

# Orientierungsgenauigkeit eines Multi-Kamerasystems bei Roboterbewegungen in einer Fahrzeugkarosserie

ALEXANDER HANEL<sup>1</sup>, CARSTEN GÖTZ<sup>1</sup>, SEBASTIAN TUTTAS<sup>1</sup>, TOBIAS BECKER<sup>2</sup>  
& UWE STILLA<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Eine hochgenaue Positionsbestimmung eines Multi-Kamerasystems über Rückwärtsschnitte ist nur in Bereichen mit vielen Referenzpunkten möglich. Liegen nur wenige Referenzpunkte vor, können aus bereits orientierten Bildern Neupunkte über Vorwärtsschnitte eingemessen werden. In derartig schwach besetzten Bereichen werden alle bis zu diesem Zeitpunkt eingemessenen Punkte wiederum genutzt, um weitere Aufnahmen zu orientieren. Diese Strategie wird nun abwechselnd eingesetzt, um die Orientierung aller entlang einer Trajektorie aufgenommenen Bilder zu bestimmen. Im folgenden Beitrag wird der Ansatz in einer simulierten Umgebung und unter realen Messbedingungen untersucht. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei der Fortpflanzung der nach der vermittelnden Ausgleichung resultierenden Genauigkeit gewidmet. Bei den Versuchen im industriellen Umfeld konnten meistens ausreichend Neupunkte eingemessen werden, um die Trajektorie zu bestimmen. Es hat sich gezeigt, dass der Fehler der Orientierungen im Bereich der eingemessenen Neupunkte gegenüber dem Bereich mit dichtem Referenzpunktfeld nicht übermäßig angestiegen ist.*

## 1 Einführung

### 1.1 Motivation

Für Geometrie- und Oberflächenmessungen werden Inspektionssensoren mit einem Roboter nicht nur im Außenraum um eine Fahrzeugkarosserie bewegt, sondern auch in deren Innenraum geführt (Abb. 1). Für manche Anwendungen ist die Kenntnis deren Position und Orientierung aus den Einstellungen des Roboters jedoch nicht genau genug. Deswegen sollen diese mit einem zusätzlichen Multikamerasystem hochgenau bestimmt werden.

Bei einer photogrammetrischen Vorgehensweise zur Bestimmung der äußeren Orientierung aufgrund von Referenzmarken spielen deren Sichtbarkeit und Verteilung eine wichtige Rolle für die erreichbaren Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten. So kann man für den Außenraum um das Messobjekt von einer

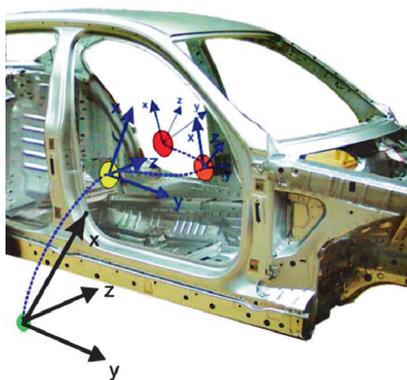


Abb. 1: Beispiel für die Messsituation im Außen- und Innenbereich mit vier Kamerapositionen.

1) Photogrammetrie & Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, <http://www.pf.bv.tum.de>  
2) BMW AG, Petuelring 130, 80788 München

sehr hohen Anzahl an a priori eingemessenen Passpunkten mit guter geometrischer Verteilung ausgehen. Als Beispiel ist in Abbildung 2a der Boden einer Messumgebung mit mehreren kodierten und unkodierten Referenzmarken unterschiedlicher Größe zu sehen. In solchen Bereichen ergeben sich typischerweise nur kleine Fehlerellipsen (in Abb. 1 durch grüne Ellipse angedeutet).

Bewegt man sich mit dem Sensorsystem hingegen in die Karosse hinein, ist die Messsituation deutlich ungünstiger. Aufgrund von Einschränkungen bei der Anzahl und Platzierung von Marken, erreicht man schlechtere Ergebnisse der Orientierungsbestimmung (in Abb. 1 durch rote Fehlerellipse angedeutet). Abbildung 2b zeigt den Innenbereich einer Fahrzeugkarosse, in der im Sichtbereich der Kamera nur fünf Marken zu sehen sind.

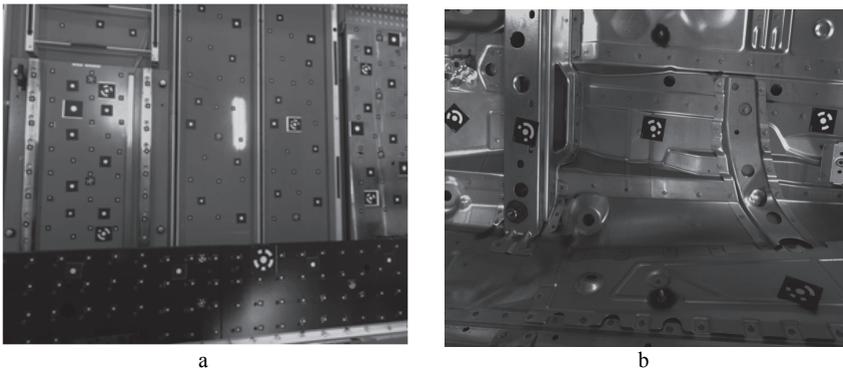


Abb. 2: Bildaufnahmen durch das Kamerasystem. a) Messumgebung mit eingemessenen Passpunkten auf der Bodenplatte, b) Fahrzeuginnenraum mit markierten Verknüpfungspunkten

Sofern derartige schwach besetzte Bereiche entlang der untersuchten Trajektorie vorliegen, kann nicht mehr für alle Kamerapositionen garantiert werden, dass die Orientierung über Rückwärtsschnitte berechnet werden kann. Da die Aufnahmen zur Bildung einer Trajektorie verknüpft werden müssen, ist somit auch deren lückenlose Bestimmung nicht mehr gewährleistet. Dies birgt schließlich die Gefahr, dass für die Messungen der Inspektionssensoren die Positionen nicht mehr bestimmt werden können. Daher wird in diesem Beitrag ein erweiterter Ansatz zur Bestimmung der Orientierung untersucht.

## 1.2 Verwandte Arbeiten

Grundlegende Untersuchungen zum Rückwärtsschnitt befinden sich in WROBEL (2001). Insbesondere wird im dortigen Beitrag das Prinzip der projektiven und perspektivischen Kollineation eingeführt, wobei letzteres im Rahmen dieses Beitrags herangezogen wird. Des Weiteren werden dort die verschiedenen Standard-Orientierungsaufgaben voneinander abgegrenzt.

Verschiedene Herangehensweisen für industrielle Anwendungsbeispiele der Photogrammetrie schildert FRASER (1988), wobei im Gegensatz zu diesem Beitrag dort auch Methoden der analytischen Photogrammetrie eingeflossen sind. Dahingegen geht SCHEWE (1987) konkret auf die Anwendung der Karosserievermessung ein und verwendet hierfür mit InduSURF ein photogram-

metrisches Messsystem. In Abgrenzung hierzu wird in diesem Beitrag kein marktrefreies System verwendet, sondern die Untersuchungen auf elementare Hardware und selbstentwickelte Ansätze gestützt.

Basisinformationen über den Aufbau eines Multi-Kamerasystems werden behandelt in GÖTZ et al. (2011). Im dortigen Beitrag wird insbesondere ein System aus drei Kameras detailliert evaluiert. Dessen Erweiterung um eine zusätzliche Kamera findet Anwendung im praktischen Versuch, der im weiteren Verlauf dieses Beitrags beschrieben wird.

Verwandt mit der hier behandelten Fragestellung ist das Problem eines Roboters, gleichzeitig seine Orientierung zu bestimmen und die Umgebung zu beschreiben. Grundlagenarbeit für das als SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) bezeichnete Verfahren haben beispielsweise FACCHINETTI et al. (1995) und WELLS et al. (1996) geleistet. Eine Abgrenzung zur hier behandelten Fragestellung ergibt sich aus der häufigen Einbindung von Zusatzsensoren wie zum Beispiel einer IMU in das Messsystem, während hier nur ein Kamerasystem zum Einsatz kommt. Gemeinsam ist jedoch das Ziel, die eigene Position und nicht die eines abgebildeten Objektes zu bestimmen. Im Gegensatz zu DARR et al. (2013) wird im vorliegenden Beitrag das Genauigkeitsverhalten nicht nur im Bereich mit vielen Referenzpunkten untersucht, sondern der Übergang von einem derartigen Bereich hin zu einem mit weniger sichtbaren Referenzpunkten betrachtet.

## 2 Orientierungsverfahren im sichtbeschränkten Raum

Bestimmung der äußeren Orientierung des Kamerasystems über Rückwärtsschnitte und anschließendes Einmessen von Neupunkten über Vorwärtsschnitte bildet die Kernoperationen des in diesem Beitrag erarbeiteten Ansatzes. Mit Hilfe nachstehender Grafik (Abb. 3) und den zugehörigen textuellen Erläuterungen wird dieser im Folgenden vorgestellt.

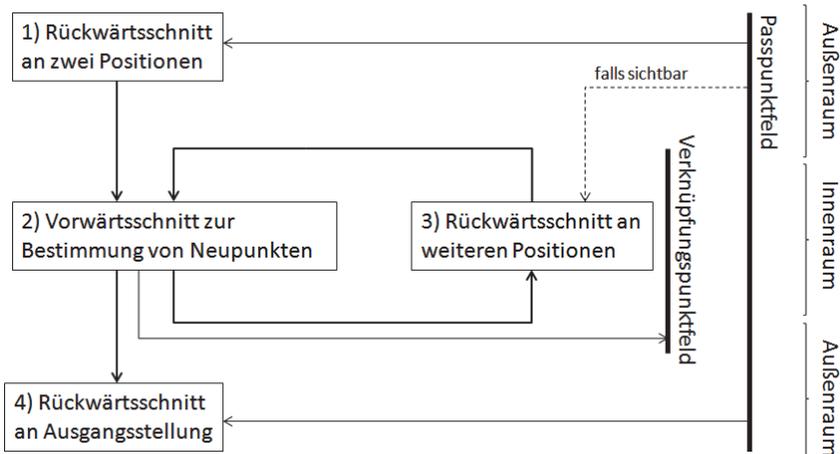


Abb. 3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Berechnungen

## 2.1 Schritt 1 – Positionierung

Zu Beginn des Messpfades (Abb. 3 - 1) liegen Bereiche mit einer hohen Zahl  $i = 1..n; n > 3$  von Passpunkten vor, die zu einer Überbestimmung der Orientierung mit hoher Redundanz genutzt werden. Damit ist es dort möglich, Rückwärtsschnitte durch eine Ausgleichung (Gl. 1-3) nach vermittelnden Beobachtungen mit nachfolgendem Funktionalmodell auszuführen.  $r_{jk}$  stellt darin die Elemente der Rotationsmatrix dar. In der Darstellung der Gleichungen wird die Notation nach KRAUS (2004) verwendet.

$$\hat{f}_{x_i} : x'_i + \hat{v}_{x_i} = x'_0 + c' \cdot \frac{\hat{r}_{11}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{21}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{31}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)} \quad (1)$$

$$\hat{f}_{y_i} : y'_i + \hat{v}_{y_i} = y'_0 + c' \cdot \frac{\hat{r}_{12}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{22}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{32}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)}{\hat{r}_{13}(\hat{X}_i - \hat{X}_0) + \hat{r}_{23}(\hat{Y}_i - \hat{Y}_0) + \hat{r}_{33}(\hat{Z}_i - \hat{Z}_0)} \quad (2)$$

$$\hat{f}_{X_i} : X_i + \hat{v}_{X_i} = \hat{X}_i \quad \hat{f}_{Y_i} : Y_i + \hat{v}_{Y_i} = \hat{Y}_i \quad \hat{f}_{Z_i} : Z_i + \hat{v}_{Z_i} = \hat{Z}_i \quad (3)$$

Das Resultat dieser Berechnungen sind die sechs Parameter der geschätzten äußeren Orientierung ( $\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0, \hat{\omega}, \hat{\phi}, \hat{\kappa}$ ) einschließlich deren Genauigkeiten ( $\hat{\sigma}_{\hat{x}_0}, \hat{\sigma}_{\hat{y}_0}, \hat{\sigma}_{\hat{z}_0}, \hat{\sigma}_{\hat{\omega}}, \hat{\sigma}_{\hat{\phi}}, \hat{\sigma}_{\hat{\kappa}}$ ). Bei der Ausgleichung werden durch die Gleichungen (3) zwar auch für die Passpunkte Verbesserungen geschätzt, die vorher gemessenen Koordinaten werden jedoch nicht ersetzt. Der Grund für diese Vorgehensweise liegt darin, dass die Weltkoordinaten zwar als fehlerbehaftete Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt werden sollen, der vorab durchgeführte Bestimmung jedoch als genauer und zuverlässiger angesehen werden muss.

Die Bestimmung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter kann beispielsweise über eine Direkte Lineare Transformation LUHMANN (2010) oder anhand der eingestellten Roboterposition abgeleitet werden.

Der so beschriebene Teilschritt muss für mindestens zwei sich überlappende Aufnahmen erfolgreich durchgeführt werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

## 2.2 Schritt 2 – Einmessen der Verknüpfungspunkte

Sobald sich das Messsystem in Bereichen mit nur wenigen oder gar keinen sichtbaren Referenzpunkten mit bekannten Koordinaten bewegt, sinkt die Redundanz und die Möglichkeit zur Berechnung von Rückwärtsschnitten wird eingeschränkt oder gar unmöglich.

Für solche Situationen ist es notwendig, anhand der beiden zuvor orientierten Aufnahmen aus Schritt 1 Neupunkte durch Vorwärtsschnitte zu bestimmen. Der Vorwärtsschnitt wird mit derselben mathematischen Basis wie der Rückwärtsschnitt durch vermittelnde Ausgleichung gelöst. Dabei treten die Gleichungen (1) und (2) dupliziert für jede der beiden involvierten Kameras auf. Jedoch werden die Parameter der äußeren Orientierung nun nicht mehr als Unbekannte mitgeschätzt. Zu beachten ist, dass die verwendeten Bildpunkte beider Kameras denselben Objektpunkt darstellen, was durch Verwenden codierter Marken sichergestellt werden kann.

Näherungswerte für die Koordinaten des Neupunktes erhält man beispielsweise durch Definition zweier Schnittgeraden mit dem Projektionszentrum der jeweiligen Kameras als Aufpunkt und

dem Vektor vom Projektionszentrum zu den Bildkoordinaten als Richtungsinformation. Die Koordinaten des Mittelpunktes der kürzesten Parallaxe zwischen den Geraden bilden den genäheren Wert. Eine Fehlerfortpflanzung nach NIEMEIER (2008) liefert die zugehörigen Gewichte. Für die resultierenden dreidimensional eingemessenen Punkte wird anhand eines 3D-Punktfehlers nach NIEMEIER (2008) entschieden, ob die eventuell vorhandenen Werte aus vorangegangenen Vorwärtsschnitten überschrieben oder beibehalten werden sollen. Für die erstmalige Berechnung der Neupunkte wird dazu ein hoher Schwellwert des 3D-Punktfehlers manuell angesetzt. Dieser muss so gewählt werden, dass einerseits nur wenige der nur spärlich vorhandenen Punkte ausgeschlossen werden, und andererseits zu schlechte Punkte, die die Orientierbarkeit eventuell gefährden, unberücksichtigt bleiben.

### 2.3 Schritte 3 und 4 – Iteration

Die in Schritt 2 eingemessenen Neupunkte und die a priori vorhandenen Passpunkte können an einer weiteren Kameraposition genutzt werden, um dort über Rückwärtsschnitt die Aufnahme zu orientieren. Nach diesem Prinzip können weiterführend Vorwärtsschnitte und Rückwärtsschnitte nach oben erläuteter Vorgehensweise berechnet werden. Dies kann solange wiederholt werden, wie neue Bilder aufgenommen werden. Treten Kamerapositionen auf, bei denen die Orientierung nicht bestimmt werden kann, werden diese übersprungen und versucht, mit den darauffolgenden Kamerapositionen fortzufahren. Voraussetzung an diesen ist die Sichtbarkeit von Referenzpunkten.

## 3 Evaluierung der Methode anhand simulierter und realer Messaufgaben

### 3.1 Simulation

Vor der Durchführung der praktischen Messversuche werden Simulationen berechnet, um mehrere Aufnahmesituationen zu untersuchen und den erarbeiteten Ansatz zu evaluieren. Bei der Wahl der Aufnahmesituationen werden charakteristische Bedingungen wie beim Eintauchen in die Karosserie berücksichtigt (siehe Abschnitt 1.1). Dabei wird von nur partieller Punktsichtbarkeit und beschränkten Bewegungsmöglichkeiten ausgegangen. Für die Simulation wird statt dem Kamerasystem nur eine Einzelkamera betrachtet.

Die Berechnungsergebnisse sind in Abb. 4 gezeigt. Dargestellt sind sowohl die Standardabweichungen in den einzelnen drei Komponenten  $\hat{\sigma}_{\hat{x}_0}, \hat{\sigma}_{\hat{y}_0}, \hat{\sigma}_{\hat{z}_0}$  beziehungsweise  $\hat{\sigma}_{\phi}, \hat{\sigma}_{\theta}, \hat{\sigma}_{\kappa}$  als auch der 3D-Punktfehler nach NIEMEIER (2008) als skalares Maß für die Positionsgenauigkeit. Dessen Äquivalent für die Rotationsgenauigkeit ist eine Transformation der Rotationsparameter in eine skalare Drehung um eine Raumachse nach FISCHER (2008) und eine anschließende Fehlerfortpflanzung.

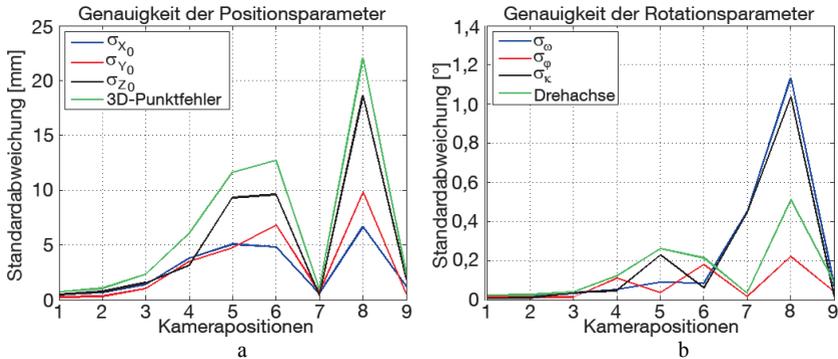


Abb. 4: Genauigkeiten der äußeren Orientierung der Kamera an einem simulierten Kamerapfad. a) Positionsparameter, dargestellt sind die einzelnen Komponenten und ein 3D-Punktfehler nach NIEMEIER (2008), b) Rotationsparameter, dargestellt sind die einzelnen Komponenten und ein skalarer Fehler nach FISCHER (2008)

Es zeigt sich sowohl für die Genauigkeit der Positions- als auch Rotationsparameter zunächst der erwartete Anstieg der Kurven. Die Begründung dafür liegt in der abnehmenden Referenzpunktzahl beim Eintauchen in die Karosserie an Position 3. Ab Mitte des Pfades jedoch steigen die Kurven der Positionsgenauigkeit (Abb. 4a) in stärkerem Maße als zuvor, bevor diese an Kameraposition 7 auf ein Niveau ähnlich der Ausgangssituation abfallen. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass an dieser Position nur Neupunkte einer einzigen Vorwärtsschnitt-Ausgleichung zur Orientierung verwendet werden. Diese sind somit in sich homogen, woraus die geringe, aber nicht-kontrollierte Standardabweichung resultiert. Testweises Hinzufügen eines unabhängig davon bestimmten Passpunktes ergibt Werte, die dem bisherigen Verlauf der Kurven entsprechen und somit die obige Vermutung bestärken. An der darauffolgenden Kameraposition folgt hingegen ein starker Anstieg der Kurven aufgrund der schlechten Geometrie der Bildpunkte. Beendet wird der Genauigkeitsverlauf entlang der Trajektorie in einem Wertebereich ähnlich dem des Ausgangsbildes, da zurück im Außenraum erneut a priori bekannte und hochgenaue Passpunkte vorhanden sind.

Das Genauigkeitsniveau der Rotationen (Abb. 4b) weist im Gegensatz zu dem der Positionen nicht für alle Komponenten einen deutlichen Knick bei Position 7 auf, sondern nur für  $\hat{\sigma}_{\phi}$ . Durch das unterschiedliche Verhalten der Komponenten der Orientierung zeigt sich die Abhängigkeit des Genauigkeitsverhaltens von der Aufnahmegeometrie.

Generell ist ersichtlich, dass die skalaren Genauigkeitsmaße dem Verlauf der einzelnen Komponenten der Standardabweichung folgen. Daraus lässt sich folgern, dass sie als Äquivalent zur Darstellung geeignet sind.

Als Fazit der Simulation zeigt sich, dass der Genauigkeitsverlauf im Wesentlichen den Erwartungen aufgrund der Bewegung vom Außen- in den Innenraum und wieder zurück entspricht. Wie insbesondere Kameraposition 7 gezeigt hat, darf jedoch nicht die Verteilung der Punktkonfiguration und Aufnahmegeometrie außer Acht gelassen werden.

## 3.2 Praktischer Messversuch

### 3.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuch wurde in einer Messumgebung im Rahmen des Projektes MultiGO aufgebaut. Er besteht aus einem zentral angeordneten und um sieben Achsen beweglichen Roboter. Auf dessen Arm sitzt ein Kameraträger mit vier Kameras (Abb. 5). Diese sind Industriekameras vom Typ „eco655MVCE“ des Herstellers SVS-VISTEK (SVS-VISTEK, 2012), bestückt mit Weitwinkelobjektiven vom Typ „SV-0614H“ (Nr. 1, 3 und 4) beziehungsweise „SV-0814H“ (Nr. 2) von VS Technology (VST, 2012).

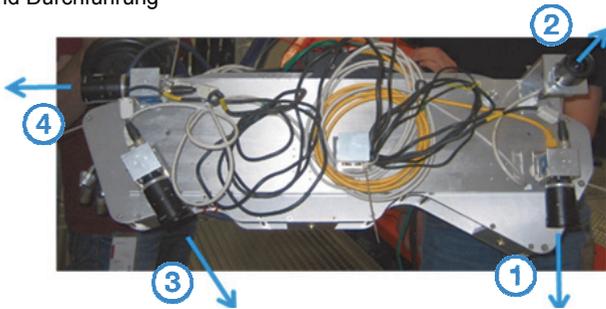


Abb. 5: Anordnung der Kameras auf dem Messsystem. Die Zahlen geben die Nummerierung der Kameras an

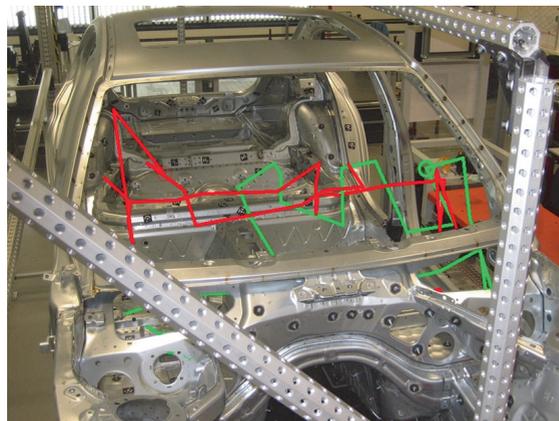


Abb. 6: Messpfad der Stereokameras. Beginn und Ende an durch Kringel markierter Stelle. Kamera 1 in roter, Kamera 3 in grüner Farbe dargestellt

Des Weiteren steht ein dichtes Referenzmarkenfeld zur Kalibrierung und Orientierung der Kameras im Fahrzeugaußenraum zur Verfügung. Das untersuchte Messobjekt (vgl. Abb. 6) ist eine Karosserie des BMW F30 der Baustufe 2 inklusive befestigten Seiten-, Rumpf- und Dachblechen sowie den nötigen Aussparungen.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurden die in unterschiedlicher Größe vorhandenen Referenzmarken auf Hallenfundament, Rasterplatten und Rahmen angebracht. Anschließend wurden sie zur Berechnung der Referenzkoordinaten hochgenau photogrammetrisch aufgenommen und mit AICON 3D-Studio ausgewertet. Außerdem wurden zur Simulation von Features (z.B. markante Löcher im Blech) magnetische Referenzmarken im Fahrzeuginneren befestigt.

Anschließend wurden als erforderliche Rahmenbedingungen ein Schärfetest der Kameras auf dem Kameraträger durchgeführt und diese auch kalibriert.

Für den Versuch wurde ein vorgegebener Messpfad (Abb. 6), beginnend vom Außenraum in den Innenraum der Karosserie geführt und schließlich wieder zurück geführt. Im Innenraum wurden verschieden ausgerichtete Positionen angefahren. Nach Stoppen der Roboterbewegung an den einzelnen Standpunkten wurden die entsprechenden Bildaufnahmen ausgelöst.

### 3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Zur Schaffung von möglichst engen Rahmenbedingungen zur Evaluation des vorgestellten Ansatzes wurden nachfolgende Einschränkungen getroffen. Einerseits wurden zur Berechnung von Neupunkten nur Aufnahmen einer Kamera von zwei aufeinanderfolgenden Positionen miteinander kombiniert. Andererseits wurden die Aufnahmen des Mehrkamera-Systems nur innerhalb eines Standpunktes in sich ausgeglichen. Das hierzu verwendete Verfahren basiert auf HANEL (2012). Die beiden unten zu sehenden Darstellungen zeigen den Genauigkeitsverlauf der vier Kameras entlang des gesamten Pfades getrennt nach Positions- (Abb. 7) und Rotationsparametern (Abb. 8). Dabei werden nicht die einzelnen Parameter dargestellt, sondern die im Abschnitt 3.1 eingeführten skalaren Genauigkeitsmaße. Das Eintauchen in die Karosserie findet statt an Position 4. Zunächst ist zu erkennen, dass nicht alle Bilder orientiert werden konnten, sondern im ersten Drittel eine Lücke von drei Aufnahmen klafft.

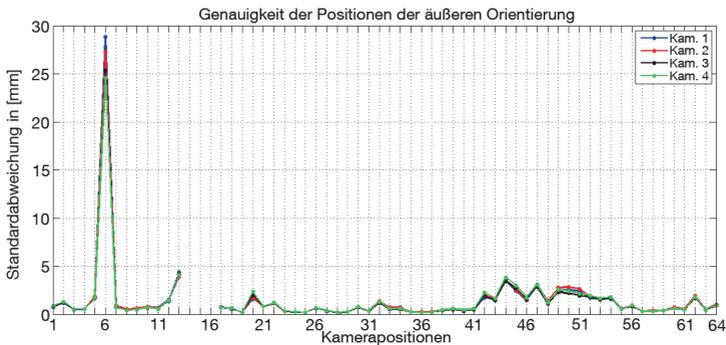


Abb. 7: Positionsgenauigkeit entlang des Messpfades. Dargestellt ist der 3D-Punktfehler nach NIEMEIER (2008) für alle vier Kameras des Multi-Kamerasystems

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die vorhandene Punktconfiguration im Fahrzeuginneren zwar von der Anzahl her ausreichend ist, aber die in diesen Bildern sichtbaren Verknüpfungspunkte an diesem Schritt der sukzessive durchgeführten Prozessierung noch nicht berechnet werden konnten.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass bei den Positionsgenauigkeiten ein markanter Ausreißer an Position 6 vorliegt. Dessen schlechte Werte sind darauf zurückzuführen, dass sich nur eine der vier Kameras über Rückwärtsschnitt orientieren konnte und dabei zudem eine schlechte Aufnahmegeometrie vorlag. Die Standardabweichungen der anderen drei Kameras wurden deswegen allein durch die oben erwähnte Mehrkamera-Ausgleichung ermittelt und sind daher an die über

den Rückwärtsschnitt orientierte Kamera gekoppelt. An allen anderen Positionen liegt das Genauigkeitsniveau in einem Bereich von unter einem bis fünf Millimetern, weist also einen weitgehend gleichmäßigen Verlauf auf. Hier bewirkt die Mehrkamera-Ausgleichung, die an jeder Position durchgeführt wurde, ein vergleichbares Genauigkeitsmaß aller Kameras. Dennoch weisen die Kameras Nr. 1 und 3 bei detaillierter Betrachtung aufgrund ihrer Stereoausrichtung ein etwas niedrigeres Wertespektrum als die anderen beiden auf.

Der Genauigkeitsverlauf der Rotationen stellt sich ähnlich dar, so tritt der deutlichste Ausreißer an derselben Stelle wie bei den Positionen auf. Zusätzlich zeigen sich im Bereich vor und kurz nach den überhaupt nicht orientierbaren Kamerapositionen größere Ungenauigkeiten. Dies lässt sich auf die teilweise sehr geringe Neupunktzahl zurückführen, die zu einer höheren Unsicherheit in der Orientierungsbestimmung führt. Auch tritt das Absinken des Genauigkeitsniveaus der Rotationen in den Positionen um Nummer 45 etwas stärker hervor als bei der Positionsgenauigkeit. Dies lässt sich auf die ähnlichen Sichtfenster der Kameras an diesen Positionen zurückführen. Dadurch werden dieselben Punkte zur Orientierungsbestimmung verwendet, womit sich vorhandene Fehler in allen diesen Bildern auswirken.

In beiden Fällen bestätigt sich am Ende des Pfades nach Verlassen des Fahrzeuginnenraums an Position 55, dass ein ähnlicher Wertebereich wie zu Beginn erreicht wird.

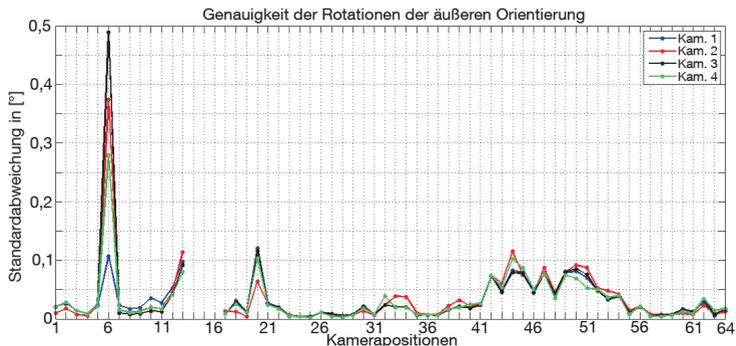


Abb. 8: Rotationsgenauigkeit entlang des Messpfades. Dargestellt ist der skalare Fehler nach FISCHER (2008) für alle vier Kameras des Multi-Kamerasystems

Als Fazit lässt sich folgern, dass der Verlauf der Genauigkeitskurven größtenteils konstant bleibt. Dennoch ist es notwendig, die kritischen Positionen zu analysieren und daraus gegebenenfalls Konsequenzen für den Versuchsaufbau und die Trajektorienwahl zu ziehen. Dennoch bleibt festzuhalten, dass das für die eingangs erläuterte Anwendung gewünschte Genauigkeitsniveau von wenigen Zehntel-Millimetern nicht erreicht werden konnte.

#### 4 Ausblick

Zielsetzung für weitere Arbeiten kann es sein, statt der Magnetmarken im Fahrzeuginneren Features zu messen. Hierfür bieten sich sowohl punkt- als auch linienförmige Varianten an. Dazu ist

es notwendig, geeignete Punkte in der Karosserie zu identifizieren und passende Bildverarbeitungsalgorithmen zu entwickeln. In einem nächsten Schritt müssen diese evaluiert werden, um möglichst zuverlässige Konfigurationen ableiten zu können.

## 5 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 Messungen in der Messzelle. Unser Dank gilt auch Herrn Gericke und Herrn Meyer von der Firma Steinbichler Optotechnik GmbH, Neubeuern, für die Bereitstellung von Hardware.

## 6 Literaturverzeichnis

- DARR, T.; GÖTZ, C.; TUTTAS, S.; BECKER, T.; STILLA, U., 2013: Genauigkeit der inversen Navigation bei hoher Passpunktsichtbarkeit zur Absolutpositionierung eines geführten Messsystems. Tagungsband der 33. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Bd 22
- FACCHINETTI, C.; TIÈCHE, F. & HÜGLI, H., 1995: Self-positioning robot navigation using ceiling image sequences. In: Proceeding ACCV'95 (Asian Conference on Computer Vision), Singapur, 3., S. 814-818
- FISCHER, M., WS 2008: Vorlesung Robotik, Kinematik V. FH München., Fakultät 07
- FRASER, C.S., 1984: State of the art in industrial photogrammetry. Commission V, XVIth ISPRS Congress, Kyoto. S. 166-180
- HANEL, A., 2012: Orientierungsgenauigkeit eines Kamerasystems bei Bewegungen in einer Fahrzeugkarosserie. München: Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Bachelorarbeit
- 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): S. 7-102
- KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie: Band 2. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Berlin: Gruyter, 3. Auflage.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Berlin: Wichmann, 3. Edition.
- NIEMEIER, W., 2008: Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. Berlin: Gruyter
- SCHWEWE, H. 1987: Automatic Photogrammetric Car-Body Measurement. Proc. 41st Photogrammetric Week, Stuttgart, 123-129.
- SVS-VISTEK, 2012: SVCam-ECO Datasheet. Seefeld: SVS-VISTEK GmbH  
[http://www.svs-vistek.com/\\_products/cameras/svcam/eco/eco.php](http://www.svs-vistek.com/_products/cameras/svcam/eco/eco.php), (05.08.1012).
- VST, 2010: CCTV Lenses, SV-H series. Tokyo, Japan: VS Technology Corporation  
<http://products.vst.co.jp/en/search/lineup.php?sid=210>, (06.08.2012).
- WROBEL, B.P., 2001: Minimum Solutions for Orientation. Volume 34 of Springer Series in Information Science .Berlin Heidelberg: Springer
- WELLS, G., VENAILLE, C. & TORRAS, C., 1996: Vision-based robot positioning using neural networks. Image and Vision Computing, 14(10): 715-732.



## Vorträge



### 33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

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

*Dreiländertagung D - A - CH*