

Anwendung und Auswertung von photogrammetrischen Verfahren zur Analyse von Leuchtdichtemessungen

Bleicken, J. R.¹; Faecks, N.¹; Cappitelli, M.¹; Prof. Dr. sc. nat. Schierz, C.²

¹) Airbus Group Innovations, Hamburg, DEUTSCHLAND

²) Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, DEUTSCHLAND
jan-rincke.bleicken@airbus.com

ABSTRACT

Moderne Flugzeugkabinen können mit LED-Leuchten lichttechnisch vielfältig gestaltet werden. Mittels indirekter Beleuchtung sind Lichtfarben und Intensitäten auf den Oberflächen variierbar. Soll hier überprüft werden, inwieweit ein Lichtszenario den Anforderungen entspricht, müssen für jeden Ort auf der Oberfläche die Leuchtdichte und die Farbkoordinaten gemessen und verglichen werden können.

Je nach den Reflexionseigenschaften der beleuchteten Oberflächen kann die exakte Kamerapositionierung eine entscheidende Rolle für die Vergleichbarkeit der Messungen spielen. Deshalb ist es wichtig, die Parameter der Kameraorientierung zu kennen. In diesem Paper wird beschrieben, wie Verfahren der Photogrammetrie angewandt werden können, um Erkenntnisse über die Position und Ausrichtung der Kamera zu gewinnen. Außerdem wird eine Fehleranalyse durchgeführt.

Schlagwörter: Leuchtdichtemessung, Kameraposition, Kameraorientierung, Photogrammetrie.

1 HINTERGRUND

Licht als Designelement für Flugzeugkabinen hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Durch die Beleuchtung mit modernen LED-Systemen ergibt sich die Möglichkeit vordefinierte Lichtszenarien zu erzeugen und starke örtliche Unterschiede in der Leuchtdichte und dem Farbort auf den Kabinenoberflächen zu erzeugen. Dies führt sowohl beim Flugzeughersteller als auch bei seinen Kunden zu gestiegenen Anforderungen an die Reproduzierbarkeit und Qualitätssicherung.

Zur Qualitätssicherung werden bildgebende Leuchtdichte- und Farbortsmessungen verwendet. Sollen diese Messungen wiederholt oder miteinander verglichen werden, so müssen sie aus der gleichen Kameraposition und mit der gleichen Kameraorientierung

aufgenommen werden. Insbesondere bei nicht lambertsch abstrahlenden Oberflächen ist das von Bedeutung, damit für jeden Messort der gleiche Messwinkel und damit die gleiche Orientierung der Kamera zur Abstrahlcharakteristik sichergestellt werden. Erfüllt ein Messaufbau diese Kriterien nicht, kann das zu systematischen Unterschieden in den Messergebnissen führen, die eine Bewertung erschweren.

Das im Folgenden vorgestellte Verfahren ermöglicht es, aus dem Messbild heraus und mithilfe der bekannten Objektgeometrie, die Position und Orientierung der Messkamera zu bestimmen. Es werden keine Informationen über den Messaufbau oder Messungen der Kameraposition oder Kameraorientierung benötigt.

Als Eingangsgrößen werden Punktkorrespondenzen zwischen dem 3D-Modell und dem zweidimensionalen Messbild verwendet und es müssen bestimmte Parameter der Messkamera bekannt sein. Da es einen hohen Aufwand bedeutet, diese Korrespondenzen (manuell) zu erzeugen, findet eine Fehleranalyse in Abhängigkeit von der Anzahl der Korrespondenzen statt. Auf diese Weise kann ein Kompromiss zwischen dem Aufwand für das Erstellen der Korrespondenzen und der Präzision der berechneten Kameraparameter gefunden werden.

2 LÖSUNGSANSATZ

Die gesuchten Informationen sind die Kameraposition und Kameraorientierung der Messkamera, auch äußere Orientierung genannt. Zu deren Berechnung werden Verfahren der Photogrammetrie herangezogen. Hier wird die Transformation von Objektkoordinaten (X , Y , Z) in entsprechende Bildkoordinaten (x' , y') durch die Kolinearitätsgleichungen (1) beschreiben (vergleiche Luhmann 2010):

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (1)$$

Die Parameter der Kamera sind der Bildhauptpunkt, in dem die optische Achse das Bild schneidet (x'_0 , y'_0), die Kamerakonstante (z'), die in etwa der Brennweite entspricht, und Parameter für die Verzeichnung ($\Delta x'$, $\Delta y'$). Die gesuchte Kameraposition geht als X_0 , Y_0 , Z_0 in die Gleichung ein und die gesuchte Kameraorientierung ergibt sich aus der Rotationsmatrix R (2):

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

In der Rotationsmatrix werden die drei möglichen Drehungen um die jeweiligen Achsen beschrieben: Die Drehung um die X-Achse heißt ω , φ beschreibt die Drehung um die Y-Achse und die Drehung um die Z-Achse wird mit κ bezeichnet.

Die Kamera hat die Freiheitsgrade Kamerakonstante und Bildhauptpunkt (Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene), die als bekannt vorausgesetzt werden, sowie die Bildfehler (Verzeichnung). Die oben beschriebenen Parameter werden innere Orientierung genannt und können zum Beispiel mit dem Ansatz von Tsai (1986) bestimmt werden.

Die Kameraposition und Kameraorientierung haben jeweils drei Freiheitsgrade (Ortskoordinaten X_0, Y_0, Z_0 und Drehwinkel ω, φ, κ), zusammen bilden sie die Parameter der äußeren Orientierung. Zu ihrer Bestimmung werden zwei Verfahren bewertet, beide sind in der Programmbibliothek OpenCV (2014) implementiert. Das erste Verfahren ist iterativ. Hier wird die äußere Orientierung optimiert, sodass die Summe der quadrierten Abstände von den Bildpunkten zu den entsprechenden projizierten Punkten auf der Bildebene minimiert wird. Zur Berechnung der projizierten Punkte werden die Kolinearitätsgleichungen verwendet.

Das zweite, nicht-iterative Verfahren beruht auf der Methode von Moreno-Noguer et. al. (2009). Hier wird die äußere Orientierung durch das Lösen des überbestimmten Gleichungssystems berechnet, welches sich aus den Kolinearitätsgleichungen und den Punktkorrespondenzen ergibt. Nicht-iterative Verfahren gelten im Allgemeinen als schneller, sollen aber eine geringere Präzision gegenüber iterativen Verfahren haben. Des Weiteren wird bei iterativen Verfahren ein initialer Schätzer benötigt, der eventuell durch Messungen oder Kenntnis des Messaufbaus gewonnen werden muss. Die Kombination beider Verfahren ermöglicht es, einerseits den Schätzer durch ein nicht-iteratives Verfahren zu berechnen und andererseits die Präzision der iterativen Berechnung zu erreichen.

3 AUSWERTUNG

Beide Algorithmen benötigen mindestens vier Korrespondenzen zwischen Objektkoordinaten und Bildkoordinaten. Um die Stabilität der Algorithmen beurteilen zu können, werden aus 36 zuvor definierten Korrespondenzen eine bestimmte Anzahl n ($4 \leq n \leq 10$) ausgewählt und den Algorithmen übergeben. Als Korrespondenzen bieten sich markante Punkte an, die sowohl im Messbild als auch im 3D-Modell gefunden werden können (Abbildung 1). Für jede Anzahl n werden 50 Gruppen definiert. Die Zusammenstellung jeder Gruppe ist zufällig unter den Voraussetzungen, dass eine Korrespondenz nicht mehrfach in derselben Gruppe verwendet werden darf und dass jede Korrespondenz etwa gleichhäufig vorkommen muss.

Gelöst wird die Verteilungsaufgabe mit der Permutation der Korrespondenzen. Die Reihenfolge wird zufällig vertauscht und es werden zwischen neun ($=36/4$) und drei ($=36/10$) Gruppen mit jeweils vier bis zehn Korrespondenzen zusammengestellt. Dies wird solange wiederholt, bis jeweils 50 Gruppen definiert sind. Diese 7×50 Gruppen werden verwendet, um mit dem nicht-iterativen, dem iterativen und der Kombination beider Verfahren, die

äußere Orientierung der Messkamera zu berechnen. Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet.

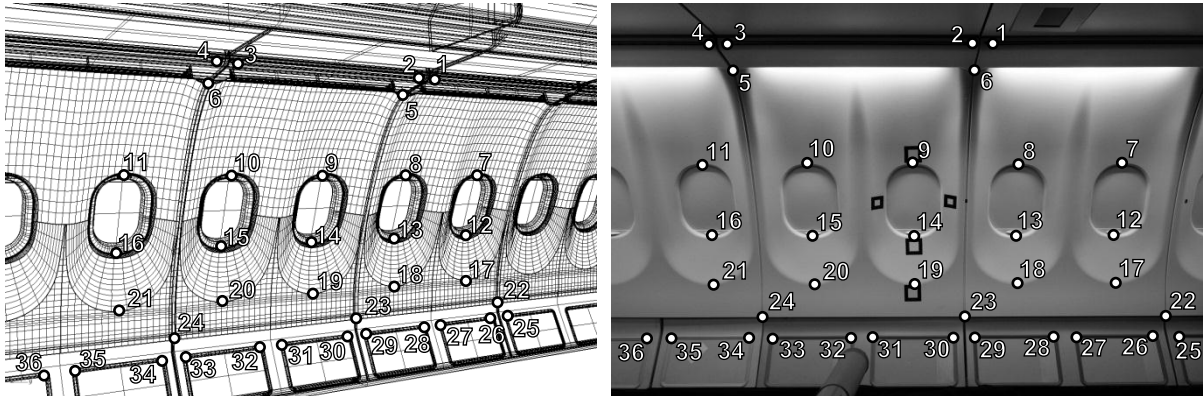


Abbildung 1: 3D-Modell und Leuchtdichtemessung mit markierten Punktkorrespondenzen

4 ERGEBNISSE

Aus den Ergebnissen werden die Standardabweichung für die X-, Y- und Z-Richtung und die drei Rotationswinkel ω , φ und κ bestimmt. Die Mittelwerte der Standardabweichung sind in Abbildung 2 für die jeweiligen Algorithmen gegenüber der Anzahl der Korrespondenzen dargestellt.

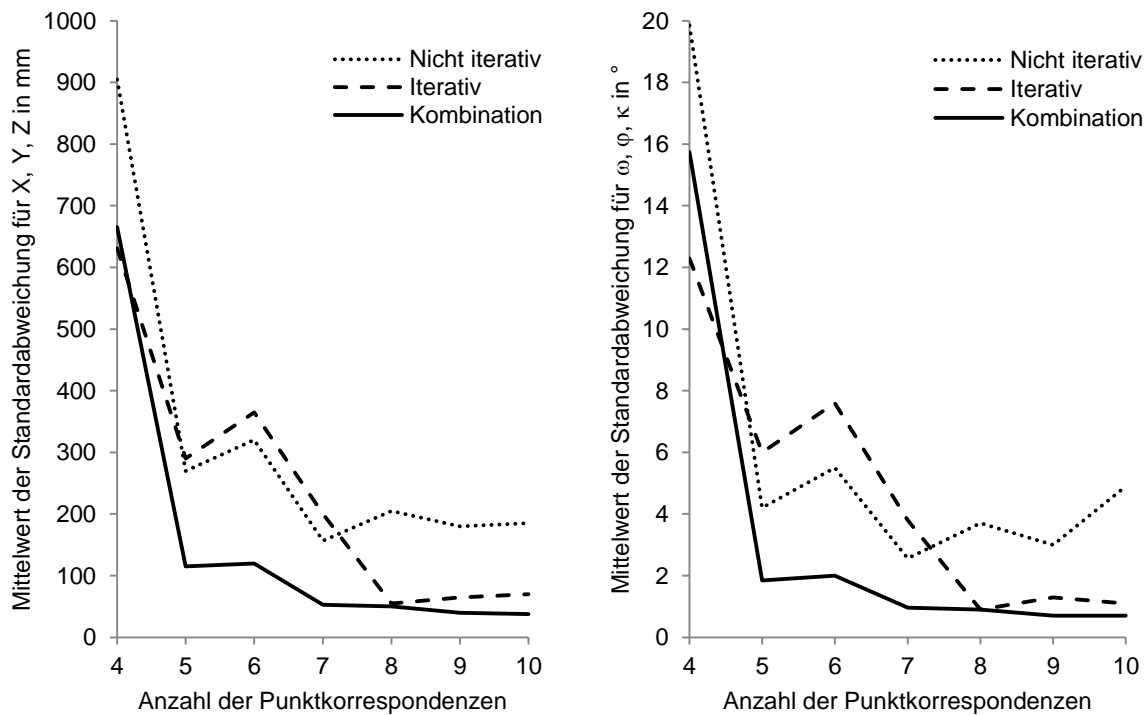


Abbildung 2: Standardabweichung nach Anzahl der Punktkorrespondenzen

Es zeigt sich sowohl, dass der kombinierte Ansatz deutlich besser ist als die beiden einzelnen, als auch, dass mehr Korrespondenzen zu besseren Ergebnissen führen: Die Streuung fällt schon bei fünf dramatisch, nimmt aber bei mehr als sieben Korrespondenzen kaum noch ab. Für die Berechnung der äußeren Orientierung eignet sich also der kombinierte Ansatz am besten und für eine manuelle Bestimmung reichen fünf bis sieben Punktkorrespondenzen.

Wo für den kombinierten Ansatz und vier Punktkorrespondenzen die Standardabweichungen bei der Positionsberechnung noch bei durchschnittlich 665 mm liegen und die Orientierung knappe 16° aufweist, liegen bei sieben benutzten Korrespondenzen die Standardabweichungen auf den Raumachsen nur noch zwischen 40 und 75 mm und die Standardabweichungen für die Winkel verringern sich von durchschnittlich 16° auf nur noch 0,33° bis 1,7° (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Der Ursprung dieser Ungenauigkeiten kann unter anderem in Abweichungen zwischen 3D-Modell und realer Umgebung liegen, auch können Abweichungen bei der Bestimmung der Punktkorrespondenzen oder Abweichungen der realen Kamera vom idealen Modell zu Ungenauigkeiten führen.

Tabelle 1: Standardabweichung bei 4 Korrespondenzen

	Nicht-iterativ	Iterativ	Kombination
ω	32.13°	17.99°	27.40°
φ	14.81°	12.63°	9.01°
κ	12.61°	6.24°	10.82°
Mittelwert	19.85°	12.29°	15.74°
X	623.5mm	594.4mm	340.5mm
Y	1070.9mm	746.2mm	643.9mm
Z	1019.6mm	553.6mm	1011.7mm
Mittelwert	904.7mm	631.4mm	665.4mm

Tabelle 2: Standardabweichung bei 7 Korrespondenzen

	Nicht-iterativ	Iterativ	Kombination
ω	3.83°	5.31°	1.69°
φ	3.33°	3.73°	0.88°
κ	0.53°	2.36°	0.33°
Mittelwert	2.56°	3.80°	0.97°
X	164.0mm	131.1mm	43.6mm
Y	178.1mm	214.8mm	75.2mm
Z	128.3mm	254.2mm	40.0mm
Mittelwert	156.8mm	200.0mm	52.9mm

Die absoluten Ergebnisse für die Berechnung der X-Position und des Winkels ω werden in Abbildung 3 gezeigt. Zur besseren Übersicht wird hier nur das kombinierte Verfahren ausgewertet. Aufgetragen sind links die Mittelwerte der 50 Resultate in X-Richtung, rechts

die Mittelwerte für den Winkel ω . Zusätzlich sind als gestrichelte Linien die Mittelwerte plus beziehungsweise minus der Standardabweichungen eingetragen. Die Mittelwerte in X-Richtung pendeln um einen Wert von 2400 mm, das entspricht dem Erwartungswert aus der mit einem Maßband vermessenen Kameraposition. Die eingestellte Orientierung der Messkamera war so, dass alle Winkel gegen null gehen sollten, allerdings ist dies in der Realität deutlich schwieriger einzustellen als die Position, da eine Referenz, gegen die gemessen werden kann, fehlt. Hier liegt der Mittelwert aller Berechnungen bei ca. -1° .

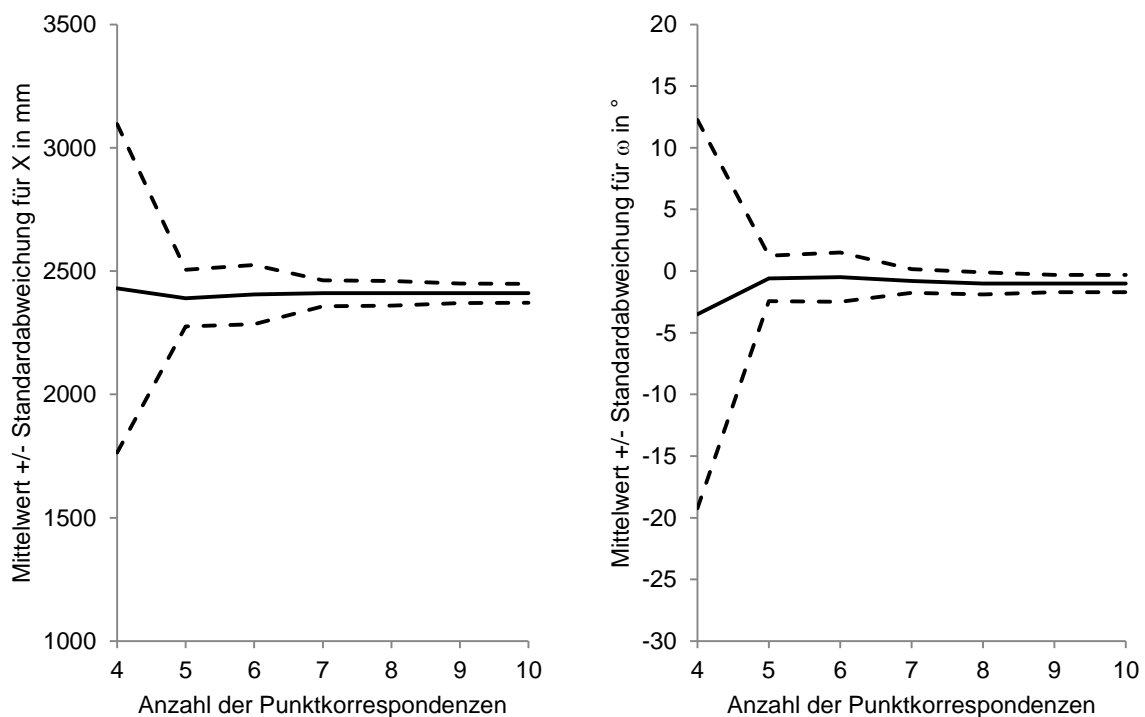


Abbildung 3: Absolutwert +/- Standardabweichung für das kombinierte Verfahren nach Anzahl der Punktkorrespondenzen

5 AUSBLICK

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bestimmung der äußeren Orientierung einer bildgebenden Messkamera mithilfe inhärenter Größen und der bekannten Objektgeometrie möglich ist. Im vorgestellten Verfahren werden keine zusätzlichen Messungen der Position oder Ausrichtung benötigt. Gegebenenfalls kann das Verfahren also auch noch nach erfolgter Messung angewandt werden. Hinzu kommt, dass in der Praxis vor allem die Ausrichtung oft nicht präzise zu bestimmen ist, da Referenzen für Winkelmessungen nicht immer verfügbar sind. Auch hier können die photogrammetrischen Verfahren Vorteile bringen.

QUELLEN

- Luhmann, T. (2010). Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Berlin: Wichmann, 4. Auflage, 668 Seiten.
- Moreno-Noguer, F., Lepetit, V., Fua, P., (2009). Accurate Non-Iterative $O(n)$ Solution to the PnP Problem, *International Journal of Computer Vision*, 81(2), 155-166.
- OpenCV (Open Source Computer Vision), (2014). Abrufbar online unter <http://opencv.org/>, zuletzt aufgerufen im Juli 2014.
- Tsai, R. Y. (1986): An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 364–374.