}_{Obj}^{Komp} \right)^T & - \left(\mathbf{R}_{Obj}^{Komp} \right)^T \cdot \mathbf{r}_{Obj} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{Obj} = \mathbf{T}_{Komp}^{Obj} \cdot \mathbf{X}_{Komp}$$

Hier wird angenommen, dass zwischen KS_{Obj} und KS_{Komp} keine Verdrehung existiert und eine Verschiebung nur in z-Richtung stattfindet. Daraus folgt:

$$\mathbf{T}_{Obj}^{Komp} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{r}_{Obj} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{Obj} = [0 \quad 0 \quad z_{Kamera}]^T$$

mit z_{Kamera} als Abstand zwischen den beiden Koordinatensystemen und \mathbf{E} als Einheitsmatrix. Da das Kameraobjektiv telezentrisch ist, nimmt z_{Kamera} keinen Einfluss auf die geometrischen Verhältnisse und wird daher nicht berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wird der Punkt \mathbf{X}_{Komp} durch eine telezentrische Projektion \mathbf{K}_Z vom Komponenten- ins Bildkoordinatensystem KS_{Bild} transformiert [4]:

$$\mathbf{K}_Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{Bild} = \mathbf{K}_Z \cdot \mathbf{X}_{Komp}$$

\mathbf{K}_Z beschreibt dabei eine Projektion vom 3D-Raum in den 2D-Raum mit dem Rang 3. Das bedeutet, dass aus \mathbf{K}_Z keine direkte inverse Transformation abgeleitet und somit nicht direkt vom 2D-Raum in den 3D-Raum transformiert werden kann [6]. Hierfür wird die Pseudoinverse von \mathbf{K}_Z nach „Moore-Penrose“ gebildet und eine räumliche Transformation \mathbf{T}_{Bild}^{Komp} verwendet [8]:

$$\mathbf{K}_{Z,inv} = \mathbf{K}_Z^T \cdot (\mathbf{K}_Z \cdot \mathbf{K}_Z^T)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{Bild}^{Komp} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{r}_{Bild} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{Komp} = \mathbf{T}_{Bild}^{Komp} \cdot \mathbf{K}_{Z,inv} \cdot \mathbf{X}_{Bild}$$

mit

$$\mathbf{r}_{Bild} = [0 \quad 0 \quad c_{Kamera,1} + c_{Kamera,2} \quad 1]^T$$

Die Parameter $c_{Kamera,1}$ und $c_{Kamera,2}$ geben dabei die geometrische Lage der Mitte des CCD-Arrays bzgl. des Komponentenkoordinatensystems an (siehe Bild 1).

Um die durch das Objektiv hervorgerufenen nichtlinearen Abbildungsfehler zu berücksichtigen, werden die Bildpunkte durch die Verzeichnungsfunktion \mathbf{L} verzerrt und liegen anschließend im Bild'-Koordinatensystem $KS_{Bild'}$ vor [7]:

$$\mathbf{X}_{Bild'} = \mathbf{L}(\mathbf{X}_{Bild}, \mathbf{k})$$

mit \mathbf{k} als Parametervektor. Grundsätzlich lässt sich \mathbf{L} in drei Verzeichnungsarten unterteilen [9; 10]:

- radialsymmetrisch $\delta \mathbf{x}_r = [\delta x_r \quad \delta y_r]^T$
- radialasymmetrisch $\delta \mathbf{x}_d = [\delta x_d \quad \delta y_d]^T$
- Affinität und Scherung $\delta \mathbf{x}_a = [\delta x_a \quad \delta y_a]^T$

Die Elemente der Vektorfunktionen $\delta \mathbf{x}_r$, $\delta \mathbf{x}_d$ und $\delta \mathbf{x}_a$ nehmen folgende Gestalt an:

$$\delta x_r = x \cdot (k_1 \cdot (r^2 - r_0^2) + k_2 \cdot (r^4 - r_0^4) + k_3 \cdot (r^6 - r_0^6))$$

$$\delta y_r = y \cdot (k_1 \cdot (r^2 - r_0^2) + k_2 \cdot (r^4 - r_0^4) + k_3 \cdot (r^6 - r_0^6))$$

$$\delta x_d = p_1 \cdot (3 \cdot x^2 + y^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y$$

$$\delta y_d = 2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (x^2 + 3 \cdot y^2)$$

$$\delta x_a = A_1 \cdot x + A_2 \cdot y$$

$$\delta y_a = 0$$

Hierbei kennzeichnen k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , A_1 und A_2 Verzeichnungsparameter und werden im Vektor \mathbf{k} zusammengefasst. r_0 ergibt sich zu 2/3 des maximalen Bildradius [3]. x und y geben die Koordinaten des Bildpunktes im KS_{Bild} an. Sollen die Punkte vom KS_{Bild} ins $KS_{Bild'}$ transformiert werden, dann muss die inverse Verzeichnungsfunktion zu \mathbf{L} berechnet werden:

$$\mathbf{X}_{Bild} = \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{X}_{Bild'}, \mathbf{k})$$



Mathematisch lässt sich dies über die Definition eines Fehlerfunktionals und mit Hilfe von nichtlinearen Optimierungsmethoden umsetzen. Da die einzelnen Verzeichnungsfunktionen jeweils von x und y abhängen, wird folgender Ausdruck als Funktional verwendet:

$$\varepsilon = (x' - \delta x - x)^2 + (y' - \delta y - y)^2 = f(x, y)$$

mit

$$\delta x = \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a$$

$$\delta y = \delta y_r + \delta y_d + \delta y_a$$

Mit Hilfe der Optimierungsmethoden wird das Minimum von ε gesucht, das den gesuchten Bildpunkt darstellt:

$$\min_{x,y}(\varepsilon) \Rightarrow \{x_{\min}, y_{\min}\}$$

Für die Suche des Minimums wurden die numerischen Optimierungsverfahren nach Nelder-Mead (Simplex-Algorithmus) und nach Rosenbrock implementiert. Damit ist es möglich, zu einem im $KS_{Bild'}$ angegebenen Punkt die Verzeichnung und somit auch die Koordinaten im KS_{Bild} zu berechnen.

Für den letzten Schritt der Projektion werden die Punkte durch die Matrix G ins Pixelkoordinatensystem KS_{Pixel} transformiert:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \frac{h_{CCD}}{2} \\ 1 & 0 & \frac{b_{CCD}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{Pixel} = G \cdot X_{Bild'}$$

wobei b_{CCD} und h_{CCD} die Breite und die Höhe der CCD-Matrix der Kamera darstellen. Diese Projektion transformiert das Koordinatensystem in die linke obere Ecke der CCD-Matrix und tauscht die Reihenfolge der Koordinaten der Punkte um. Durch die Kenntnis der Anzahl der Pixel pro Zeile und Spalte und die Abmaße des gesamten Matrix-Arrays werden die Pixelkoordinaten anschließend in diskrete Pixelkoordinaten umgewandelt. Das bedeutet, dass allen Punkten, die innerhalb einer Pixelfläche liegen, die gleiche Koordinate zugeordnet wird. Bei der inversen Projektion werden zunächst die diskreten Pixelkoordinaten in kontinuierliche Werte umgerechnet

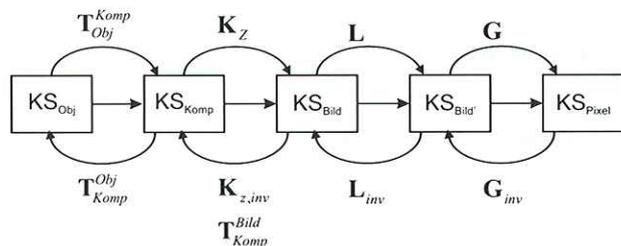


Bild 2 Transformationsschritte.

und anschließend durch die inverse Matrix von G ins $KS_{Bild'}$ projiziert:

$$G_{inv} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\frac{h_{CCD}}{2} \\ 1 & 0 & -\frac{b_{CCD}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{Bild'} = G_{inv} \cdot X_{Pixel}$$

Die gesamte Transformationskette ist in Bild 2 zur Übersicht zusammengefasst.

2.2 Mathematisches Modell des Projektors

Wie oben erwähnt, kann der Projektor als inverse Kamera modelliert werden. Das bedeutet, dass die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Projektionskette auf die Projektion von 3D-Punkten auf 2D-Punkte des Projektors prinzipiell verwendet werden kann. Es ergeben sich allerdings drei Unterschiede, die im Folgenden näher erläutert werden.

Das Komponentenkoordinatensystem des Projektors ist gegenüber dem Objektkoordinatensystem um den Triangulationswinkel ψ des Streifenprojektionssystems verkippt und weist zusätzlich eine Verschiebung in x -Richtung auf. Dadurch ergeben sich Veränderungen in der Transformationsmatrix T_{Obj}^{Komp} :

$$T_{Obj}^{Komp} = \begin{bmatrix} R_{Obj}^{Komp} & r_{Obj,Komp} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{Obj}^{Komp} = R_y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & \sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

$$r_{Obj,Komp} = [x_{Projektor} \quad 0 \quad z_{Projektor}]^T$$

Der zweite Unterschied zwischen den Projektionsvorschriften von Kamera und Projektor liegt in der Abbildung vom 3D-Raum in den 2D-Raum. Da der Projektor kein telezentrisches Verhalten aufweist, wird anstatt der telezentrischen Projektion eine Zentralprojektion angewendet, sodass die Matrix K_Z folgende Form annimmt [11]:

$$K_Z = \begin{bmatrix} c_{Projektor,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{Projektor,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X_{Bild} = K_Z \cdot X_{Komp}$$

mit $c_{Projektor,1}$ als Kamerakonstante des Projektors. Mit der Annahme, dass die Punkte vom 3D-Raum bei Erhalt des lateralen Maßstabs auf eine Ebene projiziert werden, die senkrecht zur z -Achse des Komponentenkoordinatensystems steht, kann $c_{Beamer,1}$ zu „1“ gesetzt werden und es entsteht wieder die gleiche Matrix wie bei der Projektionsvorschrift der Kamera [6; 11]. Die Rücktransformation

vom Bild ins Komponentenkoordinatensystem kann hier ebenfalls über die Pseudo-Inverse nach Moore-Penrose und über eine räumliche Transformation durchgeführt werden:

$$\mathbf{K}_{Z,inv} = \mathbf{K}_Z^T \cdot (\mathbf{K}_Z \cdot \mathbf{K}_Z^T)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_{Projektor,1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_{Projektor,1}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{Z,inv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{Bild}^{Komp} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{r}_{Bild} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{Komp} = \mathbf{T}_{Bild}^{Komp} \cdot \mathbf{K}_{Z,inv} \cdot \mathbf{X}_{Bild}$$

mit

$$\mathbf{r}_{Bild} = [0 \quad 0 \quad c_{Projektor,2} \quad 1]^T$$

$c_{Projektor,2}$ stellt den Abstand vom Pinhole zur Mitte der Pixelfläche des Projektors dar.

Zusammengefasst ergeben sich damit für die Kamera und den Projektor die folgenden Parameter, die für einen

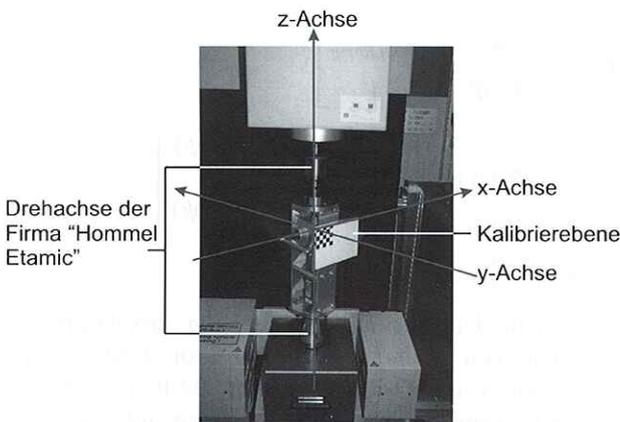


Bild 3 Versuchsstand für die Kalibrierung.

Abgleich zwischen realem und virtuellem System identifiziert werden müssen:

- äußere Parameter der Kamera:

$$c_{Kamera,1}, c_{Kamera,2}$$

- innere Parameter der Kamera:

$$k_{1,Kamera}, k_{2,Kamera}, k_{3,Kamera}, p_{1,Kamera}, p_{2,Kamera}, A_{1,Kamera}, A_{2,Kamera}$$

- äußere Parameter des Projektors:

$$x_{Projektor}, z_{Projektor}, c_{Projektor,2}$$

- innere Parameter des Projektors:

$$k_{1,Projektor}, k_{2,Projektor}, k_{3,Projektor}, p_{1,Projektor}, p_{2,Projektor}, A_{1,Projektor}, A_{2,Projektor}$$

3 Mehrstufenkalibrierung

In diesem Kapitel werden der für die Kalibrierung verwendete Versuchsstand, die Kalibrierstrategie und die Ergebnisse der Kalibrierung dargestellt.

3.1 Versuchsstand

Für die Identifizierung des Streifenprojektionssystems wurde ein Versuchsstand mit zwei hochauflösenden Drehachsen entworfen, mit dem es möglich ist, eine Kalibrierebene in Form eines Schachbrettmusters parallel zur Kamera bzw. zum Projektor auszurichten (siehe Bild 3). Die Auflösungen der Drehachsen nehmen dabei einen entscheidenden Einfluss hinsichtlich der Genauigkeit bei der parallelen Ausrichtung und sollen daher näher spezifiziert werden.

Mit der Präzisionsdrehachse der Firma Hommel Etamic können Rotationen mit einer Auflösung von 0,018° Schritten um die z-Achse ausgeführt werden. Werden mit der Kamera Bilder der Kalibrierebene in verschiedenen Winkelpositionen aufgenommen, dann variiert die Kantenlänge in x-Richtung aufgrund der telezentrischen Projektion der Kamera (siehe Bild 4). Wird die Ebene

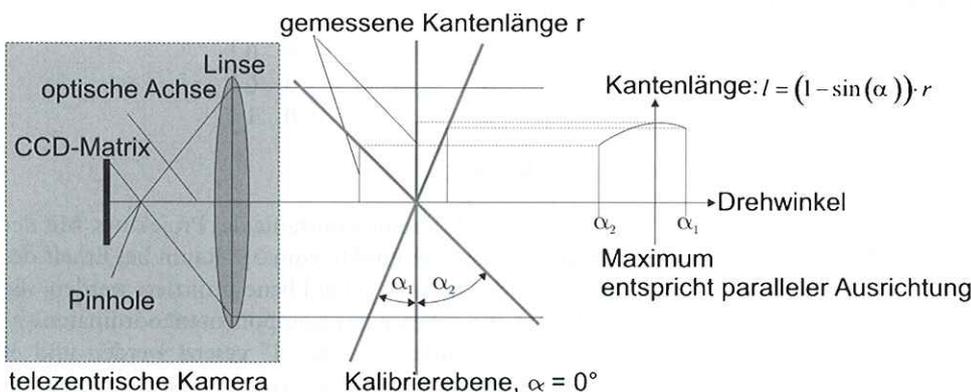


Bild 4 Abhängigkeit zwischen der Kantenlänge in x-Richtung und dem Drehwinkel.

zwischen den beiden in Bild 4 dargestellten Positionen bewegt, dann wird sich ein Maximum bei der Kantenlänge ergeben, wenn die Ebene parallel zur Kamera ausgerichtet ist.

Die hohe Auflösung bei der Drehung um die x -Achse wurde durch die Kopplung eines Schrittmotors und einer hochübersetzenden Schnecke erzeugt und kann angegeben werden zu $0,02^\circ$.

Es besteht zudem die Möglichkeit, das Streifenprojektionssystem über ein 3-Achs-Positioniersystem der Firma Newport Corporation im Raum zu verfahren. Die Wiederholgenauigkeit des Achssystems für jede Achse wird dabei vom Hersteller mit $1,25 \mu\text{m}$ angegeben.

3.2 Kamerakalibrierung

Vor der eigentlichen Kamerakalibrierung wird zunächst die Kalibrierebene parallel zur Kamera ausgerichtet. Der Drehwinkel der Hommel-Achse ψ_1 in dieser Stellung wird für die Ermittlung des Triangulationswinkels benötigt und daher abgespeichert (siehe Kapitel 3.3). Anschließend wird ein Bild der Kalibrierebene aufgenommen und es werden über eine Eckpunktedetektion alle Eckpunkte $\{x'_i, y'_i\}$ des Schachbrettmusters bestimmt. Die zugehörigen unverzeichneten Eckpunkte $\{x_i, y_i\}$ sind aus den Abmessungen der Schachbrettplatte bekannt. Für die Ermittlung der inneren Parameter der Kamera wird das folgende Funktional definiert:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N ((x'_i - \delta x_i - x_i)^2 + (y'_i - \delta y_i - y_i)^2)$$

$$\varepsilon = f(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2)$$

Als Verzeichnungsfunktionen δx_i und δy_i werden die in Kapitel 2.1 vorgestellten Verzeichnungsfunktionen verwendet. Das Funktional wird mit Hilfe des Simplex-Algorithmus nach Nelder-Mead minimiert und führt auf die gesuchten Modellparameter (siehe Tabelle 1):

$$\min_{k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2}(\varepsilon) \Rightarrow k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2$$

Zur Ermittlung der externen Parameter wird zunächst ein Kamerabild aufgenommen. Anschließend werden die Eckpunkte bestimmt und die unverzeichneten Bildpunkte mit der inversen Verzeichnungsfunktion L^{-1} und den inneren Kameraparametern berechnet. Über geometrische

Tabelle 1 Identifizierte innere Parameter der Kamera.

Modellparameter	Wert
$k_{1,Kamera}$	-0,00000424
$k_{2,Kamera}$	0,00000000
$k_{3,Kamera}$	0,00000000
$p_{1,Kamera}$	-0,00001311
$p_{2,Kamera}$	0,00005154
$A_{1,Kamera}$	-0,00008178
$A_{2,Kamera}$	0,00024901

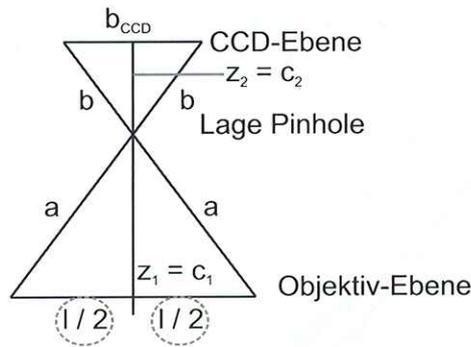


Bild 5 Geometrische Verhältnisse zur Ermittlung der externen Parameter der Kamera.

Tabelle 2 Technische Spezifikation der Kamera „Basler 641f“.

Parameter	Wert
Anzahl Pixel horizontal	1624
Anzahl Pixel vertikal	1236
Aspektverhältnis	1,31392
Sensordiagonale	8,923 mm
Breite der Pixelfläche b_{CCD}	7,108 mm
Höhe der Pixelfläche h_{CCD}	5,394 mm

Verhältnisse können die Parameter c_1 und c_2 ermittelt werden (siehe Bild 5). l stellt die Länge der Kanten des Schachbrettmusters auf der Objektivenebene dar, also die reale Kantenlänge. Die Größe b_{CCD} der CCD-Ebene kann aus den Spezifikationen der verwendeten Kamera vom Typ „Basler 641f“ berechnet werden (siehe Tabelle 2). Damit ergeben sich die extrinsischen Parameter der Kamera zu:

$$\frac{l}{b_{CCD}} = \frac{a}{b}$$

$$a^2 = z_1^2 + l^2 \quad b^2 = z_2^2 + b_{CCD}^2$$

$$z_1 = c_{Kamera,1} \quad z_2 = c_{Kamera,2}$$

$$c_{Kamera,1} = \sqrt{\left(\frac{l}{b_{CCD}}\right)^2 \cdot (b_{CCD}^2 + c_{Kamera,2}^2) - l^2}$$

Die Parameter $c_{Kamera,1}$ und $c_{Kamera,2}$ hängen voneinander ab und können nicht getrennt voneinander ermittelt werden. Da hier lediglich die geometrischen Verhältnisse wichtig sind, wird c_2 frei gewählt und c_1 daraus berechnet:

$$c_{Kamera,2} = 4 \text{ mm}$$

$$c_{Kamera,1} = 22,3848 \text{ mm}$$

3.3 Projektorkalibrierung

Für die Identifizierung der Parameter des Projektors muss die Kalibrierebene parallel zum Objektiv des Projektors ausgerichtet werden. Hierfür wird ein Streifenmuster auf die Kalibrierebene projiziert und von der Kamera erfasst (siehe Bilder 6 und 7). Die Schachbrettebene ist dann

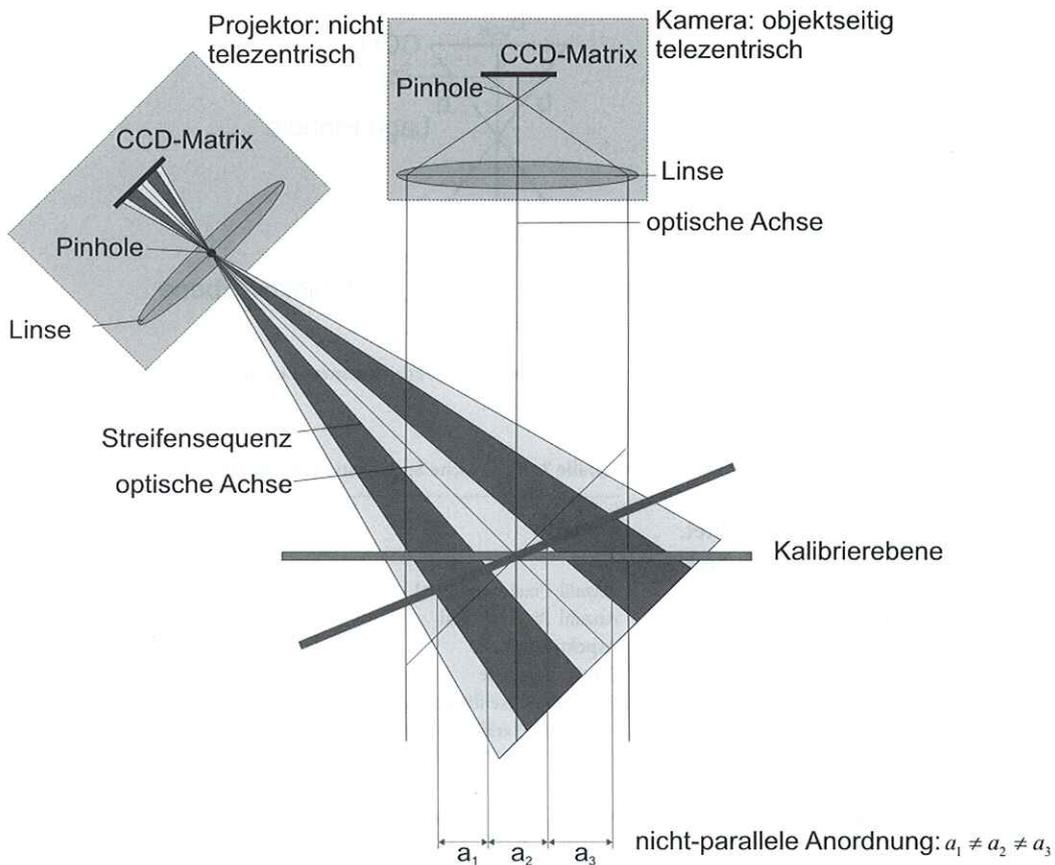


Bild 6 Nicht-Parallele Ausrichtung der Kalibrierebene zum Projektor.

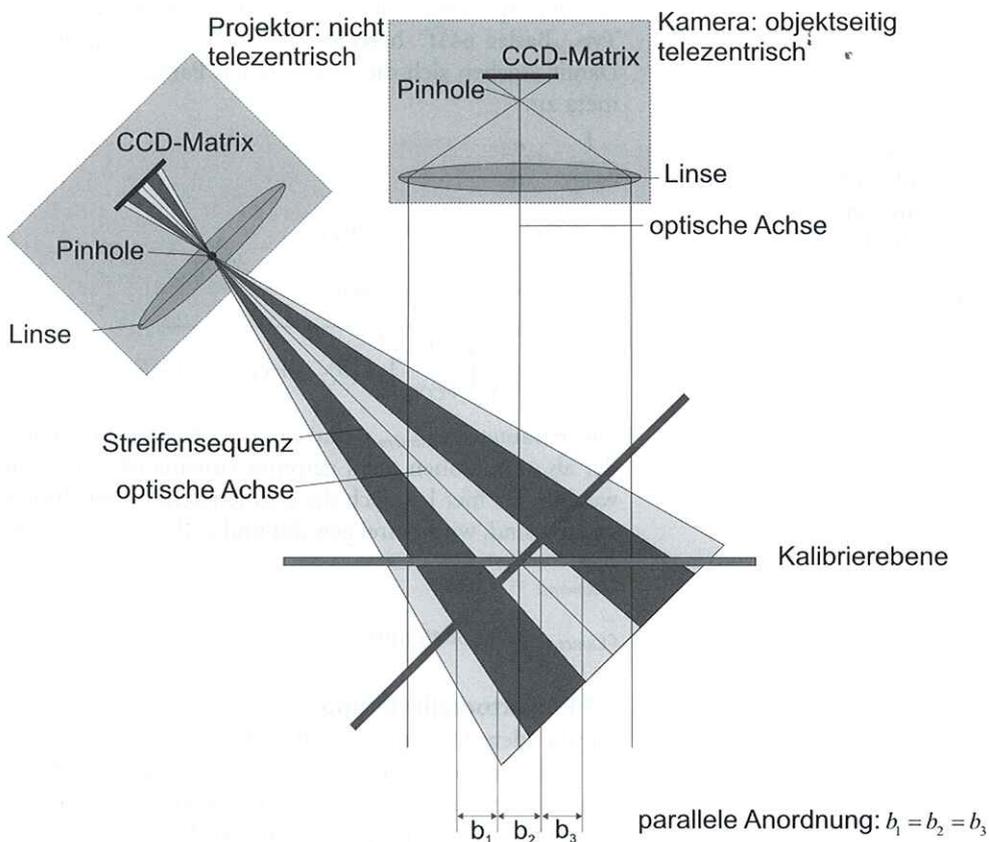


Bild 7 Parallele Ausrichtung der Kalibrierebene zum Projektor.

Tabelle 3 Identifizierte innere Parameter des Projektors.

Modellparameter	Wert
$k_{1,Projektor}$	-0,00000084
$k_{2,Projektor}$	0,0000000
$k_{3,Projektor}$	0,0000000
$p_{1,Projektor}$	-0,00000909
$p_{2,Projektor}$	0,00000000
$A_{1,Projektor}$	0,00024955
$A_{2,Projektor}$	0,00000867

parallel zum Projektor ausgerichtet, wenn die Streifen, die von der Kamera erfasst werden, gleich breit sind. Der Drehwinkel der Hommel-Achse ψ_2 in dieser Stellung wird zur Ermittlung des Triangulationswinkels benötigt und daher abgespeichert.

Hierbei wurde vorausgesetzt, dass im gesamten Messbereich der Kamera gute telezentrische Verhältnisse vorliegen. Würde das Kameraobjektiv eine schlechte Telezentrie besitzen, dann hätte dies zur Folge, dass das projizierte Streifenmuster verzerrt von der Kamera aufgenommen und somit die Hell-Dunkel-Übergänge fehlerhaft identifiziert werden. Versuche haben jedoch gezeigt, dass das hier verwendete Objektiv gute Telezentrieigenschaften aufweist, sodass sich keine Probleme bei der Kantendetektion ergeben haben.

Im nächsten Schritt werden die inneren Parameter der Kamera ermittelt. Hierfür müssen Wertepaare von verzeichneten und unverzeichneten Bildpunkten aufgestellt werden. Als Basis hierfür werden die Hell-Dunkel-Übergänge der Streifen verwendet. Da die Streifen nur eine Koordinate in x -Richtung besitzen, werden bei den Punktepaaren alle y -Werte zu null gesetzt. Die unverzeichneten Punkte ergeben sich aus den projizierten Streifenmustern. Um die verzeichneten Punkte angeben zu können, werden über eine Kantendetektion die Hell-Dunkel-Übergänge in der Mitte des Kamerabildes bestimmt und die Kameraverzeichnung zurückgerechnet. Damit kann, ähnlich wie in Kapitel 3.2, ein Funktional der Form

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N ((x'_i - \delta x_i - x_i)^2 + (y'_i - \delta y_i - y_i)^2)$$

$$\varepsilon = f(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2)$$

aufgestellt werden. Das Funktional wird auch hier wieder mit Hilfe des Simplex-Algorithmus nach Nelder-Mead minimiert und führt auf die inneren Parameter des Projektors (siehe Tabelle 3).

$$\min_{k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2}(\varepsilon) \Rightarrow k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A_1, A_2$$

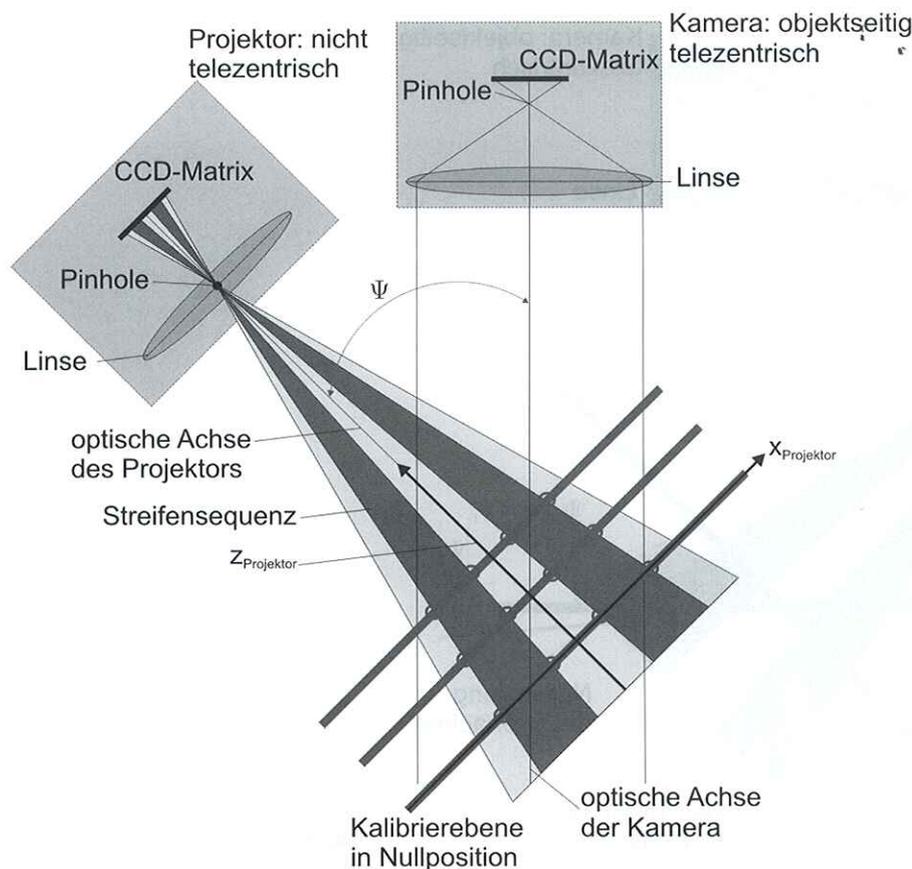


Bild 8 Prinzipskizze zur Ermittlung der Geometrieparameter des Projektors.

Für die Ermittlung der äußeren Parameter des Projektors wird ausgenutzt, dass das Streifenprojektionssystem hochgenau im Raum bewegt werden kann (siehe Kapitel 3.1).

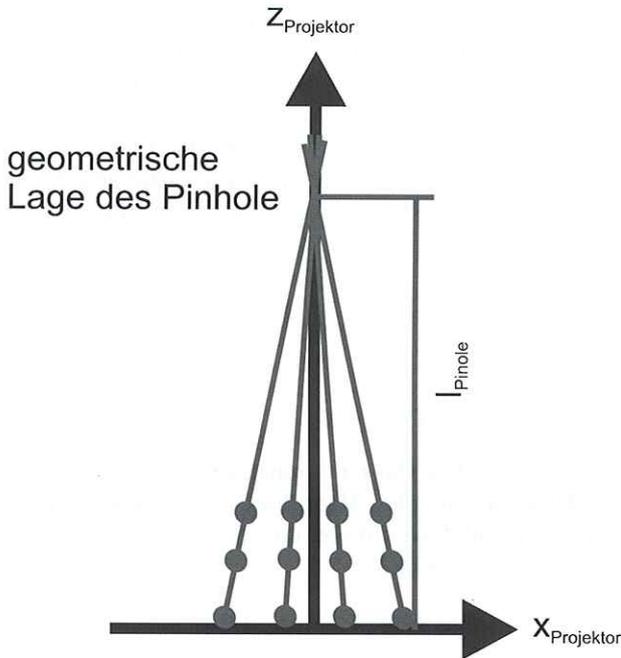


Bild 9 Interpolation der Geraden und Berechnung der Lage des Pinholes.

Durch die Positionierung des Streifenprojektionsgerätes wird die Kalibrierebene relativ zum Projektor verschoben (siehe Bild 8) und es werden für jede Stellung die Hell-Dunkel-Übergänge bestimmt. Die Punkte werden anschließend durch Geraden interpoliert und der Schnittpunkt berechnet, der die geometrische Lage des Pinholes darstellt (siehe Bild 9).

Der Abstand $l_{Pinhole}$ kann hier angegeben werden zu:

$$l_{Pinhole} = 266,821 \text{ mm}.$$

Über den Triangulationswinkel Ψ können damit die Größen $x_{Projektor}$ und $z_{Projektor}$ berechnet werden. Der Triangulationswinkel ergibt sich aus den Winkeln ψ_1 und ψ_2 , wenn die Kalibrierebene parallel zur Kamera bzw. zum Projektor ausgerichtet ist (siehe Bild 10). Mit der Auflösung der Drehachse ergibt sich der Winkel Ψ und damit $x_{Projektor}$ und $z_{Projektor}$ zu:

$$\Psi = 45,02^\circ$$

$$x_{Projektor} = -\sin(\Psi) \cdot l_{Pinhole} = -188,737 \text{ mm}$$

$$z_{Projektor} = \cos(\Psi) \cdot l_{Pinhole} = 188,605 \text{ mm}.$$

Der Parameter $c_{Projektor,2}$ ergibt sich durch Anwenden des Strahlensatzes (siehe Bild 5). In diesem Fall ist c_1 gleich-

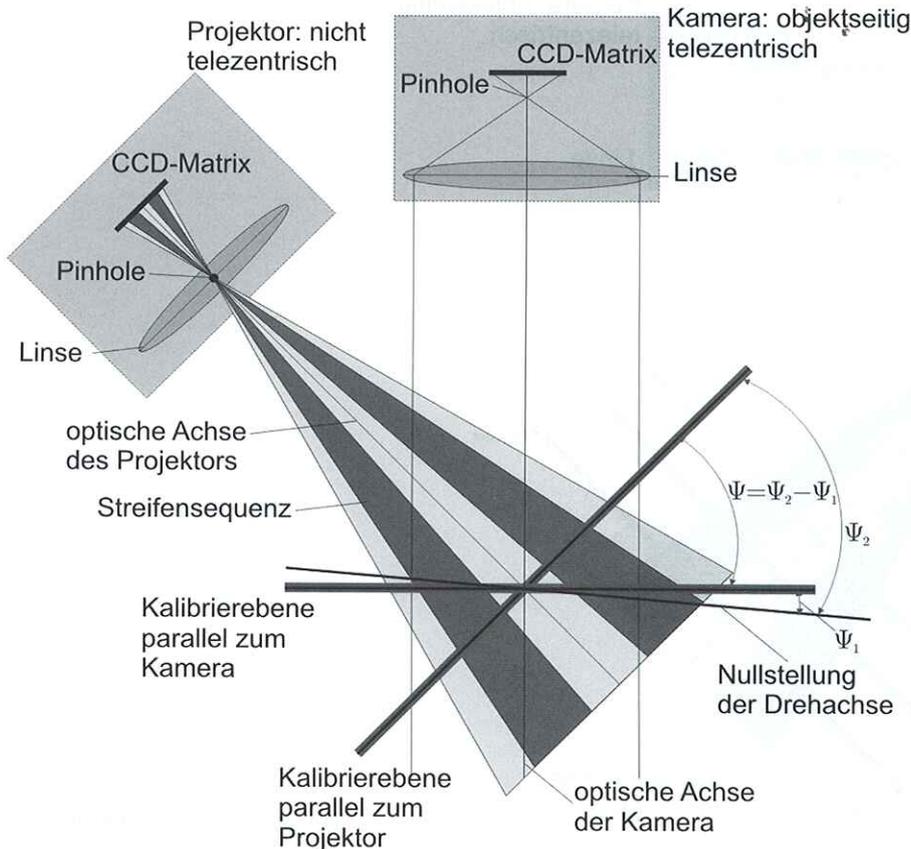


Bild 10 Prinzip zur Ermittlung des Triangulationswinkels.

zusetzen mit l_{Pinhole} und c_2 mit $c_{\text{Projektor},2}$.

$$\frac{l}{b_{\text{Projektor}}} = \frac{a}{b}$$

$$a^2 = z_1^2 + l^2 \quad b^2 = z_2^2 + b_{\text{Projektor}}^2$$

$$z_1 = l_{\text{Pinhole}} \quad z_2 = c_{\text{Projektor},2}$$

$$b = \frac{b_{\text{Projektor}}}{l} \cdot a = \frac{b_{\text{Projektor}}}{l} \cdot \sqrt{l_{\text{Pinhole}}^2 + l^2}$$

$$c_{\text{Projektor},2}^2 = b^2 - b_{\text{Projektor}}^2 = \left(\frac{b_{\text{Projektor}}}{l}\right)^2 \cdot (l_{\text{Pinhole}}^2 + l^2) - b_{\text{Projektor}}^2$$

$$c_{\text{Projektor},2} = \sqrt{\left(\frac{b_{\text{Projektor}}}{l}\right)^2 \cdot (l_{\text{Pinhole}}^2 + l^2) - b_{\text{Projektor}}^2}$$

mit $b_{\text{Projektor}}$ als Breite des Projektors. Die Breite des Projektors ergibt sich aus den technischen Daten des Projektors (siehe Tabelle 4).

Damit folgt für den Abstand vom Pinhole zur Projektorfläche:

$$c_{\text{Projektor},2} = 51,0721 \text{ mm}$$

Tabelle 4 Technische Daten des Projektors.

Parameter	Wert
Anzahl Pixel horizontal	1024
Anzahl Pixel vertikal	768
Aspektverhältnis	1,333
Sensordiagonale	17,78 mm
Breite der Pixelfläche $b_{\text{Projektor}}$	14,224 mm
Höhe der Pixelfläche $h_{\text{Projektor}}$	10,668 mm

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde eine Strategie zur Kalibrierung von Streifenprojektionssystemen mit einem telezentrischen Kameraobjektiv vorgestellt. Neben dem verwendeten mathematischen Modell des Messgerätes wurden weiterhin der Versuchsstand und ein mehrstufiges Konzept zur Identifikation aller modellierten Systemparameter präsentiert.

Für das Modell wird ein idealisierter Messaufbau zwischen Projektor und Kamera vorausgesetzt. In der Realität kann es aufgrund von Fertigungs- und Montagefehlern jedoch zu Schiefstellungen im Messaufbau kommen, aus denen zusätzliche Verkippungen um die x - und die z -Achse und Verschiebungen in der y -Richtung resultieren. Prinzipiell wäre es denkbar, derartige Fehler im Modell zu berücksichtigen, um eine weitere

Annäherung des virtuellen Systems an das reale System zu erzielen.

Die ermittelten Systemparameter stellen in Verbindung mit dem mathematischen Modell ein virtuelles Abbild des Streifenprojektionssystems dar, das jetzt in Verbindung mit Monte-Carlo-Methoden zur Analyse statistischer Kenngrößen eingesetzt werden kann. Dazu ist es zweckmäßig, die Systemparameter als Zufallszahlen zu modellieren und mit einer geeigneten Verteilungsdichtefunktion zu versehen. Beispielsweise wird der Triangulationswinkel als normalverteilte Größe angesehen. Anschließend werden mit den verschiedenen Parametersätzen Messungen simuliert. Durch die Streuung der Parameter ergeben sich Abweichungen zwischen den unterschiedlichen „simulierten“ Messungen. Durch geeignete Auswertemethoden ist es möglich, Unsicherheitsbetrachtungen durchzuführen. Beispielsweise kann die Standardabweichung mit dem virtuellen System durch das Anwenden von Monte-Carlo-Methoden und mit dem realen System durch Wiederholmessungen abgeschätzt werden. Durch einen Vergleich der beiden Unsicherheiten kann ein Rückschluss auf die Güte des virtuellen Systems und somit auf die Qualität der Kalibrierstrategie gezogen werden.

Danksagung

Die Autoren möchten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung des Teilprojekts B5 „Vollständige fertigungsnahe Geometrieprüfung“ des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ danken.

Literatur

- [1] M. Trobina: Error model of a coded-light range sensor, ETH-Zürich, BIWI-TR-164, 1995.
- [2] R. Y. Tsai: An Effective and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, pp. 364–374, 1986.
- [3] R. J. Valkenburg, A. M. McIvor: Accurate 3D measurement using a structured light system. In: Image and Vision Computing 16, Ausgabe 2, S. 99–110, 1998.
- [4] R. I. Hartley, A. Zissermann: Multiple View Geometry in Computer Vision. 2. Auflage, Cambridge University Press, 2004.
- [5] O. Schreer: Stereosynthese und Bildanalyse, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2005.
- [6] T. Böttner: Messunsicherheitsbetrachtungen an einem virtuellen Streifenprojektionssystem. Dissertation, Leibniz Universität Hannover 2009.
- [7] T. Luhmann: Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, 2000.
- [8] J. Stoer, R. Bulirsch, W. Freund, H. W. Hoppe: Numerische Mathematik I, 10. Auflage, Springer Verlag, 2007.
- [9] D. C. Brown: Close-range camera calibration. In: Photogrammetrie Engineering, S. 855–866, 1971.
- [10] F. Remondino, C. S. Fraser: Digital Camera Calibration Methods: Considerations & Comparisons. ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, 2006.

[11] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka, S. Shankar Sastry: An Invitation to 3-D-Vision – from Images to Geometric Models. Springer Verlag, 2004.

Manuskripteingang: 21. Dezember 2009, zur Veröffentlichung angenommen: 14. September 2010



Dipl.-Ing. Klaus Haskamp (Korrespondenzautor) erhielt 2008 sein Diplom an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover. Aktuell befasst er sich im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 mit der Entwicklung eines virtuellen Multisensorsystems zur Abschätzung von Messunsicherheiten.

Adresse: s. u.,
E-Mail: klaus.haskamp@imr.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Markus Kästner ist Leiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: s. u.,
E-Mail: markus.kaestner@imr.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier ist Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: Leibniz Universität Hannover, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover,
E-Mail: eduard.reithmeier@imr.uni-hannover.de



Leichter Einstieg in den Hardwareentwurf



Harald Flügel
FPGA-Design mit Verilog
2010 | 229 S. | Br. | € 34,80
ISBN 978-3-486-59234-4

Ein Großteil elektronischer Steuerung wird heute mit FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) realisiert. Entworfen werden diese Bausteine mit Hardwarebeschreibungssprachen. Verilog ist eine sehr verbreitete und für Einsteiger gut geeignete Beschreibungssprache.

Dieses Buch führt in die Methode der FPGA-Entwicklung mit der Sprache Verilog ein und macht Neulingen den Einstieg so einfach wie möglich. Es erläutert die grundlegenden Konzepte der Sprache Verilog und stellt in einer Reihe praxisnaher Beispiele die Designmethoden der FPGA-Programmierung vor.

Der Einstieg in die FPGA-Programmierung – so leicht wie möglich.

Das Buch richtet sich an Studierende der Elektrotechnik und Informatik sowie an Hardwareentwickler in der Praxis.

Bestellen Sie in Ihrer Fachbuchhandlung oder direkt bei uns: Tel: 089/45051-248, Fax: 089/45051-333
verkauf@oldenbourg.de