

Neuartige Strategie zur vollständigen Kalibrierung eines Sensorsystems zur automatischen Sichtprüfung spiegelnder Oberflächen

Sebastian Höfer¹, Stefan Werling² und Jürgen Beyerer^{1,2}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Anthropomatik,
Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES),

Adenauerring 4, D-76131 Karlsruhe

² Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung,
Fraunhoferstraße 1, D-76131 Karlsruhe

Zusammenfassung In dieser Arbeit präsentieren wir ein neues Verfahren zur Kalibrierung eines deflektometrischen Messaufbaus, bestehend aus einer robotergeführten Kombination von Kamera und Monitor. Bei bestehenden Verfahren sind mehrere Einzelkalibrierungen mit speziellen Mustern notwendig um eine solche Systemgeometrie vollständig zu vermessen. Unser Verfahren benötigt als Hilfsmittel nur einen Spiegel und bedient sich zusätzlich der Funktionalität des Aufbaus. Dadurch reduziert sich der Aufwand für den Sensor auf eine einzige Kalibrierung, wodurch zusätzlich das Akkumulieren von Messfehlern vermieden wird. Wir zeigen die Ergebnisse der Kalibrierung an realen Messdaten und erörtern die Möglichkeiten zur Erweiterung unseres Verfahrens.

1 Einleitung

Die Kalibrierung von Kameras ist ein grundlegendes Problem der Bildverarbeitung. Ohne Kenntnisse über die Geometrie der Kamera und ihrer Umgebung lassen sich die Bilddaten in vielen Anwendungen nur unzureichend auswerten. An Verfahren zur Kalibrierung von Ein- oder Multikamerasystemen haben sich mittlerweile einige Ansätze etabliert, die ohne aufwendige Kalibrierobjekte auskommen. Diese benutzen meist

Schachbrett- oder Punktmuster [1–3] als Referenzobjekt für den Kalibriervorgang. Dadurch wird bei der Kalibrierung ein Vorverarbeitungsschritt notwendig, bei dem die Merkmale der Kalibriermuster, wie z.B. die Ecken einer Schachbrettmusters, extrahiert werden. Unscharfe Kalibrieraufnahmen oder ungünstige Aufnahmepositionen können dabei schnell dazu führen, dass die Merkmale nicht vollständig oder nur ungenau erkannt werden. Darüber hinaus wird der Einsatz dieser Verfahren aufwendig, wenn nicht unmöglich, sobald neben Kameras die Geometrie zusätzlicher Komponenten kalibriert werden soll.

Das hier vorgestellte Kalibrierverfahren wurde gezielt für die Anwendung in einem deflektometrischen Messaufbau zur Sichtprüfung spieglender Oberflächen entwickelt, wie er in Abbildung (3.1) zu sehen ist. Die Herausforderung hierbei besteht darin, dass die Transformation zwischen LC-Display und Kamera zu ermitteln ist, wobei jedoch kein direkter Sichtkontakt zwischen beiden besteht. Es ist hierbei naheliegend bei der Kalibrierung einen Spiegel einzusetzen, was auch bereits in [4] umgesetzt wurde. Allerdings wird bei diesem Verfahren Kamera, Spiegelebene und Monitor nacheinander in separaten Schritten mit Kalibriermustern kalibriert, wodurch sich Messungenauigkeiten akkumulieren und mehrmals manuelles Eingreifen notwendig ist. Mit dem in dieser Arbeit präsentierten Verfahren greifen wir das Konzept der Kalibrierung über einen Spiegel wieder auf. Wir reduzieren jedoch die Kalibrierung von Kamera und Display auf eine einzige Serie von Aufnahmen und beschränken uns dabei auf einen planaren Spiegel als Hilfsmittel.

2 Aufbau

Die Abbildung (3.1) zeigt den von uns verwendeten deflektometrischen Aufbau (siehe auch [5,6]). Wichtigste Komponente ist der Sensorkopf, bestehend aus einer Industriekamera und einem LCD-Monitor. Zusätzlich wurde ein kompakter Auswerte- und Steuerrechner integriert, um einen flexiblen Aufbau zu ermöglichen und die Signalwege kurz zu halten. Die Kamera wird so ausgerichtet, dass sie die Reflexion des Monitors auf der zu untersuchenden Oberfläche betrachtet. Zur Registrierung wird ein mehrstufiges Phasenschiebepverfahren angewandt, das auf dem Monitor eine Serie von Sinusmustern anzeigt. Dadurch wird jedes Monitorpixel eindeutig codiert und lässt auf den Verlauf der Sichtstrahlen zwischen

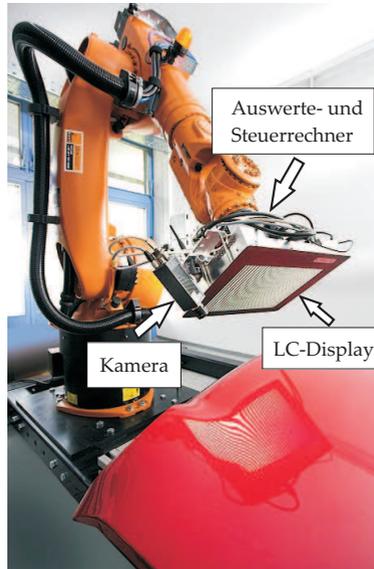


Abbildung 3.1: Deflektometrischer Messaufbau zur Vermessung spiegellender Oberflächen. Die Positionierung durch einen Roboterarm ermöglicht auch die Vermessung großer und komplex geformter Prüfteile.

Kamera und Monitor schließen.

Mit einem solchen einfachen Aufbau lassen sich schon Oberflächendefekte anhand auffälliger Änderungen im Gradientenbild erkennen. Damit lassen sich jedoch nur Aussagen über den Ausschnitt der lokalen Messung treffen. Erst mit Hilfe des Industrieroboters in Abbildung (3.1) wird die Untersuchung größerer Objekte ermöglicht, da der Inspektionsbereich des Sensors bei einer hochauflösenden Aufnahme nur einen Bereich von etwa 100 Quadratzentimetern abdeckt. Durch Aneinanderreihung von Einzelaufnahmen, sogenannten Patches, lässt sich das Prüfobjekt als Ganzes rekonstruieren und ein 3D-Modell der Oberfläche erstellen.

Zur Realisierung des Verfahrens ist allerdings die genaue Kenntnis der Systemgeometrie notwendig. Durch den Roboterarm wird dem Gesamtsystem neben dem Sensorkopf noch eine zusätzliche Komponente hinzugefügt, wodurch das Modell der Systemgeometrie komplexer wird. Bei

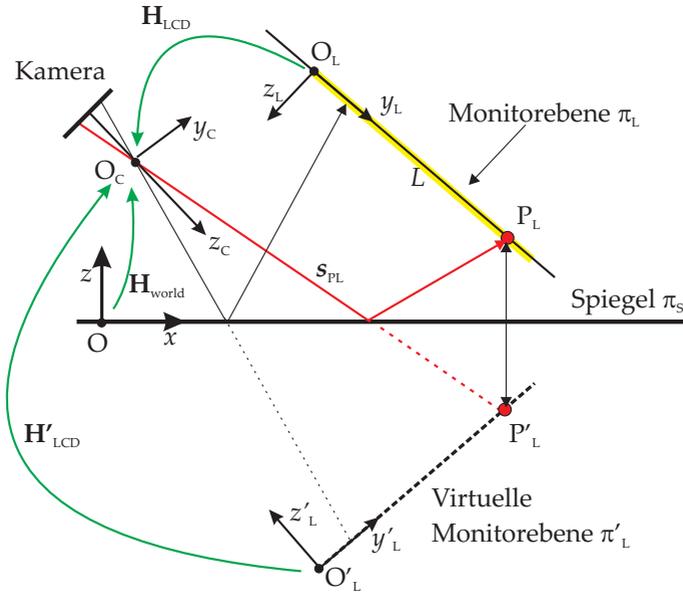


Abbildung 3.2: Geometrie des Sensorkopfs. Das Konzept des virtuellen Monitors ermöglicht die Kalibrierung über einen Spiegel.

der Kalibrierung gilt es nun die geometrischen Parameter dieser Komponenten zu ermitteln.

3 Kalibrierung

Die Zielsetzung für unser Verfahren zur Kalibrierung des oben beschriebenen Aufbaus war es, möglichst viele Einzelschritte der Kalibrierung zu integrieren und dabei ohne spezielle Hilfsmittel auszukommen. Abbildung (3.2) zeigt den schematischen Aufbau bei der Kalibrierung des Sensorkopfs. Grundlage für unser Verfahren sind die Arbeiten von Zhang [3] zur Kalibrierung einer Kamera aus mehreren Ansichten eines planaren Musters. Wir verzichten auf die dabei üblichen Schachbrettmuster und verwenden stattdessen den Monitor des Sensorkopfs. Entscheidender Vorteil bei dieser Vorgehensweise ist, dass die fehleranfällige Erkennung des Kalibriermusters wegfällt. Stattdessen wird die Positionscodierung

verwendet, die auch bei der deflektometrischen Messung zum Einsatz kommt. Dadurch kann zu jedem Sichtstrahl s_{PL} der Kamera die Position des betrachteten Punkts P_L auf der Monitorebene π_L subpixelgenau bestimmt werden. Die Nutzung des Monitors bedingt, dass zur Kalibrierung ein Spiegel π_S benutzt wird, über den die Kamera die Monitorebene π_L betrachtet. Daher verwenden wir das Konzept des “virtuellen Monitors“, da die Kalibrierung vorerst nur mit dem Spiegelbild π'_L der Monitorebene erfolgt. Insgesamt lässt sich der Kalibriervorgang in drei Schritte unterteilen, die wir hier nacheinander beschreiben werden:

1. Kalibrierung der Kamera,
2. Bestimmung der LCD/Kamera-Transformation,
3. Hand/Auge-Kalibrierung zwischen Roboter und Sensor.

Zunächst werden die intrinsischen Parameter der Kamera ermittelt. Dazu greifen wir auf die Methoden aus [7] zurück, die das Verfahren von Zhang [3] implementieren. Es werden N_{Pos} Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen gemacht. Die Algorithmen können unverändert angewandt werden und liefern den Hauptpunkt (u_0, v_0) die Brennweite α, β und eventuelle Verzeichnungparameter der Kamera. Einziger Unterschied zum ursprünglichen Verfahren ist die Gewinnung der Kalibrierpunkte aus einer gleichmäßig verteilten Auswahl von Kamerapixel/LCD-Positionen über die Positionscodierung. Ein Nebenprodukt der Kalibrierung ist die Information über die extrinsische Lage des Kalibriermusters, was in unserem Fall der virtuellen Monitorebene π'_L entspricht. Zu jeder Aufnahme $k \in \{1, \dots, N_{Pos}\}$ erhalten wir somit die zugehörige Ebene $\pi'_{L,k}$ in Relation zum Kamerasystem (O_C, x_C, y_C, z_C) .

Im nächsten Schritt wird die Transformation \mathbf{H}_{LCD} bestimmt. Ausgangspunkt sind die virtuellen Monitorebenen $\pi'_{L,k}$ aus der vorherigen Kamerakalibrierung. Jede dieser Ebenen

$$\pi'_L : \langle \hat{\mathbf{n}}'_L | \mathbf{x}_C \rangle - d'_L = 0 \quad (3.1)$$

liefert uns mit der Ebenennormalen $\hat{\mathbf{n}}'_L$ und dem Abstand zum Kamerarsprung d'_L vier Parameter. Wir machen uns zu Nutze, dass die reale Monitorebene π_L einer Spiegelung der virtuellen Ebene π'_L entspricht:

$$\pi_{L,k} = \text{Spgl}_{\pi_{S,k}}(\pi'_{L,k}), \quad (3.2)$$

wobei $\text{Spgl}_{\pi_{S,k}}$ die Spiegelung an der Ebene $\pi_{S,k}$ bezeichnet. Für jede Prüfposition k hängt die Lage der Monitorebene $\pi_{L,k}$ also von der Lage des Spiegels

$$\pi_{S,k} : \langle \hat{\mathbf{n}}'_{S,k} | \mathbf{x}_{\mathbf{C}} \rangle - d'_{S,k} = 0 \quad (3.3)$$

ab, dessen Position jedoch zunächst unbekannt ist. Da die reale Monitorebene durch die starre Fixierung relativ zum Kamerasystem invariant ist, entsprechen die Spiegelungen $\pi_{L,k}$ tatsächlich einer einzigen Ebene π_L . Es gilt also

$$\pi_L = \pi_{L,k} \ , \quad \forall k \in \{1, \dots, N_{Pos}\}. \quad (3.4)$$

Zusammen mit Gleichung 3.2 lässt sich so ein Gleichungssystem zur Bestimmung der Spiegelebenen $\pi_{S,k}$ aufstellen:

$$\text{Spgl}_{\pi_{S,j}}(\pi'_{L,j}) = \text{Spgl}_{\pi_{S,k}}(\pi'_{L,k}), \quad (3.5)$$

mit $(j, k) \in \{1, \dots, N_{Pos}\} \times \{1, \dots, N_{Pos}\}$ und $j \neq k$. Aus dieser Gleichung erhalten wir für jedes Paar (j, k) vier Bedingungen aus den gegebenen Monitorebenen $\pi'_{L,j}$ und $\pi'_{L,k}$, mit jeweils acht Unbekannten aus den Parametern für die Spiegelebenen $\pi'_{S,j}$ und $\pi'_{S,k}$. Bei N_{Pos} Kalibriermaßnahmen ergeben sich so sich so insgesamt

$$N_{Gl} = 4 \binom{N_{Pos}}{2} = 2 \frac{N_{Pos}!}{(N_{Pos} - 2)!} \quad (3.6)$$

Gleichungen mit $4N_{Pos}$ Unbekannten. Für $N_{Pos} = 3$ erhalten wir so 12 Gleichungen und 12 Unbekannte. Also erhalten wir für $N_{Pos} \geq 3$ ein überbestimmtes Gleichungssystem, das sich mittels einer Least-Squares-Optimierung lösen lässt. Mit den nun bekannten Parametern der Spiegelebenen $\pi'_{S,j}$, kann die gesuchte reale Monitorebene aus dem Spiegelbild einer beliebigen virtuellen Monitorebene π'_{L,k_0} gewonnen werden:

$$\pi_L = \text{Spgl}_{\pi_{S,k_0}}(\pi'_{L,k_0}). \quad (3.7)$$

Um die Transformation \mathbf{H}_{LCD} zwischen LCD-Schirm und Kamera zu erhalten, wird noch das Monitorkoordinatensystem benötigt. Dazu wird ein Koordinatenursprung, vorzugsweise eine Ecke des Monitors, und zwei Koordinatenachsen $\hat{\mathbf{e}}_{xl}$ und $\hat{\mathbf{e}}_{yl}$ aus der Monitorebene π_L gewählt. Die z_L -Achse ergibt sich aus $\hat{\mathbf{e}}_{zl} = \hat{\mathbf{e}}_{xl} \times \hat{\mathbf{e}}_{yl}$.

Einen ähnlichen Ansatz, in einem anderen Anwendungsfeld, verfolgten Kumar et al. in [8], zur Kalibrierung eines Multikamerasystems mit nicht überlappenden Sichtfeldern. Die Entwicklung des oben dargestellten Verfahrens erfolgte jedoch unabhängig von diesem.

Im letzten Schritt wird die Transformation \mathbf{H}_{world} mittels einer sogenannten Hand/Auge-Kalibrierung bestimmt und damit ein Bezug zwischen dem Handhabungssystem des Roboters und der Position des Sensorkopfs hergestellt. Tsai und Lenz beschreiben in [9] die Grundlagen dieser Kalibrierung. Dafür wird die exakte relative Bewegung des Roboters mit der dazugehörigen relativen Bewegung des Sensors benötigt. Während die Bewegungen des Roboters durch die integrierte Sensorik gegeben ist, lässt sich die Bewegung des Sensors bei der Kalibrierung über einen Spiegel nicht vollständig ermitteln. Da von dem Spiegel nur die Ebene π_S , jedoch nicht der Ursprung O in dieser Ebene bekannt ist, reichen die bekannten Parameter nicht aus, um auf die Transformation \mathbf{H}_{world} schließen zu können. Daher benutzen wir das Kalibrierverfahren aus [10], das ein zusätzliches Kalibrieremuster benutzt. Mit diesem letzten Schritt sind nun alle Parameter des deflektometrischen Messaufbaus bekannt und wir erhalten eine vollständige Kalibrierung des Systems. Abschließend werden noch durch Minimierung des Rückprojektionsfehlers die gewonnenen Parameter der realen Monitorposition optimiert.

Unser Ziel einer vollständigen Kalibrierung unter alleinigem Einsatz eines Kalibrierspiegels, wurde damit nur für die ersten beiden Schritte erreicht. Allerdings lässt sich das Verfahren erweitern, indem zusätzliche Marker auf dem Spiegel angebracht werden. Damit könnte dann in jeder Kalibrieraufnahme ein Bezug zum Weltkoordinatensystem (O, x, y, z) hergestellt werden, wodurch sich die Hand/Auge-Kalibrierung ebenfalls integrieren ließe. So könnten alle oben aufgeführten Kalibrierschritte mit nur einer einzigen Aufnahmeserie durchgeführt werden.

4 Ergebnisse

Wir haben unser Verfahren an realen Aufnahmeserien mit unserem deflektometrischen Aufbau getestet. Dabei variierten wir die Konstellationen und die Anzahl der Aufnahmen. Zur Bewertung wurde der berechnete Rückprojektionsfehler aus dem letzten Schritt der Kalibrierung herangezogen. Abbildung (3.3) zeigt exemplarisch die Rückprojektionsfehler

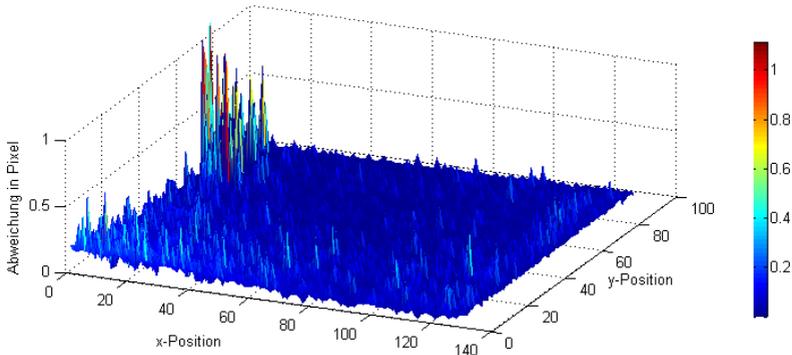


Abbildung 3.3: Rückprojektionsfehler für eine Aufnahme der vollständigen Kalibrierung. Die Grafik zeigt die Abweichung der Rückprojektion zu dem durch die Phasencodierung gemessenen Punkt für die jeweilige Bildschirmposition.

für eine Aufnahme einer Kalibriereserie. Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich bei allen Aufnahmen und bis auf wenige Ausreißer liegt die Abweichung der Rückprojektion von der zuvor gemessenen Position unter einem Pixel.

Einzelne Kalibriereserien lieferten jedoch schon im ersten Schritt unbrauchbare Ergebnisse, was auf eine ungünstig gewählte Aufnahmekonstellation zurückzuführen war. Ursache hierfür ist die Bestimmung der virtuellen Monitorebene über die Spiegelung in der Ebene. Die Spiegelung des Monitors $\pi'_{L,k}$ ist invariant gegenüber Translation oder Drehung parallel zur Spiegelebene $\pi_{S,k}$. Dies führt zu einem Verlust von Freiheitsgraden der gemessenen, virtuellen Position gegenüber der realen Position. Zusätzlich begrenzt die starre Verbindung von Monitor und Kamera die Möglichkeiten zur Variation der virtuellen Monitorpositionen. Dies kann dazu führen, dass die von Zhang in [3] gestellten Bedingungen an die Aufnahmepositionen nicht hinreichend erfüllt werden und die Kalibrierung dadurch ungenaue oder falsche Ergebnisse liefert. Es bleibt zu untersuchen, wie durch geeignete Wahl der Aufnahmepositionen ein solcher Fall degenerierter virtueller Positionen zu vermeiden ist.

5 Zusammenfassung

Wir haben ein Verfahren vorgestellt, das eine vollständige Kalibrierung eines deflektometrischen Messsystems ermöglicht. Dabei werden etablierte Verfahren erweitert und die gegebenen Möglichkeiten des Systems soweit ausgenutzt, dass zur Kalibrierung des Sensorkopfs nur ein Spiegel als Hilfsmittel benötigt wird. Durch das Zusammenführen mehrerer Kalibrierungen wird der Aufwand erheblich reduziert und darüber hinaus vermieden, dass sich Messungenauigkeiten über mehrere Kalibrierschritte hinweg akkumulieren. Durch Einsatz des Phasenschiebeprozessors lässt sich jedem Kamerasichtstrahl ein Punkt auf dem LCD-Monitor zuordnen. Dies ermöglicht zum einen den Verzicht auf spezielle Kalibriermuster und macht eine fehleranfällige Vorverarbeitung zur Mustererkennung obsolet. Außerdem wird so eine große Anzahl an Punktkorrespondenzen zwischen Kamera und LCD-Monitor gewonnen, was die Bestimmung der Monitorebene zusätzlich begünstigt. Einzig für die Hand/Auge-Kalibrierung muss auf ein herkömmliches Verfahren ausgewichen werden, wobei wir aufzeigen, wie diese sich in Zukunft auch in den Kalibriervorgang integrieren lässt.

Literatur

1. J. Bouguet, „Camera calibration toolbox for Matlab“, Microprocessor Research Labs and Intel Corp., Tech. Rep., 2003.
2. J. W. Horbach und T. Dang, „Metric projector-camera calibration for measurement applications“, in *Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology IV*, edited by Peisen S. Huang, *Proceedings of SPIE Vol. 6382*, 2006.
3. Z. Zhang, „Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations“, *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, S. 666–673, 1999.
4. J. Balzer, S. Werling und J. Beyerer, „Deflektometrische Rekonstruktion spiegelnder Freiformflächen“, *tm - Technisches Messen*, Vol. 74, Nr. 11, S. 545–552, 2007.
5. S. Werling und J. Beyerer, „Smarter Sensorkopf für das Rapid-Prototyping von automatischen Sichtprüfungssystemen für spiegelnde Oberflächen“, in *Bildverarbeitung in der Mess- und Automatisierungstechnik*, *VDI-Berichte*

- Nr. 1981, F. Puente León und M. Heizmann, Hrsg. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007, S. 237–246.
6. S. Werling, M. Mai, M. Heizmann und J. Beyerer, „Inspection of specular and partially specular surfaces“, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 16, Nr. 3, S. 415–431, 2009.
 7. G. Bradski und A. Kaehler, *Learning OpenCV*. Sebastopol, CA: O’Reilly, 2008.
 8. R. K. Kumar, A. Ilie, J.-M. Frahm und M. Pollefeys, „Simple calibration of non-overlapping cameras with a mirror“, in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008*, 2008, S. 1–7.
 9. R. Y. Tsai und R. K. Lenz, „A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, Nr. 3, S. 345–358, 1989.
 10. K. H. Strobl und G. Hirzinger, „Optimal hand-eye calibration“, in *International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing*, 2006.