

Dynamische Oberflächenrekonstruktion in Stereobildsequenzen von Hochgeschwindigkeitskameras

THOMAS LUHMANN, AXEL WENDT, Oldenburg & ROBERT GODDING, Braunschweig

Keywords: Photogrammetry, close range photogrammetry, high-speed camera, image matching, images sequence, dynamic scene analysis

Summary: *Dynamic Surface Reconstruction in Stereo Image Sequences from High-speed Cameras.* In automotive industry, an increasing demand on 3D surface reconstruction from high-speed camera images can be observed, e. g. in car safety testing environments. The paper deals with the automatic photogrammetric measurement of free-form surfaces from synchronous stereo and multi-image sequences as they are required for dynamic area-based deformation analysis. Firstly, instrumental solutions for synchronous acquisition of multi-image sequences are discussed. For surface reconstruction different image-based matching methods are evaluated and compared with an object-based matching method based on the FAST Vision principle. For each step of the sequence, a three-dimensional surface model is generated, that can be enhanced to a 4D deformation model with time as fourth dimension. For visual analysis the photogrammetrically oriented image sequences can be resampled to sub-pixel accurate anaglyph movies.

Zusammenfassung: In der Automobilindustrie sind zunehmend flächenhafte 3D-Auswertungen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für die Analyse in der Fahrzeugsicherheit von Interesse. Der Artikel befasst sich mit der automatischen photogrammetrischen Bestimmung von Freiformflächen aus synchronen Stereo- und Mehrbildsequenzen, wie sie für dynamische flächenhafte Verformungsanalysen benötigt werden. Zunächst werden instrumentelle Lösungsmöglichkeiten für die synchrone Aufnahme von Mehrbildsequenzen diskutiert. Für die Bestimmung der Oberfläche werden verschiedene bildraumbasierte Korrelationsansätze miteinander verglichen. Dem wird ein auf dem FAST Vision-Prinzip basierendes objektraumgestütztes Matchingverfahren gegenübergestellt. Als Ergebnis werden für jeden Zeitpunkt der Sequenz dreidimensionale Oberflächenmodelle gewonnen, die über die vierte Dimension der Zeit zu einem 4D-Deformationsmodell führen. Für die visuelle Analyse lassen sich die photogrammetrisch orientierten Bildsequenzen so umrechnen, dass subpixel-genaue Anaglyphenfilme hergestellt werden können.

1 Einführung

Verschärfte gesetzliche Vorgaben im Fahrzeugsicherheitsversuch erfordern zunehmend die Analyse dreidimensionaler Bewegungen und Veränderungen im und am Fahrzeug und der am Unfall beteiligten Menschen. Die Automobilhersteller sind daher gezwungen, die Fahrzeuge so zu konstruieren, dass zulässige Grenzwerte für dimensionelle Veränderungen eingehalten werden, um einen optimalen Schutz von Fahrzeuginsassen und Unfallbeteiligten zu

gewähren. In diesem Rahmen werden nach verschiedenen europäischen Normen bestimmte Versuchsanordnungen vorgeschrieben, die zum Einen messtechnisch überprüft werden müssen (z. B. beim Fußgängeraufprall, siehe RAGUSE & LUHMANN 2006), zum Anderen reproduzierbare Messergebnisse liefern, die dann zur Analyse des Aufprallversuches dienen. Für beide Aufgaben werden neben zahlreichen anderen Sensoren verbreitet Aufnahmen von Highspeed-Kameras verwendet. Sie werden in vielen Bereichen noch zweidimensional ausgewertet,

zunehmend aber auch dreidimensional durch photogrammetrische Verfahren (KÖLLER et al. 1993, RAGUSE et al. 2004).

Für die photogrammetrische Auswertung von Highspeed-Bildsequenzen stehen verschiedene professionelle Lösungen zur Verfügung, die in der Regel für die Erfassung und Verfolgung von signalisierten Punkten geeignet sind. Als Ergebnis werden 3D-Trajektorien ausgegeben. Kommerzielle Produkte werden z. B. durch FALCON oder Signum angeboten. Sie kombinieren Module zur 2D-Bildsequenzauswertung mit Photogrammetrie-Modulen, die in der Regel von Anbietern photogrammetrischer Industriemesssysteme stammen. Für spezielle Fahrzeuguntersuchungen werden Ein- oder Mehrkameranysysteme angeboten (z. B. AICON WheelWatch), die zur schnellen Aufzeichnung von hochdynamischen Vorgängen genutzt werden. Je nach Anordnung (Ein- oder Mehrbildfall) können entweder einzelne Punkte über Vorwärtsschnittverfahren dreidimensional oder die Relativbewegung zweier Starkkörper zueinander in sechs Freiheitsgraden (6DOF) bestimmt werden. Während dabei die Verwendung herkömmlicher Highspeed-Kameras, in Abhängigkeit des verfügbaren Speichers, zu einer maximalen Aufzeichnungsdauer von wenigen Sekunden führt, erlauben echtzeitfähige intelligente Kameras mit kamerainterner Bildauswertung die Aufnahme und Auswertung beliebig langer Sequenzen (WIORA et al. 2004). Diese Fähigkeit ist besonders bei der Messung an Testständen und während Testfahrten vorteilhaft.

Lösungen zur Auswertung von Mehrbildsequenzen für die Rekonstruktion von Freiformflächen existieren ebenfalls auf dem Markt. Sie arbeiten in der Regel mit Verfahren der Stereobildkorrelation, sind also auf zwei Bilder beschränkt, deren perspektive Abbildungseigenschaften nicht zu unterschiedlich sein dürfen. Strenge Matchingverfahren mit Berücksichtigung des vollständigen photogrammetrischen Abbildungsmodells sind aus der Forschung bekannt (z. B. GRUEN & BALTSAVIAS 1988, HEIPKE 1992), werden aber nach Kenntnis der Autoren nicht in kommerziell erhältli-

chen Produkten für die Auswertung von Bildsequenzen angeboten.

Auch im Bereich der Entwicklung von Fahrzeugsicherheitssystemen werden derartige Verfahren bisher erst exemplarisch eingesetzt. Tatsächlich sind die praktischen Probleme bei der Aufnahme der Bildsequenzen bei realen Versuchen insgesamt als sehr schwierig einzustufen. Die Aufnahmeverhältnisse sind oft durch sehr enge bauliche Restriktionen bestimmt, daneben tritt bei der Verwendung von Highspeed-Kameras fast immer auch ein erhebliches Beleuchtungsproblem auf, das aus den extrem kurzen Belichtungszeiten (< 1 ms) resultiert. In verschiedenen Versuchsszenarien kommt es zudem zu weiteren erschwerten Bedingungen durch herumfliegende Teile, Störobjekte und Verdeckungen. Diese Umgebungsparameter führen zu erschwerten Bildzuordnungsbedingungen. Aufgrund der glänzenden Oberflächeneigenschaften wird eine synthetische Struktur aufgebracht. Diese wurde empirisch so gewählt, dass sie unempfindlich gegenüber größeren Beleuchtungsunterschieden korrespondierender Bildbereiche ist.

In einer Zusammenarbeit der Firmen Porsche, AICON und dem IAPG werden zurzeit verschiedene Versuche zur Bestimmung dynamischer Verformungsmessungen mit Highspeed-Kameras durchgeführt. Die Versuche dienen zur Evaluation geeigneter Aufnahmeverfahren, Markierungstechniken und Auswertestrategien, die hinsichtlich Genauigkeit, Verarbeitungszeit und Praxistauglichkeit den Anforderungen des Anwenders genügen müssen. Erste Ergebnisse wurden bei GODDING et al. (2006) publiziert.

2 Mehrbild-Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Dreidimensionale Auswertungen von schnell ablaufenden dynamischen Prozessen (z. B. Strömungsmessungen, Sicherheitsversuche im Fahrzeugbau) müssen in der Regel mit mindestens zwei Kameras aufgenommen werden. Die Synchronisation von zwei oder mehr gleichzeitig aufnehmenden Ka-

meras ist nicht trivial und häufig nur mit hohem technischen Aufwand möglich.

Hochgeschwindigkeitskameras sind heute mit bis zu 1000 Bildern pro Sekunde bei einer Bildauflösung von bis ca. 1500×1000 Pixel verfügbar, z. B. von WEINBERGER, REDLAKE oder NAC. Die Synchronisation von zwei oder mehrerer dieser Kameras muss i. d. R. besser sein als $50 \mu\text{s}$, ist daher technisch aufwendig und in realen Systemen keinesfalls immer garantiert. Demzufolge ist eine schnelle und synchrone Stereo- oder Mehrbilderfassung nur mit hohem finanziellem Aufwand möglich.

Die Aufnahme von Stereobildsequenzen ohne Synchronisationsfehler gelingt mit Ein-Kamera-Lösungen und optischen Strahlteilern (LUHMANN 2005). In einer Kooperation mit den Unternehmen Volkswagen und Porsche wurde dazu ein Prototyp entwickelt, der eine Highspeed-Kamera mit einem optischen Stereovorsatz kombiniert (LUHMANN & RAGUSE 2005). Die Strahlteilung erfolgt über ein Prisma auf zwei Umlenkspiegel, deren Abstand im Wesentlichen die Basislänge festlegt (Abb. 1). Dadurch entstehen zwei virtuelle Kameras, deren ef-

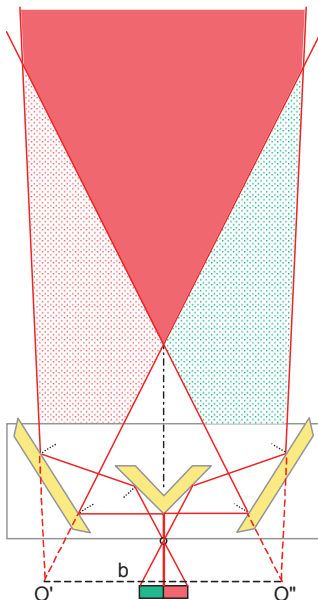


Abb. 1: Abbildungsprinzip einer Spiegelstereokamera.



Abb. 2: Prototyp einer Spiegelstereokamera.

fektive Bildauflösung jedoch um jeweils 50% in horizontaler Richtung reduziert ist. Vorteilhaft ist der reduzierte Kostenaufwand, da nur eine Highspeed-Kamera verwendet zu werden braucht. Nachteilig auf die Messgenauigkeit wird sich ein eventuell verkürzter Basisabstand bzw. die auf die Hälfte reduzierte Bildauflösung auswirken. Es wurde bereits gezeigt, dass der optische Aufbau hochgenau kalibriert werden kann, nach Bedarf auch mit einer Modellierung etwaiger unebener Spiegelflächen (LUHMANN & RAGUSE 2005).

Das in Abb. 2 dargestellte Prototypensystem besitzt eine virtuelle Basis von ca. 325 mm. Damit konnten absolute Genauigkeiten von 0.3 mm senkrecht zur Aufnahmerichtung und 2 mm in Aufnahmerichtung in einem Messvolumen von ca. $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ erreicht werden. Damit werden die Genauigkeitsanforderungen im Bereich der Fußgängerschutztests erreicht. Weitere Varianten des Systems für andere Anwendungen und Messvolumina sind derzeit in der Entwicklung. Eine Serienproduktion ist in Vorbereitung.

Für die hier behandelte Untersuchung wurde ein Testobjekt von ca. $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ Ausdehnung einer dynamischen Belastung unterzogen. Aufgenommen wurde der Versuch gleichzeitig mit drei Kamerasystemen:

- zwei synchronisierten NAC HiDCam Kameras (760×512 Pixel, Bildfrequenz 1000 Hz, Brennweite 12.5 mm),

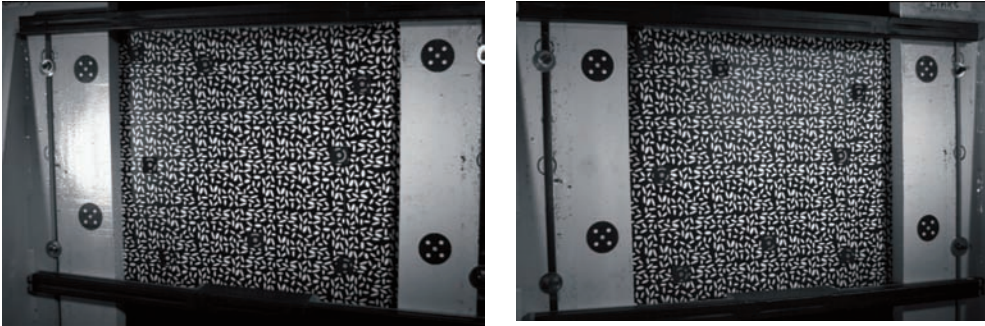


Abb. 3: Bildpaar einer Stereosequenz (NAC HiDcam).



Abb. 4: Originalbild mit Stereostrahlteilung.

- drei synchronisierten Weinberger Visario Kameras (1536×1024 Pixel, Bildfrequenz 1000 Hz, Brennweite 25 mm),
- Spiegelstereovorsatz mit Weinberger Motionfire Kamera (640×512 Pixel pro Bildhälfte, Bildfrequenz 1000 Hz, Brennweite 12.5 mm).

Alle Aufnahmesysteme werden mit Hilfe des Programmsystems AICON 3D Studio kalibriert und orientiert. Dazu wurden für die Kameras nach der Ausrichtung mittels eines dreidimensionalen CFK-Referenzfeldes mit bekannten 3D-Koordinaten die inneren und relativen Orientierungen bestimmt. Zur Kontrolle wurden die am Objekt vorhandenen Punkte gemessen, wobei das erreichte Genauigkeitsniveau etwa bei 0.5 mm als RMS-Werte der Objektpunkte lag.

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen beispielhafte Ausschnitte der aufgenommenen Bildse-

quenzen. Das auf der Oberfläche sichtbare Muster wird in Kap. 4 erläutert. Die am linken und rechten Bildrand erkennbaren Fünf-Punkt-Marken befinden sich auf festen Betonklötzen und definieren ein ortsfestes Koordinatensystem. Die auf der Oberfläche befindlichen codierten Messmarken dienen zur automatischen Orientierung sowie als Kontrollpunkte zur Verifizierung der erreichten Messergebnisse.

3 Umbildung von Stereobildsequenzen

Wenn die inneren und äußeren Orientierungen der aufgenommenen Messbilder vorliegen, lassen sich die Originalbilder umbilden in

- a) verzeichnungsfreie Bilder,
- b) Stereonormalbilder,
- c) Anaglyphenbilder.

3.1 Verzeichnungsfreie Bilder

Mit gegebenen Parametern der inneren Orientierung lassen sich hauptpunkt-korrigierte und verzeichnungsfreie Bilder berechnen. Die Bilder werden dabei so transformiert, dass der neue Bildhauptpunkt die Bildkoordinaten (0/0) erhält und exakt im Zentrum der neuen Bildmatrix liegt. Die Verzeichnungskorrektur erfolgt für jedes Pixel rekursiv (LUHMANN 2003, S. 127). Das verzeichnungsfreie Bild hat die Kamerakonstante des Originals, alle anderen Kameraparameter sind Null. Damit ist das Modell einer Lochkamera realisiert.

Verzeichnungsfreie Bilder werden für Programmsysteme benötigt, die selbst keine Möglichkeit zur Verzeichnungskorrektur besitzen, oder nach einem nicht näher beschriebenen Korrekturmodell arbeiten.

Sie können weiterhin für eine schnellere und effizientere Bilddatenverarbeitung genutzt werden.

3.2 Stereo-Normalbilder

Der Stereonormalfall ist eine theoretische Aufnahmeconfiguration mit zwei senkrecht zur Basis ausgerichteten Bildern. Die Bilder besitzen dieselbe Kamerakonstante, Hauptpunkt-lage und Verzeichnungswerte sind

Null. Beim Stereonormalfall liegen Epipolarlinien stets parallel zur x' -Achse des Bildkoordinatensystems auf gleichen y' -Werten. Die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten beschränkt sich daher auf die Zuordnung in einzelnen Bildzeilen bzw. einen schmalen Band aufgrund kleiner Abweichungen der Orientierungsdaten oder Bildmessungen. Perspektivische Verzerrungen des Objektes treten ebenfalls nur in x' -Richtung auf. Die Normalbilder stellen damit eine weitere Stufe eines optimierten Zugriffs auf die Bilddaten dar.

Die Umrechnung erfolgt nach dem in Abb. 5 dargestellten Prinzip. Die Parameter der relativen Orientierung liegen nach dem Prinzip der unabhängigen Bildpaare vor, d. h. die x -Achse des Modellkoordinatensystems xyz verläuft durch die beiden Projektionszentren. Die neuen Bilder besitzen die (virtuellen) Bildkoordinatensysteme x'_n, y'_n, c_n bzw. x''_n, y''_n, c_n und die gemeinsame Kernlinie k . Jeder Bildpunkt (x'_n, y'_n) bzw. (x''_n, y''_n) wird mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen in die ursprünglichen Bildkoordinaten zurückgerechnet und der dort vorliegende Grau- oder Farbwert im neuen Bild abgespeichert.

Die entzerrten Normalbilder besitzen im Modellkoordinatensystem keine räumli-

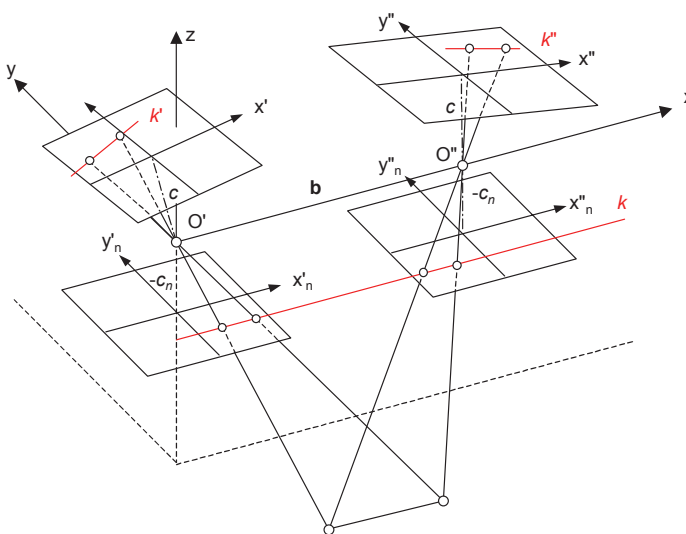


Abb. 5: Prinzip der Umbildung eines Stereobildpaares in Normalbilder.

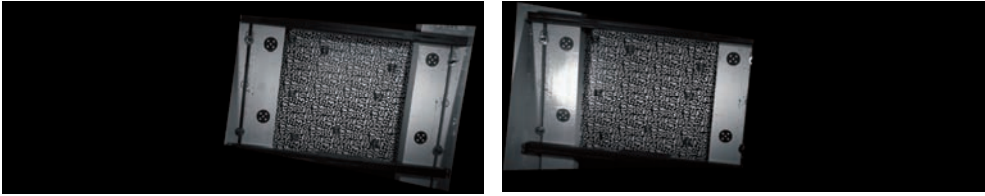


Abb. 6: Normalbilder.

chen Drehungen. Die Drehmatrizen der Normalbilder \mathbf{R}_n im übergeordneten Koordinatensystem werden aus der Drehmatrix \mathbf{A} der relativen Orientierung und der Drehmatrix \mathbf{R} des Originalbildes berechnet nach:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R} \cdot \mathbf{A}^T$$

Die Translationen der äußeren Orientierungen bleiben erhalten.

Die Entzerrung der Bilder zu Normalbildern kann bei größeren Konvergenzwinkeln zu Ergebnisbildern mit größeren informationslosen Bereichen führen (siehe Abb. 6). Die Bilder können auf das ursprüngliche Bild zugeschnitten werden, wenn die entsprechende Hauptpunktverschiebung gespeichert wird.

3.3 Anaglyphenbilder

Für die Betrachtung von Stereoaufnahmen stellt das Anaglyphenverfahren ein einfaches Verfahren dar, das auf Grauwertbilder beschränkt ist. Eine optimale Stereobetrachtung ergibt sich dann, wenn die entste-

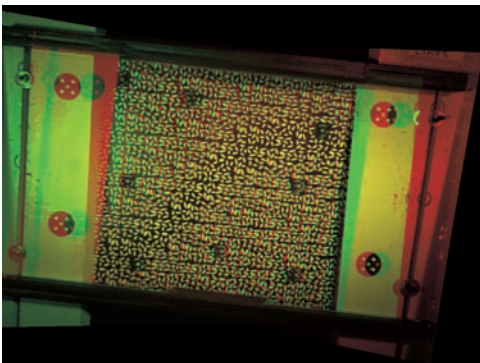


Abb. 7: Anaglyphenbild.

henden Parallaxen parallel zur Augenbasis verlaufen, d. h. wenn Stereonormalbilder nach Kap. 3.2 vorliegen. Abb. 7 zeigt das Bildpaar aus Abb. 3 umgerechnet als Anaglyphenbild. Wenn alle Bilder der Sequenz nach diesem Verfahren umgebildet werden, lässt sich der aufgenommene Prozess als stereoskopischer Film abspielen und betrachten.

4 Oberflächenrekonstruktion

4.1 Oberflächentextur

Im Automobilbau sind die meisten vorkommenden Oberflächen texturlos, d. h. sie müssen in der Regel mit einer künstlichen Textur versehen werden. Für die Messung statischer Oberflächen werden heute fast ausschließlich Streifenprojektionsverfahren eingesetzt. In speziellen Fällen werden auch Rasterprojektionsverfahren, elektrolytische Markierungsverfahren oder Zufallmuster-basierende Methoden eingesetzt, die auch für dynamische Anwendungen geeignet sind. In diesem Fall werden Korrelationsverfahren mit künstlich aufgebrachtener Textur betrachtet.

Da für die Aufnahme hoher Bildfrequenzen mit Highspeed-Kameras häufig nur wenig Licht bereitgestellt werden kann, eignen sich nur kontrastreiche Muster. Sie sollten darüber hinaus Gradienteninformation in allen Richtungen aufweisen und der gewünschten Objektauflösung angepasst sein. Für Matchingverfahren, die mit Bildpyramiden arbeiten, muss das Muster außerdem noch eine eindeutige Zuordnung in unterschiedlichen Skalen erlauben.

Das in den Abb. 3 verwendete Muster besitzt hohe Kontraste und Gradienten in allen

Richtungen. Die verwendeten Ellipsen dienen dabei nicht zur Einzelpunktmessung und könnten auch durch ein anderes Muster mit entsprechenden Eigenschaften ersetzt werden.

4.2 Stereobildzuordnung

Stereobildzuordnung auf Basis der normierten Kreuzkorrelation ist eine seit langem bewährte Methode zur Oberflächenmessung (z. B. PIECHEL 1991). Sie zeichnet sich durch hohe Robustheit, Kontrastunabhängigkeit und einfache Implementierung aus. Die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildausschnitten (Stichproben) wird durch den Korrelationskoeffizienten der beiden Grauwertstichproben gemessen. Die Nachteile des Verfahrens liegen vor allem in der begrenzten Möglichkeit, geometrische Unterschiede, z. B. durch Drehungen oder perspektive Abbildungen, zu modellieren. Die normierte Kreuzkorrelation ist stets auf zwei Bilder beschränkt.

Zur Berechnung von 3D-Oberflächenpunkten durch korrelierte Bildpunkte gibt es verschiedene Strategien. Ausgehend von Näherungskoordinaten im Objektraum lassen sich die 3D-Koordinaten alternativ bestimmen durch

a) Räumlichen Vorwärtsschnitt

Aus den im linken und rechten Bild gefundenen homologen Punkten werden mittels räumlichen Vorwärtsschnittes die Objektkoordinaten bestimmt. Die Methode eignet sich nicht direkt, wenn im Objektraum ein Oberflächenraaster mit konstanten (vorgegebenen) XY-Koordinaten bestimmt werden soll, also nur ein neuer Z-Wert pro Punkt gesucht wird. Der Vorwärtsschnitt führt dagegen zu neuen Koordinaten in allen drei Richtungen.

b) Vertical Line Locus

Ausgehend von einer gewählten X,Y Position im Objektraum wird eine Vertikale in Z-Richtung gebildet. Entlang dieser Richtung werden, ausgehend von einem Näherungswert in Z, mit einem bestimmten Inter-

vall in beiden Richtungen neue Z-Werte bestimmt. Für jeden Z-Wert werden mittels der Abbildungsgleichungen die zugehörigen Bildkoordinaten in den Stereobildern berechnet und die zugehörigen Bildbereiche miteinander korreliert. Der gesuchte Z-Wert entspricht der Position entlang der Vertikalen mit der höchsten Korrelation. Das gewählte Z-Intervall kann iterativ verkleinert werden, so dass ein hierarchischer Ansatz entsprechend einer Bildpyramide entsteht. Da die XY-Werte dabei nicht verändert werden, kann unmittelbar ein Punktraster mit konstantem Punktabstand bestimmt werden.

Beide Strategien lassen eine Verfeinerung des Matching mit Hilfe einer Lösung nach der Methode der Kleinsten Quadrate zu. An den durch Kreuzkorrelation gefundenen Bildpositionen kann das Verfahren des Least-Squares-Matching (GRUEN 1985) angewendet werden, das im Rahmen einer Ausgleichung eine affine geometrische und radiometrische Anpassung der Bildausschnitte vornimmt. Das Verfahren kann durch Epipolarbedingungen und beliebig viele Bilder erweitert werden (GRUEN & BALTSAVIAS 1988).

4.3 Objektraumbasierte Mehrbildzuordnung

Das durch die Arbeiten von WROBEL (1987) und WEISENSEE (1992) unter dem Begriff Facetten-Stereosehen (FAST Vision) bekannte Verfahren betrachtet als Grundlage die physikalische Formulierung der Bildentstehung. Mit dem Ansatz wird der Bezug der Bildpunkte bzw. -strahlen ausgehend von ihrer Sensorposition zu ihren Oberflächenelementen invers beschrieben. In der Formulierung dieser physikalischen Beziehung können grundsätzlich beliebige Abbildungsgeometrien oder auch Reflexionsmodelle berücksichtigt werden. Als Unbekannte sind in der Regel der radiometrische Grauwert und der geometrische Höhenwert des Oberflächenelementes zu schätzen. Die Schätzung erfolgt nach der Methode der Kleinsten Quadrate im Gauß-Markov-Modell. Dabei werden iterativ ein Grauwert-

und Geometriemodell bestimmt, welches i. d. R. durch ein Raster beschrieben wird. Die Fläche zwischen den Rasterstützstellen wird mit einer Interpolationsfunktion beschrieben, i. d. R. bi-linear. Das ausgeglichene radiometrische Modell entspricht einem Orthophoto des Objektes, welches aus allen zur Verfügung stehenden Bildinformationen ermittelt wurde. Das Verfahren kann grundsätzlich auf zwei oder mehr Bilder und/oder Spektralkanäle angewendet werden.

Die Methode wurde in den letzten Jahren am IAPG weiterentwickelt (WENDT et al. 2004), insbesondere auch die Berücksichtigung von weiteren Objektinformationen wie Punktwolken (WENDT 2002). Die Vielseitigkeit des Ansatzes zeigt sich dadurch, dass er unter anderem auch für die Rekonstruktion der Mars-Oberfläche eingesetzt werden kann (GEHRKE et al. 2006). Der besondere Vorzug des Verfahrens ist die simultane Rekonstruktion des gesamten Oberflächenbereiches. So können unter anderem texturlose Bereiche durch Implementierung von Bedingungsgleichungen überbrückt, oder auch eine Krümmungsminimierung relativ zur Nachbarschaft erreicht werden. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass durch die angesprochene Vorgehensweise in der Prozessierung ein großes Normalgleichungssystem zu lösen ist, welches zwar von der Größe und Auflösung des Oberflächenrasters abhängt, dennoch einen hohen Rechenaufwand darstellt. Abhilfe wird durch eine optimierte Inversion der entstehenden Bandmatrixstruktur erreicht.

4.4 Flächenverformung in der Bildsequenz

Für die Erfassung einer dynamischen Flächenverformung sind unterschiedliche Strategien und Verfahren denkbar:

- a) In jeder Epoche werden unabhängig voneinander Oberflächenmodelle gemessen. Dabei kann das Modell der Epoche $k-1$ als Näherungsmodell für die Epoche k verwendet werden. Wird ein konstantes XY-Raster vorgegeben, werden die Deformationen ausschließlich in vertikaler Richtung bestimmt.
- b) Wie a), jedoch werden die in Epoche 0 erhaltenen Oberflächenpunkte jeweils so in die nächste Epoche übertragen, dass jeweils der physikalische Oberflächenpunkt durch die Bildsequenz verfolgt wird. Dazu wird das Bildmuster eines Punktes im linken Bild durch Korrelation in das linke Bild der folgenden Epoche übertragen. Die ermittelten Deformationsvektoren verlaufen damit in beliebiger Richtung entsprechend der Punktbewegungen im Raum.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Oberflächenmodellierung

Die folgenden Abbildungen zeigen eine Auswahl berechneter Oberflächenmodelle aus der Vielzahl inzwischen erstellter Ergebnisse. Beispielhaft wird eine Folge von 100 Bildpaaren aufgenommen mit zwei NAC HiDcam (siehe Kap. 2) ausgewertet. Die Pixelauflösung am Objekt beträgt 1.2 mm. Der ausgewertete Objektbereich umfasst eine Fläche von 450 mm \times 450 mm bei einer Rasterweite von 10 mm.

Abb. 8 zeigt Ausschnitte aus der Sequenz berechneter Oberflächenmodelle mit festem Punktraster. Das Objekt liegt in einem Winkel von ca. 10 Grad geneigt zur XY-Ebene. Während des Verformungsprozesses beult es sich in der Mitte aus. Die maximale Höhenänderung beträgt ca. 44 mm und tritt zwischen den Epochen 30 und 45 auf.

Für die visuelle Analyse ist es hilfreich, wenn die Deformation als räumlich animier-

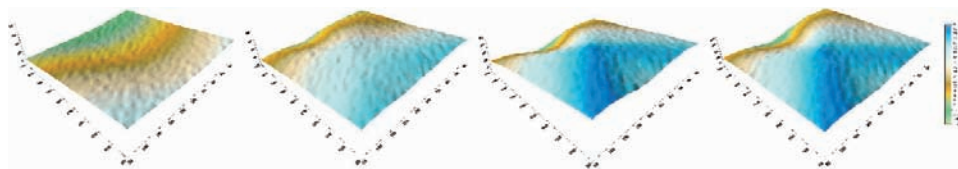


Abb. 8: Oberflächenmodelle der Epochen 0, 15, 30 und 45 (festes Punktraster).

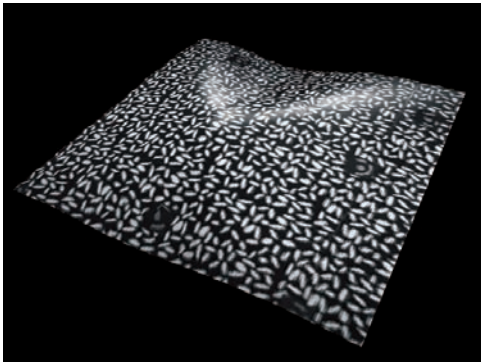


Abb. 9: Oberflächenmodell überlagert mit Bildtextur.

te Bildfolge, z. B. als dynamisches VRML, dargestellt werden können. Dazu kann in üblicher Weise das Originalbild durch Texture Mapping auf das Oberflächenmodell projiziert werden. Abb. 9 zeigt dazu ein Beispiel.

Da für das gezeigte Anwendungsbeispiel keine übergeordnet genau gemessenen Referenzflächen vorhanden waren, wird die erreichte Genauigkeit analysiert durch visuelle stereoskopische Kontrolle an einem photogrammetrischen Stereoarbeitsplatz, durch Vergleich von Oberflächenpunkten mit den signalisierten Passpunkten und durch Vergleich der Ergebnisse verschiedener Messverfahren untereinander.

Die visuelle stereoskopische Kontrolle zeigt im Bereich der großen Deformationen leichte Abweichungen, deren Ursache nicht unbedingt in der Genauigkeit der Höhenmessung liegen muss, sondern auch in möglichen Abweichungen bei den Parametern der inneren und äußeren Orientierung.

Der Vergleich von berechneten Oberflächenpunkten mit den Koordinaten der signalisierten Punkte, die aus einer photogrammetrischen Auswertung hoch auflösender Bilder stammen, zeigt eine mittlere Abweichung von ca. 0.7 mm. Dieser Wert bestätigt die theoretische Höhengenaugkeit im Stereofall

$$dh = \frac{h^2}{b \cdot c} dp_{x'}$$



Abb. 10: Oberflächenmodell der Epoche 18 (FAST Vision).

die mit $b = 885$ mm, $h = 1250$ mm und $dp_{x'} = 6 \mu\text{m}$ (0.5 Pixel) einen Wert von 0.8 mm ergibt.

4.5.2 Deformationen

Beispiele für die zwischen zwei Epochen berechneten Deformationen zeigen die folgenden Abbildungen. Abb. 11 zeigt Verschiebungsvektoren über zwei Epochen mit festem Punktraster, d. h. die Vektoren verlaufen vertikal. Die Farbe der Vektoren entspricht ihrer Länge entsprechend der abgebildeten Farbskala. Alternativ lassen sich die Deformationen auch als Differenzmodelle entsprechend Abb. 12 darstellen.

Für die materialtechnische Analyse ist es wünschenswert, die Trajektorien konkreter Objektpunkte auf der Oberfläche darzustellen. Dazu müssen Oberflächenmodelle der einzelnen Epochen vorliegen, deren Punkte das Ergebnis einer Punktverfolgung in der Bildsequenz sind. Die Punktverfolgung geschieht dabei nach folgendem Ablaufschema: Ausgehend von einem festen Punktras-

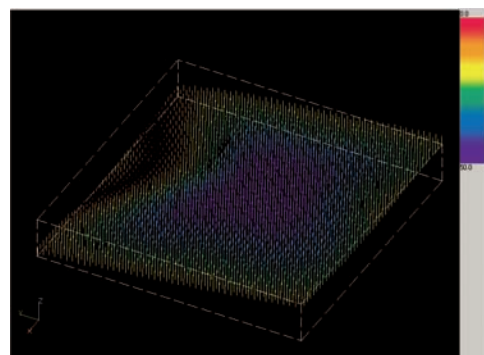


Abb. 11: Deformationsvektoren zwischen Epoche 0 und Epoche 25 (festes Punktraster).

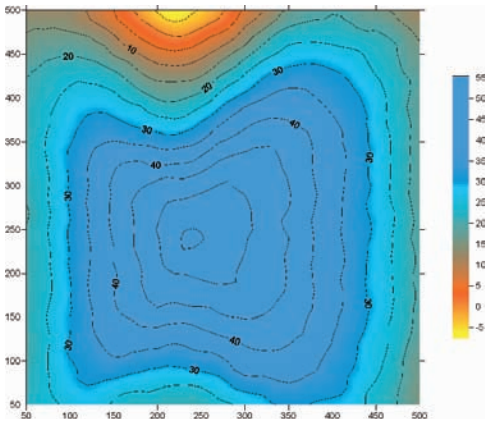


Abb. 12: Deformationen zwischen Epoche 0 und Epoche 30 (festes Punktraster).

ter in Epoche 0 wird ein erstes Höhenmodell berechnet. Für jeden Oberflächenpunkt wird dann an der Stelle $(x',y') = f(X,Y,Z)$ ein Bildausschnitt (Template) generiert und mittels Kleinste-Quadrate-Zuordnung (LSM) in das linke Bild der nächsten Epoche übertragen. Der zugehörige homologe Punkt (x'',y'') im rechten Bild wird über Kreuzkorrelation und LSM gesucht. Der neue Oberflächenpunkt ergibt sich dann durch räumlichen Vorwärtsschnitt.

Die aus diesen Modellen berechneten Verschiebungsvektoren verlaufen entsprechend der Objektverformung in beliebiger Raumrichtung. Abb. 13 zeigt ein Beispiel für die ungefilterten Deformationsvektoren zwischen Epoche 0 und Epoche 25. Die hier

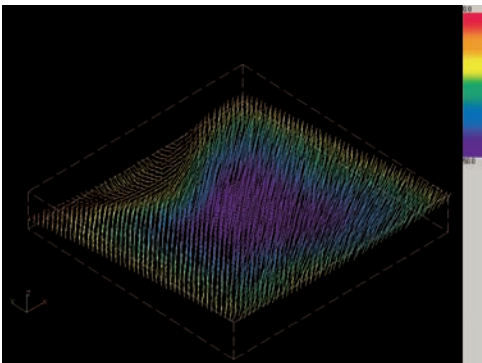


Abb. 13: Deformationen zwischen Epoche 0 und Epoche 25 (variables Punktraster).

noch erkennbaren Ausreißer liegen an den Oberflächenbereichen, die durch die codierten Messmarken gekennzeichnet sind und sich offenbar für ein Matching weniger gut eignen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag diskutiert Möglichkeiten zur Aufnahme und Messung dynamischer Flächenverformungen am Anwendungsbeispiel von Fahrzeugsicherheitsversuchen. Hierfür werden Mehrbildsequenzen mit Highspeed-Kameras aufgezeichnet, die nach Kalibrierung und Orientierung anschließend durch Bildzuordnungsverfahren flächenhaft ausgewertet werden. Nicht ausreichend texturierte Oberflächen müssen dazu künstlich mit einem geeigneten Muster versehen werden, das gleichermaßen hohe Kontraste bereitstellt und eindeutige Bildzuordnung in verschiedenen Skalen erlaubt.

Für die Oberflächenrekonstruktion werden verschiedene Ansätze basierend auf bildraumbasierter Stereokorrelation und objektraumbasierter Mehrbildzuordnung eingesetzt und bewertet. Die praktische Eignung eines Bildzuordnungsverfahrens richtet sich dabei gleichermaßen nach erreichbarer Genauigkeit, Vollständigkeit des Oberflächenmodells, Robustheit gegenüber Störungen, Rechenzeiten, Bedienbarkeit und Verfügbarkeit in einer professionellen Programmumgebung.

Die vom Anwender spezifizierten maximalen Rechenzeiten von ca. 2 s pro Bildpaar werden nur von Stereokorrelationsmethoden erreicht. In der erreichbaren Objektgenauigkeit unterscheiden sich die verschiedenen Ansätze nicht signifikant, wobei das objektraumbasierte Zuordnungsverfahren leicht so parametrisiert werden kann, dass zu glatte Oberflächen entstehen. Gleichwohl bietet es Vorteile bei der Nutzung von mehr als zwei Kameras sowie der potentiellen Behandlung von Störobjekten im Objektraum.

Die Visualisierung von dynamischen Oberflächenveränderungen gelingt einerseits mit stereoskopischen Filmsequenzen, deren Einzelbilder auf Stereonormalbilder entzerrt werden. Andererseits lassen sich in-

teraktiv bedienbare 3D-Sequenzen herstellen, die eine qualitative und quantitative Beurteilung des Deformationsprozesses zulassen. Diese Möglichkeit diskutiert JAQUEMOTTE (2006) in diesem Heft.

Literatur

- GEHRKE, S., SCHNEIDER, I., NEUKUM, G. & HRSC Co-Investigator Team, 2006: Combined derivation of orthoimages and DTM from Mars Express HRSC data by means of matching in object space. – Fifth International Symposium »Turkish-German Joint Geodetic Days« March 28–31, 2006, Technical University Berlin.
- GODDING, R., LUHMANN, T. & WENDT, A., 2006: 4D Surface matching for high-speed stereo sequences. – ISPRS Symposium Commission V, Dresden.
- GRUEN, A., 1985: Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique. – South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, **14** (3): 175–187.
- GRUEN, A. & BALTSAVIAS, E.P., 1988: Geometrically Constrained Multiphoto Matching. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (**42**) 3: 633–641.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & RAGUSE, K., 2005: Three-dimensional acquisition of high-dynamic processes with a single-camera system and stereo-beam splitting. – Optical 3-D Measurement Techniques, Vol. 2: 175–184.
- HEIPKE, C., 1992: A global approach for least squares image matching and surface reconstruction in object space. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (**58**) 3: 317–323.
- JAQUEMOTTE, I., 2006: Visualisierung und Analyse dynamischer Geodaten am Beispiel von Schiffsbewegungen in begrenzten Fahrwassern. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation **2006** (5): 411–416. (In diesem Heft)
- KÖLLER, P., REHFELD, N. & GERHARD, A., 1993: Automatische Auswertung der Filmbildsequenzen von Crashversuchen unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung. – Proceedings of MessComp 1993: Messen und Verarbeiten elektrischer und nichtelektrischer Größen: 85–91.
- LUHMANN, T., 2005: Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **2005** (2): 101–110.
- LUHMANN, T. & RAGUSE, K., 2005: Synchronous 3-D High-Speed Camera with Stereo-Beam Splitting. – Sensor + Test, Nürnberg: 443–448.
- PIECHEL, J., 1991: Stereobild-Korrelation. – In: BÄHR/VÖGTLE (ed.): Digitale Bildverarbeitung – Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 96–132.
- RAGUSE, K. & LUHMANN, T., 2006: Einsatz der dynamischen Photogrammetrie bei Fußgängerschutzversuchen in der PKW-Entwicklung. – In: LUHMANN/MÜLLER (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 10–17.
- RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P. & KÖLLER, P., 2004: Überlagerung der Bildinformationen von Berechnungsanimationen und Highspeed-Filmsequenzen mit Methoden der 3D-Bildmesstechnik. – In: BONFIG (ed.): Messen, Prüfen, Automatisieren, Band 5, Sensoren Signale Systeme, b. – Quadrat Verlag, Kreuztal: 199–208.
- WEISENSEE, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 374.
- WENDT, A., 2002: Gemeinsame Ausgleichung von Laserscannerdaten und digitalen photogrammetrischen Bildern. – Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **2002** (2): 103–110.
- WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M., 2004: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen. – Publikationen der DGPF, Band 16, Halle: 59–66.
- WIORA, G., BABROU, P., WILLBOLD, M., KOFLER, R. & MERGENTHALER, E., 2004: WheelWatch – Online-Photogrammetrie mit FPGA-Bildverarbeitung. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Wichmann Verlag, Heidelberg: 272–278.
- WROBEL, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3/1987: 93–101.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. THOMAS LUHMANN,
Dipl.-Ing. AXEL WENDT
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven
Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg
Tel.: 0441-7708-3172, Fax: 0441-7708-3170
e-mail: luhmann@fh-oldenburg.de,
a.wendt@fh-oldenburg.de

Dipl.-Ing. ROBERT GODDING
AICON 3D Systems GmbH
Biberweg 30 C, D-38114 Braunschweig
Tel.: 05 31-58 000 58, Fax: 05 31-58 000 60
e-mail: robert.godding@aicon.de

Manuskript eingereicht: Mai 2006
Angenommen: Juni 2006