

# Schachbrettmuster – Kamera-Kalibrierung mit Machine Learning-Methode

Steffen Reichel\*, Tobias Rentschler und Jan Burke\*\*

\*Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Str. 65, D-75175 Pforzheim

\*\*Fraunhofer-IOSB, Fraunhoferstraße 1, D-76131 Karlsruhe

<mailto:steffen.reichel@hs-pforzheim.de>

Digitalkameras für Messaufgaben benötigen eine gute Kamerakalibrierung. Wir präsentieren einen neuen Vorschlag zur objektiven Kamerakalibrierung basierend auf machine learning Ansätzen. Dazu wird zusätzlich neben dem re-projection error (Standard) ein weiteres Gütemaß benutzt (der forward projection error), um die Güte der Kalibrierung mit Hilfe von Schachbrettmustern abzuschätzen.

## 1 Einführung

Digitale Kameras sind in der berührungslosen Oberflächenmessung und -prüfung nicht mehr wegzudenken. Dem Lochkamera-Modell werden nach Wunsch Parameter für Verkippung, Verzeichnungen und Verzerrungen hinzugefügt. Aus einer Serie von Bildern eines Referenzmusters – hier Schachbrettmuster - werden dann eine Kameramatrix und die Verzerrungsparameter berechnet.

Häufig wird dazu die Software OpenCV (Details in [1]) verwendet (auch von uns). Die Kriterien für die Zuverlässigkeit einer Kalibrierung mit Schachbrettmustern sind immer noch unklar: weder ist bekannt, welche Anzahl von Kreuzungspunkten im Schachbrett-Muster optimal ist, noch wie viele Bilder aufgenommen werden müssen, um eine gewünschte „Qualität“ zu erreichen. Neben dem re-projection error (RPE) führen wir zusätzlich den forward projection error (FPE) ein [2]. Um objektive und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, benutzen wir Trainings- und Testmethoden aus dem Machine Learning (ML) [3], [4]. Dazu stellen wir Ergebnisse aus Simulation und Experiment vor, um den Einfluss von verschiedenen Bildaufnahmemethoden und Parametern zu bewerten.

## 2 Kamera-Modelle und Gütemaße

Wir benutzen das Kamera-Modell aus OpenCV (die drei Koordinatensysteme zeigt Abb. 1) [2], [3].

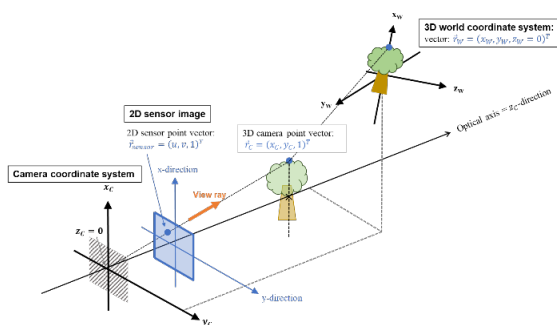


Abb. 1 Die drei Kamerakoordinatensysteme zur Kamera-kalibrierung mit Sichtstrahl (view ray).

Als Gütemaße werden der RPE und der FPE verwendet [2]. Der RPE beschreibt die Abweichung des bekannten Punktes  $(u, v)^T$  zu dem berechneten Punkt  $(\tilde{u}, \tilde{v})^T$  auf dem Bildsensor. Der FPE beschreibt die Abweichung im realen 3D Bild. Dazu wird der bekannte Punkt  $(u, v)^T$  des Bildsensors mittels der berechneten Kameraparameter in die 3D-Welt projiziert und ergibt den berechneten Punkt  $(\tilde{x}_w, \tilde{y}_w, z = 0)^T$ , der mit dem bekannten 3D Welt-punkt  $(x_w, y_w, z_w = 0)^T$  verglichen wird. Abb. 2 zeigt beide Gütemaße. Die Abweichungsvektoren berechnen sich für jeden i-ten Bildpunkt mit:

$$RPE_i := |\tilde{\Delta}_{u,i}| = \sqrt{(\tilde{u}_i - u_i)^2 + (\tilde{v}_i - v_i)^2} \quad (1)$$

$$FPE_i := |\tilde{\Delta}_i| = \sqrt{(\tilde{x}_{w,i} - x_{w,i})^2 + (\tilde{y}_{w,i} - y_{w,i})^2} \quad (2)$$

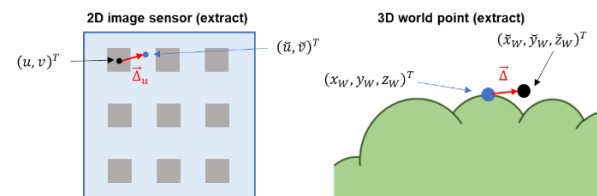


Abb. 2 Der RPE (links) und FPE (rechts) als Gütemaße.

## 3 Training- und Testmethode als ML Ansatz

Zur objektiven Bewertung wird ein dem ML entlehnter Ansatz verwendet [4] – Abb. 3 illustriert dies.

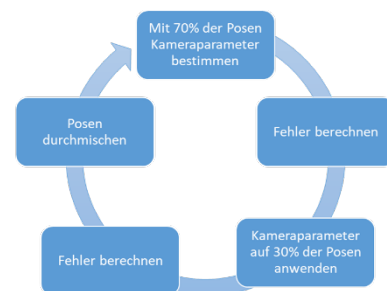
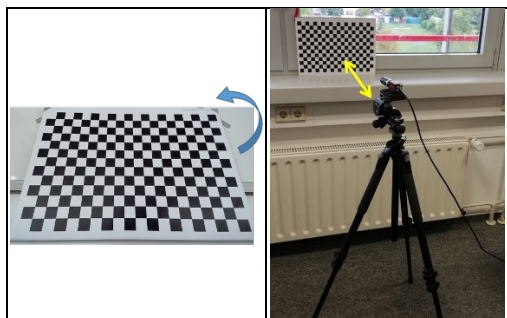


Abb. 3 Ablauf der Trainings- und Testmethode – Details in [2], [3]. Dieser Durchlauf wird 10 mal durchlaufen für die statistische Auswertung (RPE und FPE).

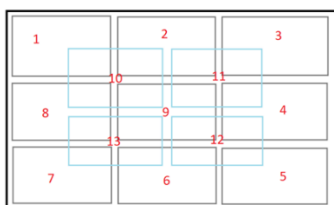
## 4 Experimente

Zur Messung wurden zwei verschiedene Schachbrettmuster mit den folgenden Kreuzungspunkten verwendet:  $39 \times 27 = 1053$  und  $19 \times 12 = 228$  Kreuzungspunkte ( $59,5 \text{ cm} \times 42,0 \text{ cm}$  /  $35,0 \text{ cm} \times 23,3 \text{ cm}$ ). Zur Bildaufnahme wurden zwei unterschiedliche Kameras verwendet. Eine 5,1 MP Kamera mit  $3,45 \mu\text{m}$  Pixelgröße mit einem  $F\# = 4,0$  Objektiv (wie in [2]) und eine einfache 2,0 MP Web-Kamera mit  $2,8 \mu\text{m}$  Pixelgröße. Zusätzlich wurden die Bilder mit zwei verschiedenen Methoden aufgenommen, siehe Abb. 4.



**Abb. 4** Verwendete Bildaufnahmefethoden: Neigung des Schachbrettmusters bei konstantem mittlerem Abstand (links) und bei verschiedenen Abständen (rechts).

Bei der Messmethode mit den verschiedenen Abständen wurden bei jedem Abstand 13 verschiedene Posen aufgenommen und damit das gesamte Bildfeld abgedeckt, siehe Abb. 5.



**Abb. 5** Die 13 verwendeten Posen bei jedem Abstand.

## 5 Ergebnisse

Zuerst wurde untersucht, ob die Anzahl der Kreuzungspunkte des Schachbrettmusters einen Einfluss auf die Kalibrierung hat. Dazu wurde das Experiment mit der 5,1 MP Kamera mit der Messmethode „verschiedene Abstände“ durchgeführt und das 5 Verzeichnisparameter-OpenCV Modell mit unserem ML Ansatz verwendet. Das Ergebnis zeigt Tab. 1.

Anzahl Kreuzungspunkte	$\overline{RPE}$ in Pixel	$\sigma_{RPE}$ in Pixel	$\overline{FPE}$ in mm	$\sigma_{FPE}$ in mm
228	0,142	0,077	0,049	0,027
1053	0,136	0,091	0,062	0,041

**Tab. 1** Ergebnis bei verschiedenen Kreuzungspunkten.

Man erkennt aus Tab. 1, dass die Anzahl der Kreuzungspunkte wenig Einfluss auf die Güte der Kamerakalibrierung hat.

Als nächstes wurde der Einfluss der Messmethode untersucht: verschiedene Neigungswinkel gegenüber verschiedenen Abständen (nach Abb. 4). Dazu wurde das Schachbrettmuster mit 228 Kreuzungspunkten verwendet sowie die 5,1 MP Kamera und das 5 Parameter OpenCV Modell. Das Ergebnis zeigt Tab. 2.

Messmethode	$\overline{RPE}$ in Pixel	$\sigma_{RPE}$ in Pixel	$\overline{FPE}$ in mm	$\sigma_{FPE}$ in mm
Verschiedene Abstände	0,142	0,077	0,049	0,027
Neigungsmethode	0,282	0,154	0,059	0,034

**Tab. 2** Ergebnis bei verschiedenen Messmethoden.

Die Methode mit den verschiedenen Abständen liefert einen deutlich kleineren  $\overline{RPE}$  und leicht kleinerem  $\overline{FPE}$  und daher scheint diese Methode die bessere zu sein.

Nun wurde der Einfluss der Kamera untersucht. Dazu wurde das Schachbrettmuster mit 228 Kreuzungspunkten verwendet sowie die Methode der verschiedenen Abstände und das OpenCV 5 Parameter Modell. Das Ergebnis zeigt Tab. 3.

Kamera	$\overline{RPE}$ in Pixel	$\sigma_{RPE}$ in Pixel	$\overline{FPE}$ in mm	$\sigma_{FPE}$ in mm
5,1 MP	0,142	0,077	0,049	0,027
2,0 MP	0,247	0,137	0,145	0,081

**Tab. 3** Ergebnis bei verschiedenen Kameras.

Tab. 3 zeigt deutlich, dass eine „bessere“ Kamera (hier: 5,1 MP Kamera mit gutem Objektiv) auch deutlich bessere Ergebnisse liefert. Der Unterschied zeigt sich vor allem in den Weltkoordinaten, also im FPE, was unterstreicht, auch den FPE bei der Bewertung zu verwenden.

## Literatur

- [1] OpenCV: „Camera Calibration and 3D Reconstruction“, (Zugriff:27.7.2022) - siehe: [docs.opencv.org/4.5.3/d9/d0c/group\\_\\_calib3d.html](https://docs.opencv.org/4.5.3/d9/d0c/group__calib3d.html)
- [2] S. Reichel, J. Burke, A. Pak, „Kamera-Kalibrierung für optische Messaufgaben mit erweiterter Berechnung und Bewertung“ in *DGAO-Proceedings 2021*, ISSN: 1614-8436 – urn:nbn:de:0287-2021-B005-1
- [3] A. Pak, S. Reichel, J. Burke, „Camera Calibration as a Machine Learning Problem“ in *Sensors*, Special Issue on Camera Calibration and 3D Reconstruction (2022), ISSN 1424-8220, in preparation
- [4] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction*, Ch. 7, 2nd Ed., (Springer 2017)