

Kongruenzanalyse von Punktwolken aus instabilen Stereosequenzen

CHRISTIAN JEPPIG¹, FOLKMAR BETHMANN² & THOMAS LUHMANN³

Zusammenfassung: Im Zuge der Durchführung von Fahrzeugsicherheitsversuchen werden heute immer leistungsfähigere High-Speed-Kameras für die Dokumentation des Versuchsgeschehens eingesetzt. Die Bilddaten dieser Kameras können unter Anwendung photogrammetrischer Verfahren ausgewertet werden und so neben Dokumentations- und Visualisierungszwecken einen wesentlichen Informationsmehrwert (3D-Daten) liefern. Neben Kamerasystemen, die den Versuch von außerhalb aufnehmen, werden heute auch On-Board-Kameras eingesetzt. Die Verwendung solcher Systeme für photogrammetrische Auswertungen ist vor dem Hintergrund der hohen im Crash wirkenden Kräfte und der daraus resultierenden Instabilitäten der Kamerasysteme (Variation der inneren, relativen und äußeren Orientierungen) nicht oder nur bedingt möglich. Im vorliegenden Beitrag wird ausgehend von Bilddaten eines On-Board-Stereokamerasystems ein Verfahren vorgestellt, das zum einen die sukzessive Nachführung der relativen Orientierung der Kameras ermöglicht und zum anderen die beobachtete Objektoberfläche im Hinblick auf die Detektion partiell stabiler Objektbereiche klassifiziert, über die eine Nachführung der Kameraorientierungen relativ zu der beobachteten Objektoberfläche möglich wird.

1 Einleitung

Die Durchführung von Fahrzeugsicherheitsversuchen dient der Evaluation von Gefährdungspotentialen für am Unfall beteiligte Personen (Insassen, Fußgänger etc.) und der Ableitung von Maßnahmen zur Erhöhung von deren Sicherheit. Für eine möglichst vollständige Erfassung der komplexen Abläufe während des Versuchs werden sehr unterschiedliche Sensoren eingesetzt, darunter auch photogrammetrische Systeme. Diese ermöglichen beispielsweise die dynamische 3D-Rekonstruktion von Dummy-Bewegungen oder die (flächenhafte) 3D-Erfassung von Deformationen an Karosserieteilen. Die Ergebnisse photogrammetrischer Messungen werden anschließend u.a. für die Verifizierung von FE-Simulationsmodellen verwendet, welche von Seiten der Fahrzeughersteller für jeden Fahrzeugtyp entwickelt und auf Basis von Messdaten aus Realversuchen sukzessive verbessert werden (RAGUSE et al., 2004). Für diesen Verifizierungsprozess wie auch für die Fusion der 3D-Messdaten aus der Photogrammetrie mit den Daten anderer Sensoren ist eine Überführung aller Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem (z.B. ein zentrales Fahrzeugkoordinatensystem X_F , Y_F , Z_F , s. Abbildung 1) nötig. Bei Verwendung von kalibrierten Stereo- und Mehrkamerasystemen, die von außen auf das Fahrzeug blicken, kann dieser Bezug über signalisierte und vorab eingemessene Passpunkte auf stabilen Fahrzeugbereichen (z.B. Heck) hergestellt werden.

Dieses ist bei Verwendung von On-Board-Kamerasystemen, die u.U. nur auf partiell stabile Fahrzeugteile blicken, nicht direkt möglich.

1) C. Jepping, Jade HS Oldenburg, Ofener Str. 19, 26121 Oldenburg, christian.jepping@jade-hs.de

2) F. Bethmann, Jade HS Oldenburg, Ofener Str. 19, 26121 Oldenburg, folkmar.bethmann@jade-hs.de

3) T. Luhmann, Jade HS Oldenburg, Ofener Str. 19, 26121 Oldenburg, thomas.luhmann@jade-hs.de

Weiterhin kann für On-Board Stereokamerasysteme selbst bei stabiler Bauweise derzeit – bedingt durch die hohen während des Crashes wirkenden physikalischen Kräfte – nicht grundsätzlich sichergestellt werden, dass vorab ermittelte photogrammetrische Kalibrier- und Orientierungsparameter über die Dauer des Versuchs ihre Gültigkeit behalten. Aus photogrammetrischer Sicht und vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Datenfusionsproblematik ergeben sich dadurch folgende (Teil-) Probleme (s. Abbildung 1):

- Die relative Orientierung der Kameras (im System X_M, Y_M, Z_M) ändert sich von Epoche zu Epoche.
- Der beobachtete Objektbereich wird deformiert; Passpunkte auf der Objektoberfläche, die im Zuge der Vorvermessung im Koordinatensystem X_F, Y_F, Z_F bestimmt wurden verlieren dadurch ihre Gültigkeit; eine Neu-Bestimmung der Kameraorientierungen über Passpunkte im System X_F, Y_F, Z_F ist dann nicht mehr möglich.
- Die räumliche Orientierung des Systems X_M, Y_M, Z_M in Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem X_F, Y_F, Z_F ändert sich von Epoche zu Epoche.
- Die inneren Orientierungen der Kameras können sich ändern.

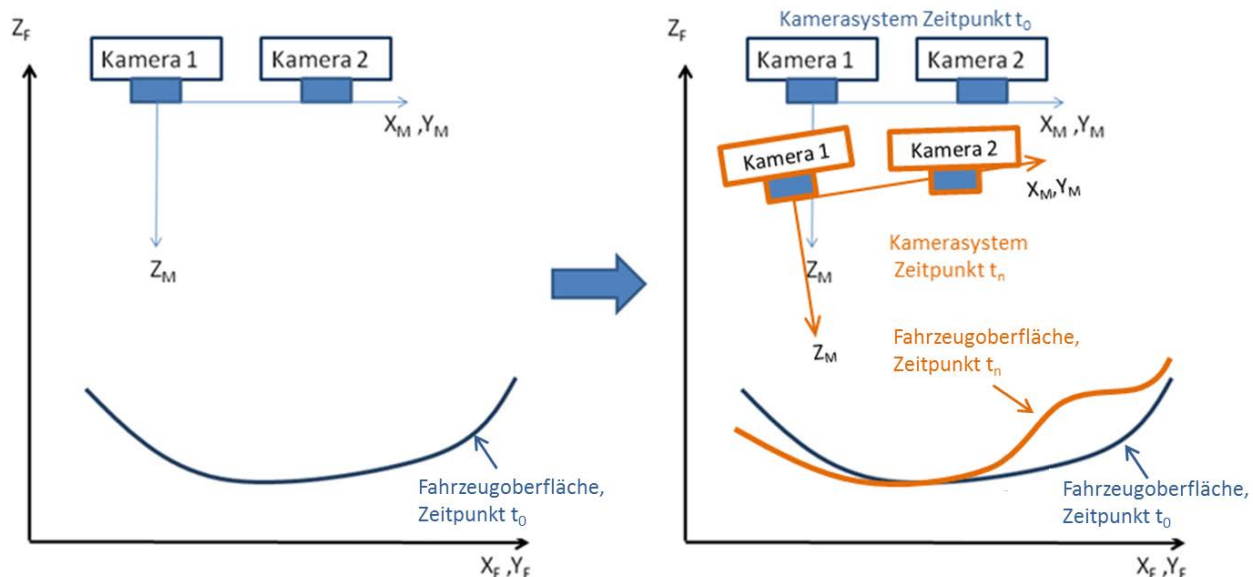


Abbildung 1: Koordinatensysteme und Zustandsänderungen von Kamera und Oberfläche

Im vorliegenden Beitrag werden Ansätze zur Lösung der beschriebenen Probleme vorgestellt. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Beschreibung eines auf RANSAC basierenden Verfahrens zur Detektion stabiler Oberflächenbereiche gesetzt („Kongruenzanalyse“, Abschnitt 3), über die eine sukzessive Nachorientierung des Kamerasystems X_M, Y_M, Z_M relativ zur Objektoberfläche realisiert werden kann. Die Schaffung der für die Kongruenzanalyse nötigen Datengrundlage und die damit zusammenhängende Lösung einiger der beschriebenen Teilprobleme werden kurz im folgenden Abschnitt erläutert.

2 Datengrundlage

Für die Kongruenzanalyse (Abschnitt 3) werden die Raumtrajektorien einer möglichst hohen Anzahl von 3D-Punkten auf dem betrachteten Objektbereich benötigt. Für die Erzeugung dieser Daten wird die am IAPG entwickelte Software PISA (Photogrammetric Image Sequence Analysis) verwendet. PISA ermöglicht die Berechnung einer dichten 3D-Punktewolke für einen definierten, ausreichend gut texturierten Objektbereich in der Epoche 0 durch Anwendung von bildraumbasierten Zuordnungsverfahren (BETHMANN et al., 2009). Weiterhin kann für jeden 3D-Punkt der Epoche 0 durch Anwendung robuster Tracking-Algorithmen in den Folge-Epochen i eine 3D-Trajektorie bestimmt werden. Die Software setzt zunächst voraus, dass die inneren und äußeren Orientierungen der Kameras für jeden Zeitpunkt bekannt sind und bestimmt die 3D-Trajektorien in dem System, in dem auch die äußeren Orientierungen der Kameras vorliegen. Stabile äußere Orientierungen können bei On-Board-Stereokamerasystemen, wie eingangs beschrieben, nicht vorausgesetzt werden. Da jedoch im Zuge der Korrespondenzanalyse für jeden Epoche i ein Satz von > 5 homologen Bildpunkten bestimmt wird, kann – stabile innere Orientierungen und eine geeignete räumliche Punktverteilung vorausgesetzt – zumindest die relative Orientierung der Kameras unter Verwendung der Koplanaritätsbedingung im System X_M, Y_M, Z_M für jede Epoche neu bestimmt werden (LUHMANN, 2010). Die anschließend für jede Epoche berechneten 3D-Punkte liegen dann im System X_M, Y_M, Z_M vor, dessen Maßstab sich – in Abhängigkeit der Kamerabewegungen – von Epoche zu Epoche ändern kann. Wird auf die beschriebene Weise eine komplette Bildsequenz ausgewertet, liegen somit 3D-Trajektorien für eine Anzahl von n Objektpunkten im System X_M, Y_M, Z_M vor, die implizit Informationen über

- die tatsächlich auftretenden Oberflächendeformationen,
- Maßstabsänderungen im System X_M, Y_M, Z_M ,
- sowie Relativbewegungen zwischen Oberfläche und Kamerasystem

enthalten. Aufgabe der im Folgenden beschriebenen Kongruenzanalyse ist es, diese Datenbasis mit dem Ziel zu analysieren, die beschriebenen drei Effekte voneinander zu trennen. Insbesondere geht es dabei um die Detektion signifikanter Oberflächendeformationen und die Trennung dieser von nicht oder weniger stark deformierten Bereichen. Über partiell nicht deformierte Bereiche kann das System X_M, Y_M, Z_M dann für jeden Zeitpunkt nachorientiert werden, so dass Informationen über Relativbewegungen zwischen nicht deformierter Oberfläche und Kamerasystem gewonnen werden.

3 Kongruenzanalyse

Die Kongruenzanalyse eines geodätischen Netzes ist ein grundlegender Bestandteil einer klassischen Deformationsanalyse (WELSCH et al., 2000). Ziel der Kongruenzanalyse ist die Prüfung eines in mehreren Epochen gemessenen Netzes auf signifikante Punktveränderungen. Bei klassischen geodätischen Deformationsanalysen werden Deformationsmessungen in geodätischen Netzen durchgeführt, die eine klare Aufteilung in Stütz- und Objektpunkte vorsehen.

Im vorliegenden Fall der Oberflächenerfassung durch Stereobild-Zuordnung kann keine klare Trennung zwischen Stütz- und Objektpunkten erfolgen. Eine Kongruenzanalyse basiert in

diesem Fall auf allen gemessenen Objektpunkten. Weiterhin ist mit einer flächenhaften Deformation zu rechnen.

Hieraus ergeben sich in Bezug auf die Kongruenzanalyse spezielle Anforderungen. Da bei der Berechnung der relativen Orientierung eines Stereokamerasystems die Maßstabsinformation verloren gehen kann, muss das Verfahren maßstabsinvariant sein. Weiterhin muss das Verfahren invariant gegenüber Translationen und Rotationen sein. Darüber hinaus ist mit einem hohen Anteil deformierter Bereiche zu rechnen, so dass eine Einzelpunktbetrachtung nicht in Frage kommt.

Für Kongruenzanalysen in Netzen ohne Stützpunkte können alternative Verfahren verwendet werden. Mögliche Herangehensweisen an diese Problematik sind die Analyse der Kongruenz innerhalb einer Datumsüberführung (REINKING, 1994) mittels einer Transformation oder die Analyse datumsinvarianter Größen wie Strecken, Streckenrelationen oder Winkel, wie in NEITZEL (2004) beschrieben. In NIEMEIER (2008) wird darüber hinaus die Eignung von robusten Ausgleichsverfahren für eine Transformation hervorgehoben. Neben diesen Verfahren sind zufallsbasierte Verfahren wie das RANSAC-Verfahren für Problemstellungen mit einer hohen Anzahl an Ausreißern geeignet.

Für die vorliegende Problematik wurden von den genannten Verfahren die Streckennetzanalyse, die robuste Ausgleichung mit modifiziertem m -Schätzer nach NIEMEIER (2008) sowie das RANSAC-Verfahren geprüft.

Bei der Untersuchung dieser Verfahren hat sich gezeigt, dass die Analyse eines Streckennetzes für die vorliegende Problematik nur bedingt geeignet ist. Eine Punktänderung innerhalb einer Objektebene, die in etwa parallel zur X_M -/ Y_M -Ebene liegt, ist durch dieses Verfahren gut zu detektieren. Eine Änderung in Richtung der Z_M -Achse kann hingegen schlechter als bei den anderen Verfahren aufgedeckt werden.

Bei der Kongruenzanalyse auf Basis eines m -Schätzers können gute Ergebnisse erzielt werden. Die praktische Umsetzung des m -Schätzers erfolgt durch iterative Anpassung der Gewichtsmatrix für die Beobachtungen, so dass der Einfluss fehlerhafter Beobachtungen reduziert wird. Allerdings muss bei diesem Verfahren nach NEITZEL (2004) bereits bei einer Ausreißeranzahl von 10% damit gerechnet werden, dass Nebenmaxima gefunden werden. Aufgrund von möglichen Ausreißern im Datenmaterial wurde daher auf das RANSAC-Verfahren zurückgegriffen, im Speziellen auf das Local Optimized RANSAC Verfahren (Lo-RANSAC) nach CHUM et al. (2003). Das Lo-RANSAC Verfahren ergänzt das klassische RANSAC-Verfahren um einen Optimierungsschritt.

Als funktionaler Ansatz für das RANSAC-Verfahren wird eine 6-Parameter-Transformation bei bekanntem Maßstab bzw. eine 7-Parameter-Transformation bei unbekanntem Maßstab verwendet. Durch diese Funktion können Rotationen, Translationen (und ggf. Maßstabsänderungen) von sich im System X_M , Y_M , Z_M bewegend, aber in sich stabilen Punktgruppen beschrieben werden, so dass die geforderte Rotations-, Translations- und Maßstabsinvarianz erreicht wird. Das funktionale Modell lautet:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{0i} \\ Y_{0i} \\ Z_{0i} \end{bmatrix} + m_{0i} \cdot \mathbf{R}_{0i} \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

mit

$$\mathbf{R}_{0i} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{0i} \cos \kappa_{0i} & -\cos \varphi_{0i} \sin \kappa_{0i} & \sin \varphi_{0i} \\ \cos \omega_{0i} \sin \kappa_{0i} + \sin \omega_{0i} \sin \varphi_{0i} \cos \kappa_{0i} & \cos \omega_{0i} \cos \kappa_{0i} - \sin \omega_{0i} \sin \varphi_{0i} \sin \kappa_{0i} & -\sin \omega_{0i} \cos \varphi_{0i} \\ \sin \omega_{0i} \sin \kappa_{0i} - \cos \omega_{0i} \sin \varphi_{0i} \cos \kappa_{0i} & \sin \omega_{0i} \cos \kappa_{0i} + \cos \omega_{0i} \sin \varphi_{0i} \sin \kappa_{0i} & \cos \omega_{0i} \cos \varphi_{0i} \end{bmatrix}$$

- und X_i, Y_i, Z_i : Objektpunktkoordinaten Epoche i
 X_0, Y_0, Z_0 : Objektpunktkoordinaten Epoche 0
 $\omega_{0i}, \varphi_{0i}, \kappa_{0i}$: unbekannte Rotationsparameter
 X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} : unbekannte Translationsparameter
 m_{0i} : unbekannter Maßstab

Der auf Basis dieser Funktion ausgeführte RANSAC-Algorithmus ist im Flussdiagramm in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:

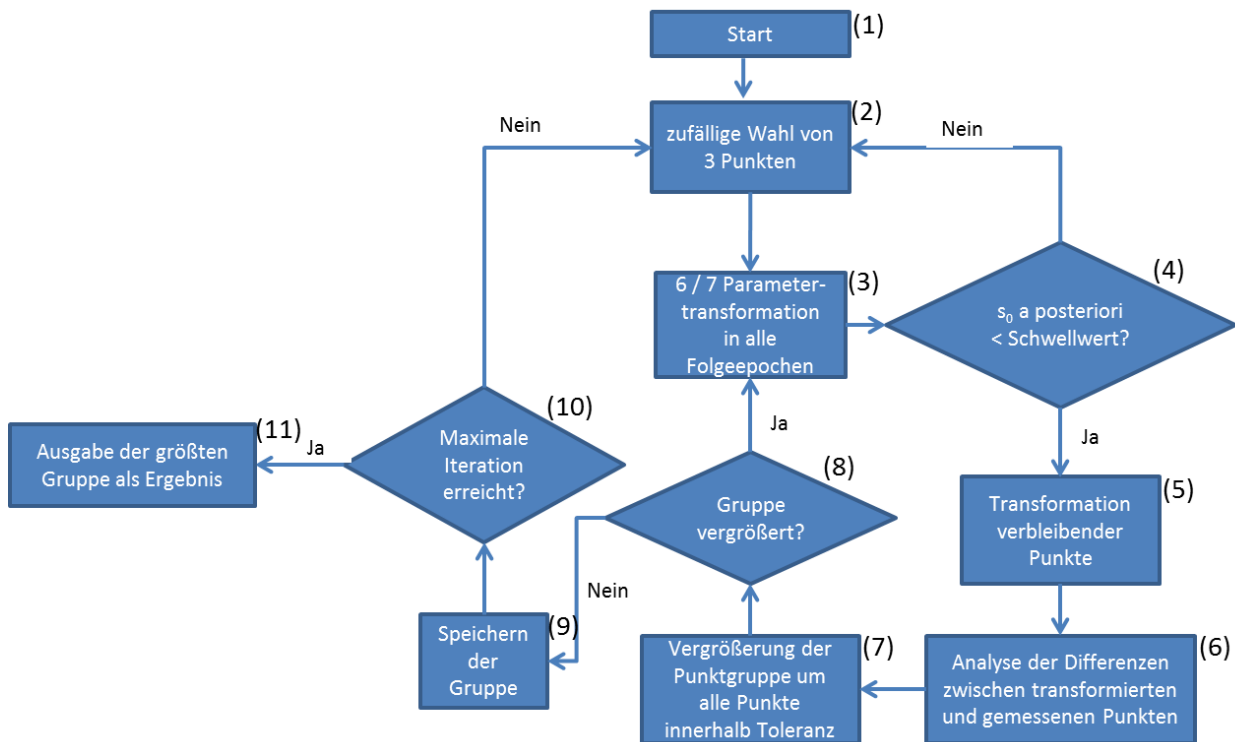


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Programmablaufes

Für die Bestimmung der 6 (bzw. 7) Unbekannten werden mindestens drei Punkte benötigt. Diese werden zufällig aus der Grundgesamtheit aller Punkte ausgewählt (s. Feld (2)). Anschließend werden die unbekannten Transformationsparameter für die Transformation von Epoche 0 in alle Folgeepochen i durch Ausgleich bestimmt (3). Das funktionale Modell ist überbestimmt (Redundanz $r=3$ bei 6 bzw. $r=2$ bei 7 Unbekannten), so dass als Kenngröße für die

Transformationsgenauigkeit die Bestimmung des Wertes für s_0 a posteriori für die Transformation in alle Folgeepochen i möglich ist. Alle s_{0i} werden anschließend mit einem vorgegebenen Schwellwert verglichen (4). Wenn dieser Test für alle Epochen positiv ausfällt, werden mit den ermittelten Transformationsparametern alle übrigen Punkte der Epoche 0 in alle Folgeepochen transformiert (5). Über das zuvor jeweils bestimmte s_{0i} können mit

$$s_X^2 = \frac{s_{0i}^2}{p_X}, s_Y^2 = \frac{s_{0i}^2}{p_Y}, s_Z^2 = \frac{s_{0i}^2}{p_Z}$$

Standardabweichungen für die transformierten Punkte berechnet werden. Die Festlegung der Gewichte erfolgt unter Berücksichtigung der Aufnahmegeometrie (typischerweise mit $p_X = p_Y$ und $p_Z < p_X$ wenn die Basis b des Stereosystems kleiner als der minimale Aufnahmeabstand h ist). Anschließend werden die Differenzen Δx , Δy , Δz zwischen den transformierten Punkten und den in der jeweiligen Epoche gemessenen Punkten berechnet und deren Beträge gegen die 3σ -Konfidenzintervalle der transformierten Punkte verglichen (6). Alle Punkte für die $|\Delta x| < 3 \cdot s_x$, $|\Delta y| < 3 \cdot s_y$ und $|\Delta z| < 3 \cdot s_z$ gilt, werden als neue Punkte in die kongruente Gruppe aufgenommen (7). Die Einführung von Standardabweichungen als Schwellwert kann als Variation des Lo-RANSAC-Ansatzes verstanden werden, da dieser i.d.R. feste, vorab zu definierende Schwellwerte verwendet.

Wird eine kongruente Punktgruppe auf die beschriebene Weise vergrößert, erfolgt eine erneute Bestimmung der Parameter der 6- bzw. 7-Parametertransformation durch Ausgleichung unter Verwendung der ursprünglichen drei sowie aller neu hinzugekommenen Punkte. Der beschriebene Vorgang wird solange wiederholt, bis die Gruppe nicht mehr vergrößert wird. In diesem Fall wird die Punktgruppe gespeichert (9). Da es denkbar ist, dass mehrere stabile Objektbereiche unabhängig voneinander existieren, wird der Prozess erneut durch die zufällige Auswahl dreier Punkte gestartet (2). Hierbei wird auf die Punkte zugegriffen, die bisher noch keiner Gruppe zugeordnet worden sind. Um den Rechenaufwand zu begrenzen wird dieser Schritt nicht beliebig oft wiederholt, sondern lediglich bis zu einer vorab zu definierenden Anzahl von Iterationen (10).

Das vorgestellte Verfahren ist wie das RANSAC Verfahren von lediglich einem Parameter abhängig (Schwellwert für das s_0 a posteriori der räumlichen Ähnlichkeitstransformation). Dieser Parameter kann vorgegeben oder aus der Aufnahmegeometrie abgeleitet werden.

4 Untersuchung der Kongruenzanalyse

Um eine durchgreifende Prüfung des Verfahrens zu gewährleisten, werden sowohl Realversuche als auch Versuche anhand von synthetisch erzeugten Daten vorgenommen. Als Problematik bei der Prüfung des Verfahrens kann die erforderliche Komplexität eines Versuchsaufbaus genannt werden. Um eine hinreichende Prüfung zu gewährleisten, müssten in einem Versuch Änderungen der relativen Orientierungen zwischen den Kameras sowie Änderungen der Orientierungen des Objektes zu den Kameras und Deformationen am Objekt erzeugt und mit Hilfe geeigneter Messverfahren gegengeprüft werden. Da dies mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist, wird bei der Durchführung der Realversuche auf Referenzmessungen verzichtet. Eine umfassende und durchgreifende Untersuchung des Verfahrens wird daher zunächst an synthetisch erzeugten Daten vorgenommen.

4.1 Untersuchung anhand von synthetischen Daten

Im Folgenden wird die Prüfung des Verfahrens anhand von synthetisch erzeugten Daten vorgestellt. Mit synthetischen Daten lassen sich bei geringem Aufwand beliebige Aufnahme Konfigurationen erzeugen, für die durchgängig Solldaten vorliegen. Es lassen sich ohne größeren Aufwand Änderungen der relativen Orientierung eines Stereokamerasystems sowie Änderungen der inneren Orientierungen einer Kamera in einer Stereosequenz erzeugen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, beliebige Deformationen und Verdeckungen am Objekt zu erzeugen. Die Erzeugung der synthetischen Daten umfasst die Erzeugung von Oberflächendaten (Rotationen, Translationen und Deformationen von vorgegebenen Oberflächen) sowie deren virtuelle Texturierung und die Erzeugung entsprechender Bilddaten für eine beliebige Anzahl Kameras. Bei der Erzeugung der synthetischen Bilder werden vollständige photogrammetrische Abbildungsmodelle berücksichtigt und komplexe Farblinterpolationsverfahren verwendet, um eine hohe geometrische Qualität (Subpixelgenauigkeit) zu gewährleisten. Details hierzu finden sich in BETHMANN et al. (2013).

Die für diesen Beitrag verwendete Bildsequenz umfasst 40 Epochen. In der Epoche 0 wird eine Ebene in einem Abstand von 300mm zu einem Stereokamerasystem beobachtet. Das Stereokamerasystem ist mit einer Basis von 150mm und einer Brennweite von ca. 8mm vorgegeben. Die Parameter der inneren Orientierung werden der realen Kalibrierung eines Stereokamerasystems entnommen. Über den Zeitraum der gesamten Sequenz wird der obere Teil der Ebene sukzessive deformiert. Weiterhin wird eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt vorgegeben, sowie eine Änderung der relativen Orientierung des Stereokamerasystems. Auf eine Änderung der inneren Orientierung wird verzichtet. Diese Stereosequenz wird nach dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren ausgewertet.

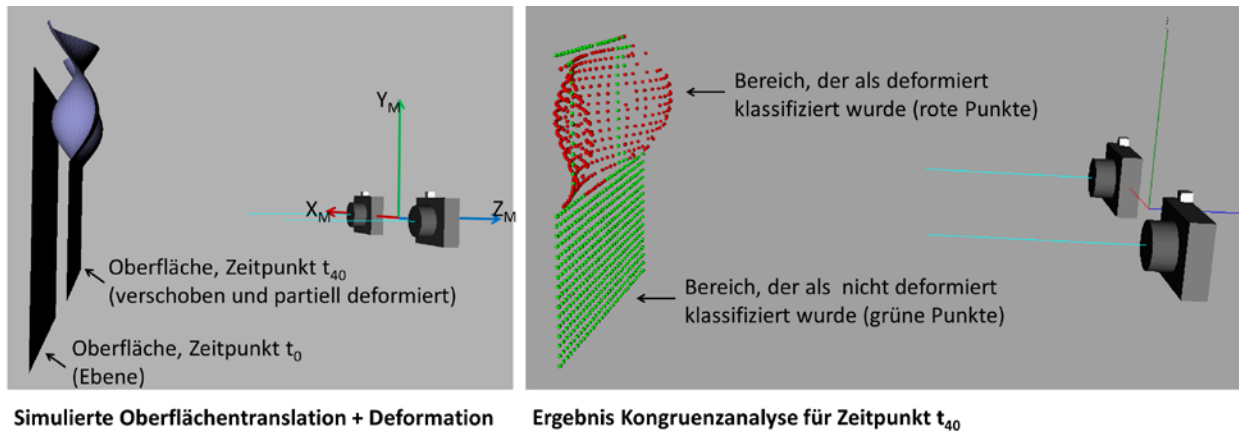


Abbildung 3: Simulierte Aufnahmesituation (links), Ergebnis der Kongruenzanalyse (rechts)

Für das s_0 a posteriori nach der 6- oder 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation wird innerhalb der Kongruenzanalyse ein Schwellwert von $s_0 = 0,4\text{mm}$ angegeben. Dieser liegt damit deutlich über der mit dem Stereosystem zu erwartenden Objektpunktgenauigkeit von $0,1\text{mm}$ bis $0,2\text{mm}$. Das Ergebnis der Kongruenzanalyse ist in Abbildung 3 rechts dargestellt. Die grün eingefärbten Punkte wurden im Zuge der Kongruenzanalyse als stabil über den gesamten Versuchszeitraum klassifiziert. Dieses Ergebnis entspricht weitgehend den Erwartungen, da diese Punkte insgesamt mehrheitlich auf tatsächlich nicht deformierten Objektbereichen liegen. Allerdings wird auch deutlich, dass neben den Punkten auf der Ebene weiterhin Punkte im Deformationsbereich der stabilen Gruppe zugeordnet wurden. Dies ist damit zu begründen, dass der obere Bereich anhand

einer Sinusfunktion deformiert wird. Analysiert man die als kongruent identifizierten Punkte im Deformationsbereich, so ist festzustellen, dass diese nahe dem Nulldurchgang der zur Beschreibung der Deformation verwendeten Sinusfunktion liegen. Dies hat zur Folge, dass diese Punkte keinen Deformationen unterliegen oder die Deformationsbeträge kleiner als die zu erwartende Messgenauigkeit sind. Somit ist deren Zuordnung zur kongruenten Punktgruppe korrekt.

4.2 Deformation einer Membran

Bei diesem Versuch wird eine mit Textur versehene Gummimembran verwendet (Abbildung 4). Durch punktuelles Eindrücken der Membran wird eine Deformation erzeugt, die mittels eines Stereosystems aufgenommen wird. Bei dieser Aufnahmekonfiguration wird ein Stereosystem mit einer Basis von ca. 150mm verwendet, das sich in einem Abstand von ca. 650mm vor dem Messobjekt befindet.

Ausgewertet wird eine Sequenz von 25 Epochen, bei der eine Deformation im zentralen Bereich der Gummimembran erzeugt wurde. Die maximale Deformation der Membran liegt in der Epoche 15 vor. Wie zuvor bei den synthetischen Daten wird auch hier ein Grenzwert von 0,4mm für das s_0 a posteriori der räumlichen Ähnlichkeitstransformation vorgegeben.

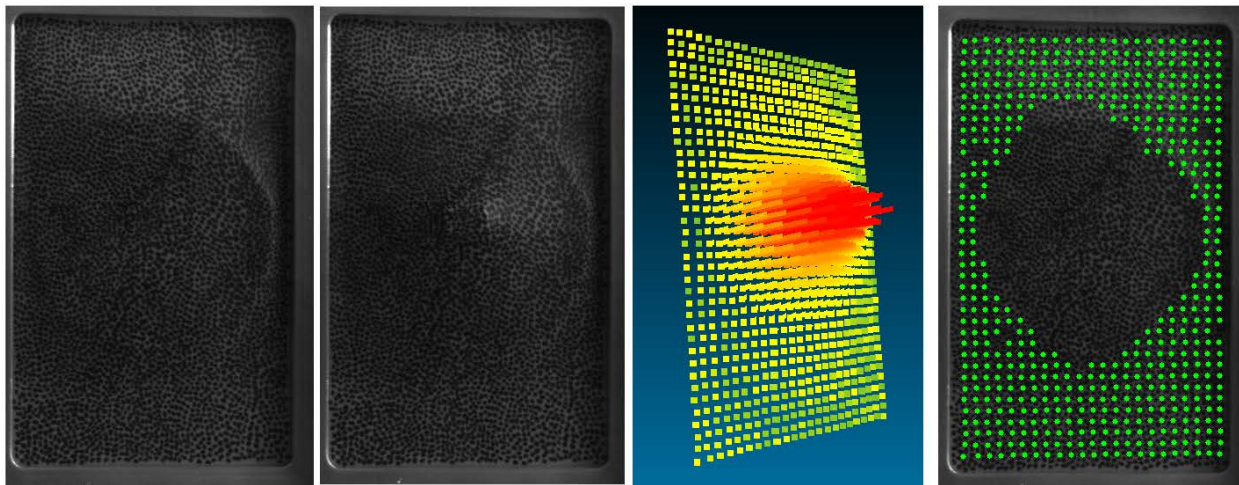


Abbildung 4: Kamerabild der Membran zur Startepoche und Kamerabild zur Epoche 15 (Bilder links), Überhöhte Darstellung der Deformation zwischen Epoche 0 und 15 und Bildausschnitt mit den als kongruent bestimmten Objektpunkten (Bilder rechts)

Wie zu erwarten ist, wird im Zuge der Kongruenzanalyse der äußere Bereich als nicht deformiert klassifiziert. Die als stabil identifizierten Punkte sind in Abbildung 4 links zu sehen. Neben dem deformierten Bereich wurden in den Randbereichen vereinzelt Punkte als deformiert klassifiziert. Dies ist auf Ausreißer im Datenmaterial zurückzuführen.

4.3 Weitere Untersuchungen

Weitere Untersuchungen und Erweiterungen des Verfahrens beziehen sich auf Sonderfälle, wie sie in der Crash-Test-Vermessung vorkommen können. Hierzu gehören insbesondere zeitlich begrenzte Verdeckungen von Teilen des Messobjektes, die durch Dummy-Beine oder bewegliche Objekte im Fahrzeuginnenraum verursacht werden können. Voraussetzung für einen robusten Umgang mit diesem Problem ist, dass temporär nicht messbare Punkte als solche

erkannt und gekennzeichnet werden. Der RANSAC-Algorithmus schließt diese Punkte nicht endgültig von der Kongruenzanalyse aus, sondern betrachtet diese lediglich für die Epochen, innerhalb derer die Punkte messbar war. Dieses Vorgehen ist erforderlich, da ansonsten zu große Objektbereiche u.U. nicht berücksichtigt würden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die On-Board Crash-Test-Vermessung mit Stereokamerasystemen stellt hohe Anforderungen an die verwendeten Kameras und an die Verfahren zur Auswertung der Stereobildsequenzen. Eine zu lösende Fragestellung ist hierbei die Überführung der gemessenen Oberflächenpunkte in ein gemeinsames Datum. Hierzu ist es erforderlich, kongruente Bereiche zu detektieren. In diesem Beitrag wird hierzu ein Verfahren vorgestellt, das in der Lage ist, aus instabilen Punktwolken einer Stereosequenz kongruente Bereiche zu detektieren.

Exemplarisch konnte am Beispiel von Versuchsdaten zweier Stereosequenzen die Eignung des Verfahrens für die Analyse auf kongruente Punkte in Punktsequenzen aufgezeigt werden. Hierzu wurde zum einen eine synthetische Stereosequenz mit instabiler äußerer Orientierung ausgewertet und zum anderen ein Versuch mittels einer punktuell deformierten Membran analysiert.

Über diese Versuche hinaus wurden Erweiterungen des Verfahrens aufgezeigt, die insbesondere für den Fahrzeugsicherheitsversuch erforderlich sind.

Grenzen des Verfahrens sind mit der Forderung verbunden, dass das Verfahren maßstabsinvariant sein muss. Hieraus folgt, dass homogene Stauchungen oder Dehnungen einer Oberfläche nicht aufgedeckt werden können, da diese nicht von Maßstabsänderungen, die durch Neubestimmung der relativen Orientierung der Kameras auftreten, getrennt werden können. Weiterhin ist es nicht möglich, Effekte aus instabilen inneren Orientierungen von tatsächlichen Objektdeformationen zu trennen.

6 Literaturverzeichnis

- BETHMANN, F., HERD, B., LUHMANN, T, OHM, J., 2009: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Bildverarbeitung, Band 18, 2009, S. 303-314.
- BETHMANN, F., JEPPIING, C., LUHMANN, T., 2013: Generation of synthetic image sequences for the verification of matching and tracking algorithms for deformation analysis. In Remondino et al. (eds.), Videometrics, Range Imaging and Applications XII, Proceedings of SPIE, Vol. 8791, pp. 87910K1-10, doi: 10.1117/12.2020510.
- CHUM, O., MATAS, J. KITTLER, J., 2003: Locally Optimized RANSAC. In: B. Michaelis & Krell, G. (eds.): Pattern Recognition, LNCS 2781, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 236-243.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Heribert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- NEITZEL, F., 2004: Identifizierung konsistenter Datengruppen am Beispiel der Kongruenzuntersuchung geodätischer Netze. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 565, München.

- NIEMEIER, W., 2008: Ausgleichsrechnung, 2. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin.
- RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P., KÖLLER P., 2004: Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Bildverarbeitung, Band 13, S. 367-374.
- REINKING, J., 1994: Geodätische Analyse inhomogener Deformationen mit nichtlinearen Transformationsfunktionen. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 413, München.
- WELSCH, W., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., 2000: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Heribert Wichmann Verlag, Heidelberg.