

Genauigkeit der inversen Navigation bei hoher Passpunktsichtbarkeit zur Absolutpositionierung eines geführten Messsystems

THOMAS DARR¹, CARSTEN GÖTZ¹, SEBASTIAN TUTTAS¹, TOBIAS BECKER² & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: Im Beitrag wird die Genauigkeit in der Bestimmung der äußeren Orientierung einer Einzelkamera durch räumlichen Rückwärtsschnitt in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter in einer fiktiven Messumgebung untersucht. Darauf aufbauend wird ein Multi-Kamerasystem betrachtet, das mit vier im 90°-Winkel zueinander montierten Kameras mehrere Raumrichtungen beobachtet. In einem praktischen Versuch mit dem Multi-Kamerasystem werden die realen Abweichungen der äußeren Orientierung bestimmt und mit den theoretisch erreichbaren Genauigkeiten verglichen. Während die Simulation Abweichungen im Bereich unter einem Zehntel Millimeter in der Position liefert, zeigt der praktische Versuch um bis zum Faktor fünf höhere Abweichungen. Der Grund hierfür liegt in der beim praktischen Versuch eingeschränkten Sichtbarkeit von Referenzpunkten.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Bei der Produktion in der Automobilindustrie nimmt die Qualitätskontrolle einen hohen Stellenwert ein. Zur Geometriemessung werden neben Koordinatenmessmaschinen zunehmend photogrammetrische 3D-Messsysteme verwendet. Diese besitzen den Vorteil, dass sie 3D-Informationen flächenhaft erfassen. Im Projekt „MultiGO“ (Multifunktionale Messzelle zur Geometrie- und Oberflächenprüfung), an dem die Bayerische Forschungsstiftung, die BMW Group, das Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München und die Steinbichler Optotechnik GmbH beteiligt sind, wird mit Hilfe eines optischen Messensors die Geometrie von Fahrzeugteilen überprüft. Derzeit wird dafür ein aufwendiger Rahmen um das Messobjekt konstruiert, der die photogrammetrische Verknüpfung der Einzelaufnahmen erlaubt. Bei „MultiGO“ ist es ein Teilziel durch inverse Navigation diesen individuellen Kulissenaufbau zu reduzieren und stattdessen ein globales Referenzpunktfeld zu verwenden. Abb. 1 zeigt den Aufbau der Messzelle, in der an der Wand die Referenzpunkte angebracht sind. Die Orientierung des Messensors wird mit Hilfe dieser bestimmt.

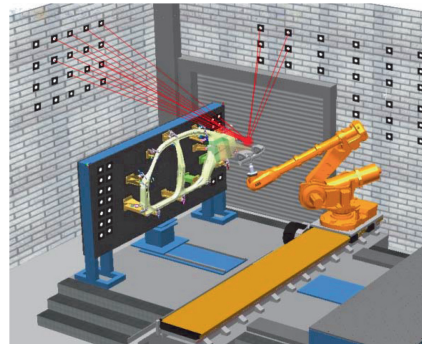


Abb. 1: Aufbau der Messzelle

1) Photogrammetrie & Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, <http://www.pf.bv.tum.de>

2) BMW AG, Petuelring 130, 80788 München

Die Schwierigkeit in der Umsetzung dieses Konzepts besteht in den hohen Anforderungen an die Orientierungsgenauigkeit des Sensors. Außerdem muss die Genauigkeit der angebrachten Referenzpunkte, z. B. an Wand und Boden, über lange Strecken und Zeit gewährleistet werden. Um eine hohe Genauigkeit zu erreichen wird ein aus vier Kameras bestehendes Kamerasystem verwendet. Dieses blickt in vier verschiedene Raumrichtungen, um möglichst viele Referenzpunkte erfassen zu können.

1.2 Verwandte Arbeiten

In LUHMANN (2009) wurden die sechs Freiheitsgrade der äußeren Orientierung und deren Genauigkeiten von einem Objekt (Lokator) innerhalb eines Referenzsystems mit Hilfe einer Kamera bestimmt. Im Gegensatz zur hier vorliegenden Arbeit, bei der die Genauigkeit der Kameraposition und -orientierung von Interesse ist, liegt der Schwerpunkt der Untersuchung in der Genauigkeit der Lokatorposition. Diese Methode findet z.B. Anwendung bei der Crashtest-Analyse. FRAHM et al. (2004) untersuchten ein Multi-Kamerasystem, welches eine feste und bekannte Anordnung der Kameras aufweist, sodass die relativen Orientierungen dieser Kameras berechnet werden können. Bei MUHLE et al. (2008) wurde ein ähnliches Themengebiet behandelt: Es wurden zwei fest verbundene Stereokamerasysteme untersucht, die sich starr im Raum bewegen. Die letzten beiden Ansätze gehen nicht näher auf die erreichbare Genauigkeit im industriellen Umfeld ein. GÖTZ et al. (2011) evaluierten mehrere Konfigurationen von Kamera und Referenzpunkten, um die in der Industrie geforderten Genauigkeiten zu erhalten. Ebenso wie GÖTZ et al. (2011) ist das Ziel dieser Arbeit, dass die Genauigkeit der Kameraorientierung den Anforderungen der industriellen Fertigung genügen soll. Im Gegensatz zu HANEL et al. (2013) wird in diesem Beitrag die Grenzleistung des Multi-Kamerasystem im dichten Referenzpunktfeld des Außenraums untersucht.

2 Methodik

In dem vorliegenden Beitrag wird zuerst die Genauigkeit einer Kameraorientierung bei Variation der beeinflussenden Größen (siehe Abschnitt 3) untersucht. Darauf aufbauend wird die Genauigkeit eines Multi-Kamerasystems betrachtet. Die Vorgehensweise für die theoretischen Untersuchungen ist folgende:

1. Betrachten eines Referenzpunktfeldes
2. Berechnen der Bildpunkte aus den sichtbaren Referenzpunkten
3. Berechnung der äußeren Orientierung und deren Genauigkeit durch den räumlichen Rückwärtsschnitt

2.1 Einzelkamera

Als Ansatz für den räumlichen Rückwärtsschnitt werden die *Kollinearitätsgleichungen* als Verbesserungsgleichungen nach einer vermittelnden Ausgleichung verwendet. Da die Koordinaten der Referenzpunkte nicht fehlerfrei bestimmt werden können, werden diese zusätzlich in die Ausgleichung eingeführt. Es wird die Notation nach KRAUS (1996) verwendet:

$$\begin{aligned}
 x'_i + \hat{v}_{x'_i} &= x'_0 - c \cdot \frac{\hat{r}_{11} \cdot (\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{21} \cdot (\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{31} \cdot (\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13} \cdot (\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23} \cdot (\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33} \cdot (\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)} \\
 y'_i + \hat{v}_{y'_i} &= y'_0 - c \cdot \frac{\hat{r}_{12} \cdot (\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{22} \cdot (\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{32} \cdot (\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13} \cdot (\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23} \cdot (\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33} \cdot (\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)} \\
 X_i + \hat{v}_{X_i} &= \hat{X}_i \\
 Y_i + \hat{v}_{Y_i} &= \hat{Y}_i \\
 Z_i + \hat{v}_{Z_i} &= \hat{Z}_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

Für das stochastische Modell wird im Weiteren von unkorrelierten Beobachtungen n ausgegangen. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen \mathbf{Q}_{bb} entspricht somit einer $n \times n$ -Diagonalmatrix. In diesem Abschnitt werden die quadrierten Standardabweichungen, die an die Bild- und Referenzpunkte angebracht werden, als Varianzen auf der Hauptdiagonale eingesetzt. In Abschnitt 2.2 werden die gegebenen Varianzen der Referenzpunkte verwendet. Ausgehend vom Funktionalmodell (1) können die auf die Genauigkeit der äußeren Orientierung einflussnehmenden Größen identifiziert werden. Die unmittelbar in den Gleichungen vorkommenden Größen sind die Kamerakonstante c , die Bildpunkte x' , y' und die Referenzpunkte (X, Y, Z) . Bei den Bild- und Referenzpunkten spielt sowohl die Anzahl der sichtbaren Punkte, als auch deren Genauigkeit eine Rolle. Ebenso kommen in den Gleichungen die Translationsparameter der äußeren Orientierung (X_0, Y_0, Z_0) direkt vor. Es kann also der Abstand der Kamera zur Referenzpunktebene betrachtet werden. In Abschnitt 3 wird der Einfluss der Kamerakonstanten c näher untersucht.

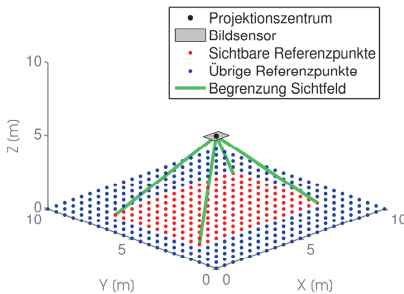


Abb. 1: Virtuelle Messzelle zur Untersuchung der Orientierungsgenauigkeit einer Kamera

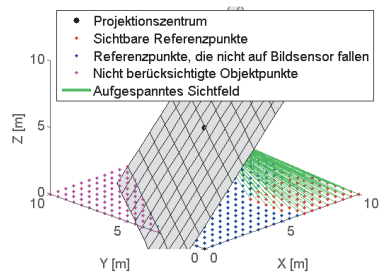


Abb. 2: Aufnahmesituation zur Berechnung der Bildpunkte

Für diese Untersuchungen wird eine virtuelle Messzelle (siehe Abb. 2) verwendet. Die Parameter für die Position, das Sichtfeld der Kamera, die Anzahl der sichtbaren Referenzpunkte, etc. sind bei den folgenden Betrachtungen nicht fest, sondern werden je nach Abhängigkeit der Kamerakonstanten c verändert.

Die Kamera in Abb. 2 blickt senkrecht nach unten auf ein Referenzpunktfeld in gleichmäßigem Raster. Die grünen Linien markieren die Eckpunkte des Kamerasichtfeldes, in dem die rot darge-

stellen Punkte auf den Bildsensor (graues Rechteck) fallen. Im Gegensatz zu Abb. 1 ist hier eine ideale Messkonfiguration dargestellt.

In Abb. 3 ist die Berechnung der Bildpunkte aus den vorhandenen Referenzpunkten dargestellt. Diese wird benötigt, falls das Punktfeld nicht senkrecht betrachtet wird, was in der Realität der Normalfall ist. Mit Hilfe der *Hesse'schen Normalform* der Bildebene können diejenigen Referenzpunkte identifiziert werden, die – bezogen auf den Koordinatenursprung – auf der gleichen Seite der Ebene wie das Projektionszentrum liegen. Abb. 3 zeigt die vorgenommene Einteilung der Referenzpunkte, die nicht auf den Bildsensor fallen (in Magenta dargestellt) und von der Berechnung der Bildpunkte ausgeschlossen werden. Die Koordinaten der Referenz- und Bildpunkte müssen somit zuerst berechnet werden, um in das Funktionalmodell (1) eingeführt werden zu können.

2.2 Multi-Kamerasystem

Nun wird das System von einer einzelnen Kamera zu einem Multi-Kamerasystem erweitert. Durch Messung mit mehreren Kameras kann der Raum in mehreren Raumrichtungen beobachtet werden. Kennt man die einzelnen Positionen der Kameras zueinander, kann eine höhere Genauigkeit der Position des Gesamtsystems durch Ausnutzung der Redundanz erreicht werden. Für die Berechnung der Orientierung des Gesamtsystems wird das Koordinatensystem einer Kamera als Referenzkoordinatensystem gewählt.

Um Aussagen über die Orientierungsgenauigkeit des Multi-Kamerasystems entlang ihres Messpfades zu erhalten, wird folgendermaßen vorgegangen: Als erstes werden die Positionen und Ausrichtungen der Kameras in einem Modellkoordinatensystem relativ zur Referenzkamera definiert. Mit Hilfe der vorgegebenen Orientierungen (=Messpfad) der Referenzkamera im übergeordneten Referenzkoordinatensystem können sämtliche Kameras in dieses transformiert werden. Zur Vereinfachung werden die Positionen im Referenzkoordinatensystem als fehlerfrei angesehen. Das transformierte Modellkoordinatensystem entspricht somit den Sollwerten in der später folgenden *bedingten Ausgleichung*. Die äußere Orientierung einer einzelnen Kamera berechnet sich nach der in Abschnitt 2.1 dargestellten Methode. Im Gegensatz zur simulierten Messzelle sind die Standardabweichungen der Referenzpunkte fest vorgegeben. Die Ergebnisse (Istwerte) werden mit den bekannten Orientierungen im Referenzkoordinatensystem (Sollwerte) anschließend als Beobachtungen in das Funktionalmodell (2) eingeführt, wobei nur die Translationen benötigt werden. Es werden nur diejenigen Kameras berücksichtigt, die mindestens vier Referenzpunkte sehen und sich somit mit Hilfe der Ausgleichungsrechnung positionieren können. Das allgemeine Funktionalmodell lautet:

$$\hat{\mathbf{X}}_{0_{KRJ}} - \hat{\mathbf{X}}_{0_{KIJ}} - (\mathbf{X}_{0_{KR,S}} - \mathbf{X}_{0_{KI,S}}) = \mathbf{0}$$

mit

$i = 2 \dots n$ Kameras

I = Istwerte

S = Sollwerte

K = Kamera

R = Referenzkamera

(2)

3 Theoretische Untersuchungen zu den Einzelkameras

Für die Simulation werden die Parameter an den praktischen Versuch (Abschnitt 4.2) angelehnt. So wurde die Abmessung des Sensors in der Breite zu 8,8 mm und in der Höhe zu 6,6 mm gewählt. Die Referenzpunkte sind frei gewählt und fehlerfrei. Durch die mathematische Abbildung durch die *Kollinearitätsgleichungen* dieser auf den Bildsensor sind die Bildpunkte ebenfalls fehlerfrei. Um eine realistische Situation für die Bild- und Referenzpunkte zu schaffen, werden diese mit künstlichen und zufälligen Standardabweichungen versehen. Die typische Standardabweichung beträgt für die Referenzpunkte 0,1 mm und für die Bildpunkte 0,5 μm . Um generelle Aussagen zu machen, werden mehrere Durchläufe gerechnet und das Ergebnis über diese gemittelt.

3.1 Kamerakonstante c bei veränderlichem Bildmaßstab

Es wird untersucht, wie sich die Genauigkeit der Kameraorientierung verhält, wenn die Kamerakonstante c im Bereich von 6 mm bis 20 mm variiert. Da nur die Kamerakonstante verändert wird und die räumliche Position der Kamera gleich bleibt, ändert sich zwangsläufig der Bildmaßstab M .

Bei zunehmender Kamerakonstante wird der Bildausschnitt kleiner und somit können weniger Punkte gesehen werden. Damit die Anzahl der beobachteten Referenzpunkte die Untersuchungsbedingungen nicht verändern, wird als Zwischenschritt mit der Kamera ein Testpunktfeld verwendet. Anschließend werden die gerade noch sichtbaren Referenzpunkte an den Ecken des Feldes identifiziert und es wird ein neues Punktfeld mit gleich vielen Referenzpunkten aufgespannt. Die Abstände der Referenzpunkte variieren hierbei je nach Größe des Kamerasichtfeldes, d. h. bei größerer Kamerakonstante werden die Abstände kleiner.

Mit Hilfe dieser neu gesetzten Referenzpunkte werden nun durch die *Kollinearitätsgleichungen* die entsprechenden Bildpunkte berechnet. Die Bild- und Referenzpunkte werden nach dem Funktionalmodell (1) als Beobachtungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen verwendet.

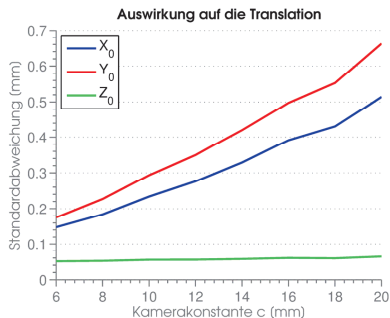


Abb. 3: Auswirkung auf die Translation bei variierender Kamerakonstante und veränderlichem Bildmaßstab

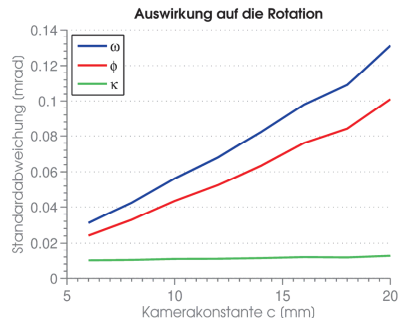


Abb. 4: Auswirkung auf die Rotation bei variierender Kamerakonstante und veränderlichem Bildmaßstab

Die Abb. 4 und Abb. 5 zeigen, dass die Genauigkeit bei zunehmender Kamerakonstante abnimmt. Die Blickrichtung der Kamera in Richtung der Z-Achse bewirkt, dass die Standardabweichung der Translation in dieser Richtung bereits sehr gering ist und kaum von einer größer werdenden Kamerakonstante beeinflusst wird. Durch die Aufnahmerichtung folgt auch, dass sich der Rotationswinkel κ analog zu Z_0 verhält. Die Standardabweichungen der übrigen Parameter steigen bei größerer Kamerakonstante nahezu linear an. Grund hierfür ist der bereits erwähnte kleiner werdende Abstand der betrachteten Referenzpunkte. Die Strahlen, welche die Referenzpunkte mit dem Projektionszentrum verbinden, schneiden sich bei kleinerem Sichtfeld zunehmend schleifend. Dadurch sinkt die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Kamera. Auf die Genauigkeit der Rotationswinkel ω und φ wirkt sich das kleiner werdende Sichtfeld ebenfalls negativ aus: Die geringe räumliche Ausdehnung der Referenzpunkte – und damit auch der Bildpunkte auf dem Sensor – erlaubt keine genauere Bestimmung der Kameraorientierung. Durch die Sensorabmessungen bedingt, verhalten sich die Translation in X- und Y -Richtung leicht unterschiedlich. Die Abstände in X-Richtung sind größer als in Y-Richtung, sodass erstere etwas besser bestimmt wird. Die Rotationswinkel verhalten sich zur Translation umgekehrt.

3.2 Kamerakonstante c bei konstantem Bildmaßstab

Der Einfluss des Bildmaßstabs wird nun eliminiert, indem die Position des Projektionszentrums in Abhängigkeit der Kamerakonstante verändert wird.

Mit Hilfe der *Hesse'schen Normalform* kann der Abstand des Projektionszentrums zur Referenzpunktebene bestimmt werden. Dadurch kann der Bildmaßstab für jede Kamerakonstante abgeleitet werden. Mit der Wahl eines Referenzmaßstabs, dem Lotfußpunkt des Projektionszentrums auf der Ebene und dem normierten Normalenvektor der Ebene wird das Projektionszentrum in Abhängigkeit der Kamerakonstante verschoben. Im vorliegenden Fall blickt die Kamera exakt senkrecht auf das Punktfeld, sodass die Kamera in Richtung der positiven Z-Achse verschoben werden kann. Dadurch werden in jeder Position gleich viele Referenzpunkte gesehen.

Anschließend werden analog zu Abschnitt 3.1 die Genauigkeiten der Translation und Rotation berechnet.

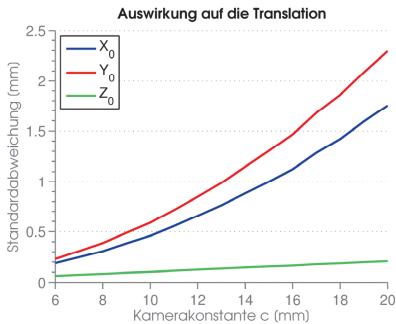


Abb. 5: Auswirkung auf die Translation bei variierender Kamerakonstante und gleichem Bildmaßstab

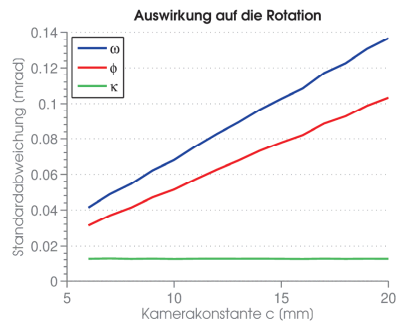


Abb. 6: Auswirkung auf die Rotation bei variierender Kamerakonstante und gleichem Bildmaßstab

Als Ergebnis für die Orientierungsgenauigkeiten erhält man die Plots in Abb. 6 und Abb. 7. Die Standardabweichungen zeigen auf den ersten Blick ein ähnliches Ergebnis wie in Abb. 4 und Abb. 5. Die Translation in X- und Y-Richtung steigt bei zunehmender Kamerakonstante, wohingegen die Translation in Z-Richtung sehr gut bestimmt wird und beinahe unabhängig von der Variation der Kamerakonstante ist. Der Grund für das Verhalten der Translation in Z ist ebenfalls derselbe wie bei der Variation der Kamerakonstante c mit veränderlichem Bildmaßstab. Die Standardabweichung der Rotationswinkel steigt auch beinahe linear mit erhöhter Kamerakonstante an. Die Genauigkeit der Translationsparameter sinkt quadratisch bei einer größeren Kamerakonstante.

Weitwinkelobjektive mit geringer Kamerakonstante haben somit einen Vorteil bei der Orientierungsbestimmung.

4 Untersuchungen zum Multi-Kamerasystem

4.1 Vorgehensweise

Es wird eine bestimmte Anordnung der Kameras auf dem Multi-Kamerasystems ausgewählt, anhand einer Simulation näher untersucht und durch einen praktischen Versuch in einer Messzelle im BMW-Werk München evaluiert.

Bei den Untersuchungen zum Multi-Kamerasystem werden die Koordinaten einer Referenzkamera im übergeordneten Koordinatensystem vorgegeben. Anhand dieses gegebenen Messpfades wird eine Anordnung der Kameras in 90° -Winkeln hinsichtlich der Orientierungsgenauigkeit betrachtet. Die Umgebung, in der das Kamerasystem untersucht wird, ist eine virtuelle Messzelle, die an die Gegebenheiten der Messzelle im BMW-Werk München angepasst wurde und in der die Referenzpunkte frei gewählt wurden. Zur Vereinfachung werden in der Messzelle keine Verdeckungen berücksichtigt.

4.2 Versuchsaufbau

Die praktischen Untersuchungen für diese Arbeit wurden in einer Messzelle im BMW-Werk München durchgeführt. Der Aufbau der Messzelle ist in Abb. 8 dargestellt. Am Flansch eines Industrieroboters wurde für diesen Versuch ein maßstabs- und detailgetreuer Gehäusedummy des für das Projekt „MultiGO“ entwickelten Sensorsystems der Firma Steinbichler Optotechnik GmbH verwendet. Auf die Oberseite des nachgebildeten Sensors wurden vier Kameras angebracht. Drei Kameras verwenden Objektive mit einer Kamerakonstante von $c = 6,1$ mm, die vierte Kamera besitzt ein Objektiv mit $c = 8$ mm. Die Anordnung der Kameras ist in Abb. 10 dargestellt. Im Innern des Dummys befinden sich die Stromversorgung der Kameras sowie die Datenübertragung der Bilder per LAN zu einem Laptop.

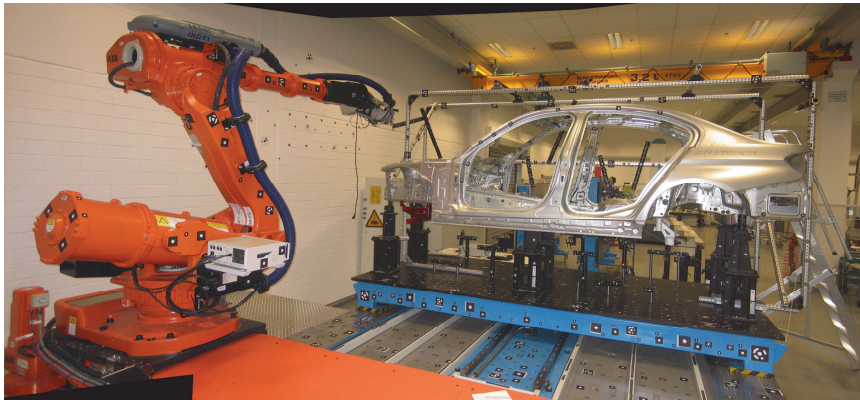


Abb. 7: Aufbau der Messzelle des praktischen Versuchs

Als Vorbereitung für die eigentliche Messung wurden eine Kalibrierung aller vier Kameras, eine photogrammetrische Einmessung der Referenzpunkte im Referenzkoordinatensystem der Messzelle und eine Optimierung der Schärfentiefe (Fokussierung) der Kameras mit Hilfe des Siemenssterns durchgeführt.

Nachdem nun diese vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen wurden, konnte der Versuch durchgeführt werden. Insgesamt wurden 18 Positionen im Außenraum der Karosserie (siehe Polygon Abb. 9) angefahren. Zum einen sind im Außenraum kaum (z.B. durch den Roboterarm) Verdeckungen vorhanden, zum anderen können durch die Ausrichtung der Kameras in vier Raumrichtungen auch Punkte auf der gegenüberliegenden Seite der Messzelle gesehen werden. Die Positionen wurden ausgewählt, da der Geometriesensor an diesen Stellen geometrische Eigenschaften der Karosserie (z.B. Löcher) vermisst.

Die Auswertung des Versuchs liefert die äußeren Orientierungen des Kamerasystems an den Messpositionen, sowie die zugehörigen Genauigkeiten.

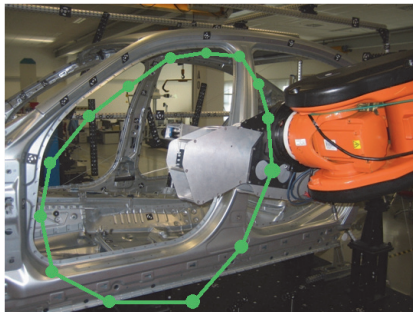


Abb. 8: Messpfad entlang der Karosserie

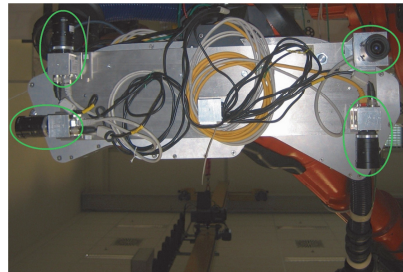


Abb. 9: Anordnung der Kameras (grün eingekreist) auf dem Sensordummy

4.3 Ergebnisse

In Abschnitt 3 wurde das Verhalten der Orientierungsbestimmung bei Variation der beeinflussenden Größen einer einzelnen Kamera untersucht. Nun werden die Untersuchungen auf ein Mehrkamerasystem erweitert. Die Blickrichtungen von vier Kameras werden mit 90°-Winkeln zueinander montiert (siehe Abb. 10). Durch diese Anordnung soll für die dreidimensionale Messzelle eine möglichst hohe überlappungsfreie Abdeckung erreicht werden. Um Genauigkeiten für die Position des Kamerasystems in Bezug auf eine Referenzkamera zu erhalten, entspricht der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Vorgehensweise.

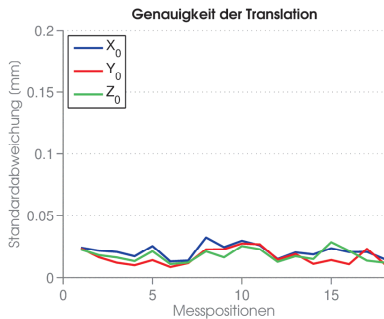


Abb. 10: Theoretische Translationsgenauigkeit des Kamerasystems an den Messpositionen

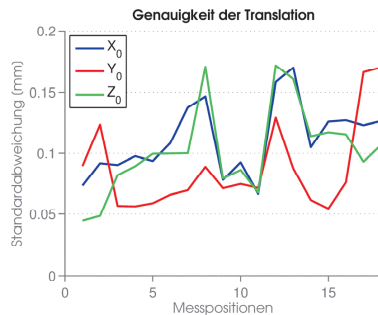


Abb. 11: Translationsgenauigkeit des Kamerasystems im praktischen Versuch

Der Vorteil dieser Konfiguration (siehe Abb. 11) ist, dass die Genauigkeit der Translation mit der des praktischen Versuchs (siehe Abb. 12) verglichen werden kann. Die Größenordnung der Genauigkeiten der Translation des simulierten Kamerasystems ist um den Faktor 3-5 besser als beim praktischen Versuch. Der primäre Grund hierfür ist die vorgenommene Vereinfachung, dass keine Verdeckungen berücksichtigt werden. Im praktischen Versuch ist die Sicht der Kameras durch Objekte eingeschränkt: Die erste Kamera schaut beispielsweise an der zwölften Messposition (siehe Abb. 11 und Abb. 12) von oben auf das Messobjekt. Es ist ersichtlich, dass die Referenzpunkte, die unter dem Fahrzeug auf der Messplatte befestigt sind, nicht gesehen werden können. In der gerechneten Simulation ist dies jedoch möglich, sodass die Ausgleichung zur Bestimmung der Translationsgenauigkeit eine höhere Redundanz hat. Ferner wird im praktischen Versuch ebenfalls der Translationsparameter Y_0 an den Zwischenpositionen am besten bestimmt. Es zeigen sich jedoch auch Unterschiede: Während bei der simulierten Translationsgenauigkeit die Standardabweichungen in der 12. Position sinken, steigen diese im praktischen Versuch, durch die fehlende Orientierung der 4. Kamera an. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Daten des Versuchs mit einer kommerziellen Software (AICON 3D STUDIO) ausgewertet wurden. Die genaue Auswertemethode ist unbekannt, es kann beispielsweise für die Ausgleichung des Gesamtsystems ein anderes Funktionalmodell verwendet worden sein. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Fehler der Bildpunkte nicht zufällig hinzugefügt werden. Während bei den Versuchen zufällige Fehler zu den Bildpunkten hinzugefügt werden, sind diese Zuschläge bei der Software nicht bekannt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den Untersuchungen der Einzelkamera hat sich mit Variation der Kamerakonstante gezeigt, dass kleinere Kamerakonstanten eine höhere Genauigkeit erreichen. Weitwinkelobjektive haben somit einen Vorteil bei der Orientierungsbestimmung. Die Anordnung der Kameras beim Multi-Kamerasystem wurde so gewählt, dass sie einen guten Vergleich mit dem praktischen Versuch bietet. Es hat sich gezeigt, dass bei der Simulation die Positionsbestimmung im Bereich unter einem zehntel Millimeter möglich ist. Jedoch werden dabei keine Verdeckungen berücksichtigt, welche das Ergebnis deutlich verschlechtern. Um diesen Einfluss zu verringern, kann untersucht werden, ob z.B. ein kleineres Bauteil, das weniger Referenzpunkt verdeckt, eine Verbesserung der Genauigkeit der Orientierungsparameter bewirkt. Weiterhin könnte bei kleineren Bauteilen eine kleinere Messzelle die Homogenität des Referenzpunktfeldes verbessern.

6 Danksagung

Das Projekt „MultiGO“ wurde von der Bayerischen Forschungsstiftung (AZ-876-09) gefördert. Die Autoren bedanken sich bei der BMW AG, Werk München, für die freundliche Unterstützung zur Durchführung der Messung in der Messzelle. Unser Dank gilt auch Herrn Gericke und Herrn Meyer von der Firma Steinbichler Optotechnik GmbH, Neubeuern, für die Bereitstellung von Hardware.

7 Literaturverzeichnis

- FRAHM, J.-M.; KÖSER, K.; KOCH, R., 2004. Pose Estimation for Multi-camera Systems. In: *Lecture Notes in Computer Science Vol. 3175: Pattern Recognition*, Springer, 2004, pp. 286-293.
- GÖTZ, C.; TUTTAS, S.; HOEGNER, L.; EDER, K.; STILLA, U., 2011: Accuracy evaluation for a precise indoor multi-camera pose estimation system. In: Stilla U et al (Eds) PIA11. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (3/W22): 97-102
- HANEL, A.; GÖTZ, C.; TUTTAS, S.; BECKER, T.; STILLA, U.; 2013: Orientierungsgenauigkeit eines Multi-Kamerasystems bei Roboterbewegungen in einer Fahrzeugkarosserie. Tagungsband der 33. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Band 22
- KRAUS, K., 1996. Photogrammetrie – Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Bonn: Ferd. Dummlers Verlag
- LUHMANN, T., 2009: Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(3), pp. 275-284.
- MUHLE, D.; ABRAHAM, S.; HEIPKE, C.; WIGGENHAGEN, M., 2008. Automatische Orientierung von zwei gemeinsam bewegten Stereosystemen ohne gegenseitige Korrespondenzen. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tag 2008*, Wichmann, 2008, pp. 186-193.



Vorträge



33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

27. Februar – 1. März 2013
in Freiburg i. B.

Dreiländertagung D - A - CH