

Photogrammetrische Auswertung asynchroner Bildsequenzen

Karsten RAGUSE, Christian HEIPKE

Zusammenfassung

Die dreidimensionale photogrammetrische Auswertung von dynamischen Vorgängen mit Hilfe von Bildsequenzen setzt im Allgemeinen eine exakt synchrone Aufnahme der Sequenzen voraus. Asynchronitäten zwischen den Aufnahmesystemen führen zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen der Auswertung. Bei den meisten Anwendungen wird die notwendige Synchronisation der Systeme durch externe Taktgeber realisiert. Im vorliegenden Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, in dem die Asynchronität der Bildsequenzen im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung aus den Bildinformationen bestimmt wird. Ähnlich wie bei der Modellierung der Parameter der inneren Orientierung bei der Kamera-Kalibrierung werden im vorgestellten Verfahren die zeitlichen Effekte im Rahmen einer zeitlichen Kalibrierung ermittelt und bei der Auswertung berücksichtigt. Analog zur Kamera-Kalibrierung werden zwei Verfahren beschrieben, eine Simultan- und eine Testfeldkalibrierung.

Durch die Modellierung der zeitlichen Effekte im Rahmen der Auswertung wird das Genauigkeitspotential der dreidimensionalen Punktbestimmung aus Bildsequenzen im Gegensatz zu den bestehenden Auswerteverfahren deutlich verbessert. Mit diesem Verfahren können auch Aufnahmen von Kameras ausgewertet werden, welche hardwaretechnisch nicht exakt synchronisiert werden können. Erste Testreihen bestätigen die theoretisch begründeten Erwartungen an die neue Methode. Bei einer Aufnahme Frequenz von 1000 Hz, einer Objektgeschwindigkeit von 12 m/s und einer Asynchronität von 0.8 ms konnte die Genauigkeit der Objektkoordinaten etwa um den Faktor 10 verbessert werden.

1 Einführung

Die dreidimensionale photogrammetrische Auswertung von dynamischen Vorgängen stellt ein immer größer werdendes Anwendungsgebiet der Photogrammetrie dar. Eine wichtige Voraussetzung ist der Einsatz von exakt synchronisierten Kameras. Ebenso wie auch andere Komponenten der Optischen Messkette stellt die Synchronität der Aufnahmesysteme einen entscheidenden Einflussfaktor für die Genauigkeit der dreidimensionalen Punktbestimmung aus Bildsequenzen dar (RAGUSE & WIGGENHAGEN, 2003).

Die Ableitung von dreidimensionalen Bewegungen aus Bildsequenzen kommt in verschiedenen Bereichen zum Einsatz. Sie wird beispielsweise bei der dynamischen Bestimmung von Wellenoberflächen (SANTEL ET AL., 2003), der Auswertung von Bewegungsvorgängen im Rahmen von Fahrzeugsicherheitsversuchen (RAGUSE ET AL., 2004), der Erfassung von dreidimensionalen Bewegungsvorgängen von Menschen (D'APUZZO, 2003) und der so genannten Particle Tracking Velocimetry in Flüssigkeiten (MAAS, 1992; WILLNEFF, 2003) oder Gasen (PUTZE, 2004) benötigt.

Für die Synchronisation der Aufnahmesysteme werden zurzeit im Wesentlichen zwei unter-

schiedliche Verfahren eingesetzt. In den meisten Anwendungen wird zur Synchronisation der Kameras ein externes kontinuierliches Synchronisations-Triggersignal genutzt. Darüber werden alle Auslösezeitpunkte der Belichtung der Kameras gesteuert. Die Genauigkeit der Synchronisation ist abhängig vom internen Zeitverzug der Bildaufnahme in den einzelnen Aufnahmesystemen. Eine andere Möglichkeit, synchrone Bildsequenzen zu erzeugen, ist der Einsatz eines Strahlteilers vor dem Objektiv der Kamera. Durch diesen so genannten Spiegelvorsatz werden zwei exakt synchrone Kameras simuliert, allerdings mit dem Nachteil, dass pro Bildsequenz nur die halbe Sensorfläche der Kamera zur Verfügung steht und die Aufnahmekonfiguration durch den Strahlteiler vorgegeben ist.

Im vorliegenden Artikel wird eine alternative Möglichkeit vorgestellt, mit der asynchrone Bildsequenzen photogrammetrisch ausgewertet werden können. Anders als bei den angesprochenen Verfahren geschieht dies nicht über eine Hardwarekomponente, sondern wird im Rahmen der Auswertung berücksichtigt. Die Asynchronität der Aufnahmesysteme wird dabei als Unbekannte in einer erweiterten Bündelblockausgleichung betrachtet. Der Ablauf einer solchen Synchronisationsmethode wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

2 Zeitliche Komponenten der Optischen Messkette

Unter dem Begriff der zeitlichen Komponenten der Optischen Messkette werden verschiedene physikalische Effekte zusammengefasst. In Bezug auf die verschiedenen Aufnahmesysteme sind dies konstante Zeitunterschiede zwischen den Aufnahmezeitpunkten, unterschiedliche Verzögerungszeiten bei der Signalübertragung, unterschiedliche Belichtungszeiten und unterschiedliche Aufnahmefrequenzen. Unabhängig von ihren physikalischen Ursachen werden diese Effekte im Allgemeinen unter dem Begriff der Asynchronität zusammengefasst.

Im vorliegenden Artikel wird der Begriff der Asynchronität wie folgt benutzt: Die Asynchronität besteht aus zwei Komponenten, einem konstanten Anteil, der als Zeit-Offset bezeichnet wird und einem zeitlich linearen Anteil, der als zeitliche Drift bezeichnet wird. Diese beiden Werte werden für jedes Aufnahmesystem bestimmt und geben die Abweichungen zu einem Referenzsystem an. Dieses kann sowohl ein externes Zeitmesssystem sein, als auch eines der Aufnahmesysteme im zu synchronisierenden Verbund.

2.1 Zeit-Offset

Unter dem Begriff des Zeit-Offsets eines Aufnahmesystems, welcher oft den Hauptteil der Effekte der zeitlichen Komponenten ausmacht, lassen sich die Auswirkungen unterschiedlicher Belichtungszeiten und sonstiger konstanter Zeitunterschiede zwischen den Aufnahmesystemen zusammenfassen. Der Zeit-Offset ist ein Wert, der pro Aufnahmesystem relativ zum Referenzsystem angegeben wird und für die gesamte Messdauer konstant ist.

Die Auswirkungen des Zeit-Offsets auf die dreidimensionale Punktbestimmung lassen sich für den Stereonormalfall vereinfacht anhand **Abb. 1** verdeutlichen. Der Objektpunkt P , der sich mit der Geschwindigkeit v in X -Richtung bewegt, wird von den beiden Standpunkten O' und O'' beobachtet. Der Synchronisationsfehler zwischen den beiden Systemen beträgt Δt . Dadurch wird der Punkt vom Standpunkt O'' zeitversetzt beobachtet und es kommt in der Berechnung zu der verschobenen Position P^* , die um ΔX und ΔZ zur wahren Position P verschoben ist. Wenn sich das Objekt also parallel zur Aufnahmebasis b zweier Kameras

bewegt, wirkt sich der Zeit-Offset des Systems als Verschiebung des dreidimensionalen Punktes aus.

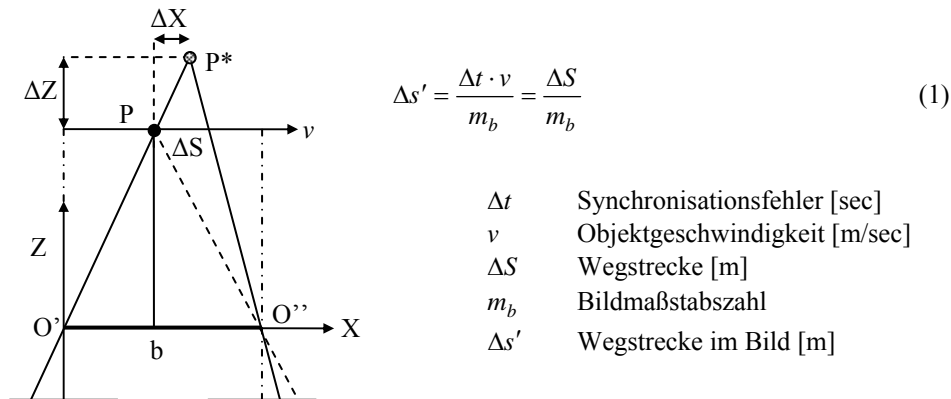


Abb. 1: Positionsfehler durch Synchronisationsfehler (LUHMANN, 2003)

2.2 Zeitliche Drift

Die zeitliche Drift ist der Teil der zeitlichen Komponenten, der sich mit zunehmender Aufnahmezeit stärker auswirkt und eine Veränderung der Asynchronität verursacht. Dieser Faktor geht auf die geringen Unterschiede in den Quarzfrequenzen, die für die Taktung der Aufnahmesysteme verantwortlich sind, zurück. Es wird angenommen, dass jede einzelne Quarzfrequenz über den gesamten Aufnahmezeitraum konstant ist. Dann kann die Auswirkung der zeitlichen Drift als linear abhängig von der verstrichenen Zeit seit dem Start-Triggersignal für die Synchronisation angenommen werden. Die zeitliche Drift lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Delta t_{Drift} = \frac{1}{f_{Ref}} - \frac{1}{f} \quad (2)$$

Δt_{Drift} Zeitliche Drift zwischen den Aufnahmesystemen [sec]

f_{Ref} Aufnahmefrequenz des Referenzsystems [Hz]

f Aufnahmefrequenz des zu synchronisierenden Systems [Hz]

2.3 Asynchronität

Die Asynchronität zwischen den Aufnahmesystemen lässt sich in Abhängigkeit vom Zeit-Offset und der zeitlichen Drift sowie vom Aufnahmezeitpunkt wie folgt zusammenfassen:

$$\Delta t(t_i) = \Delta t_{Offset} + (t_i - t_0) \cdot f \cdot \Delta t_{Drift} \quad (3)$$

$\Delta t(t_i)$ Asynchronität zwischen den Aufnahmesystemen [sec]

Δt_{Offset} Zeit-Offset zwischen den Aufnahmesystemen [sec]

t_i Zeitpunkt i der Aufnahmesequenz [sec]

t_0 Zeitpunkt der letzten Synchronisation [sec]

3 Modellierung der zeitlichen Komponenten im Funktionalen Modell

Die beiden vorgestellten zeitlichen Komponenten der Optischen Messkette Zeit-Offset und zeitliche Drift werden im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung berücksichtigt und in Form von Korrekturtermen in das Funktionale Modell der Ausgleichung integriert.

3.1 Grundprinzip der Auswertung

Wenn die Aufnahmesysteme exakt synchron laufen, kann die Auswertung der Bildsequenzen analog zur Auswertung statischer photogrammetrischer Aufnahmen erfolgen, d.h. für jede einzelne Epoche werden die Bilder der Sequenzen getrennt ausgewertet und die dreidimensionalen Koordinaten der Punkte ermittelt. Zur Modellierung der Asynchronität wird im vorgestellten Verfahren zwischen den Messwerten der einzelnen Epochen interpoliert. Daher werden für die Auswertung eines Zeitschrittes die Werte aus verschiedenen Epochen benötigt.

Die Berücksichtigung der zeitlichen Komponenten im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung erfolgt im Bildraum. Dies hat den Vorteil, dass außer den Messungen der signalisierten Bildpunkte keine weiteren Informationen über die Bewegungsrichtung oder die Objektgeschwindigkeit benötigt werden.

3.2 Erweitertes Funktionales Modell

Das Funktionale Modell der Zentralperspektive mit den Korrekturtermen für die Parameter der inneren Orientierung muss für die Integration der zeitlichen Komponenten erweitert werden. Die Grundstruktur des Funktionalen Modells bleibt zwar erhalten, allerdings werden die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Epochen nicht durch die einfache Aneinanderreihung von Ausgleichungen zu verschiedenen Epochen durchgeführt. Stattdessen werden in diesem Verfahren durch die Berücksichtigung der zeitlichen Komponenten im Rahmen der Auswertung verschiedene Aufnahmeepochen miteinander kombiniert.

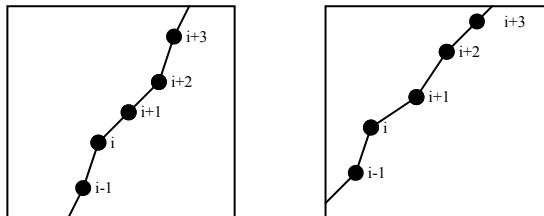


Abb. 2: Bildausschnitte aus zwei Bildsequenzen mit den originären Messpunkten einer Trajektorie (links: Kamera 1; rechts: Kamera 2)

Wenn die beiden Sequenzen (vgl. **Abb. 2**) exakt synchron ablaufen, gehören die jeweiligen Messpunkte $i-1$, i , $i+1$, usw. in den beiden Bildsequenzen zusammen und bilden korrespondierende Punkte. Die Asynchronität zwischen den Aufnahmesystemen führt allerdings zu einer Verschiebung der korrespondierenden Punkte auf den Trajektorien im Bild. Da die Abstände zwischen benachbarten Bildmesspunkten einer Trajektorie im Allgemeinen rela-

tiv gering sind, wird angenommen, dass zwischen diesen Messpunkten linear interpoliert werden kann. Der linke Bildausschnitt aus **Abb. 2** stellt im Folgenden das Referenzsystem dar. Die korrespondierenden Messpunkte des rechten Bildausschnitts werden entsprechend über die Asynchronität des Aufnahmesystems interpoliert. Für die Bestimmung des benötigten Interpolationsfaktors und somit für die geometrisch messbare Auswirkung der Asynchronität im Bild muss die Asynchronität wie folgt umgerechnet werden:

$$\Delta t_{red}(t_i) = \Delta t(t_i) - n \cdot \frac{1}{f} \quad \text{mit} \quad n = \text{int}[\Delta t(t_i) \cdot f] \quad (4)$$

$$\Delta sync(t_i) = f \cdot \Delta t_{red}(t_i) \quad (5)$$

$\Delta t_{red}(t_i)$	reduzierte Asynchronität [sec]
n	Umnummerierungsfaktor durch die Asynchronität
$\Delta sync(t_i)$	Interpolationsfaktor durch die Asynchronität

Zunächst wird die Asynchronität, wenn notwendig, um ein ganzzahliges Vielfaches des Kehrwertes der Aufnahme­frequenz reduziert (vgl. Formel (4)). Im Weiteren erfolgt die Umrechnung der reduzierten Asynchronität auf den Interpolationsfaktor. Durch diese Umrechnung muss die Nummerierung der korrespondierenden Messstellen um den Faktor n geändert werden. Somit gehört der Messpunkt i des Referenzsystems zum Messpunkt $i+n$ des zu synchronisierenden Systems.

Die Anwendung des Interpolationsfaktors für die Asynchronität ergibt folgende Korrekturterme für die gemessenen Bildkoordinaten:

$$\begin{aligned} \Delta x_{Time}(t_i) &= (x_{i+\text{sign}(\Delta sync(t_i))} - x_i) \cdot |\Delta sync(t_i)| \\ \Delta y_{Time}(t_i) &= (y_{i+\text{sign}(\Delta sync(t_i))} - y_i) \cdot |\Delta sync(t_i)| \end{aligned} \quad (6)$$

Diese Korrekturterme können ebenso wie die der Kamerakalibrierung $\Delta x_{Distortion}$ und $\Delta y_{Distortion}$ in die Kollinearitätsgleichungen integriert werden.

$$\begin{aligned} x &= f(X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z, c, xh, yh) + \Delta x_{Distortion} + \Delta x_{Time}(t_i) \\ y &= f(X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z, c, xh, yh) + \Delta y_{Distortion} + \Delta y_{Time}(t_i) \end{aligned} \quad (7)$$

Für die korrekte Bestimmung der Asynchronität über das vorgestellte Verfahren müssen folgende Anforderungen erfüllt werden: Die Aufnahme­frequenz jedes Aufnahmesystems muss über den Auswertezitraum konstant sein. Des Weiteren müssen die Objektbewegung und -geschwindigkeit, differentiell betrachtet, ebenfalls konstant sein. Wenn nur zwei Aufnahmesysteme verwendet werden, ist es notwendig, dass die Aufnahmebasis nicht parallel zur Bewegungsrichtung verläuft (vgl. Abschnitt 2.1.). Die auszuwertenden Punkte müssen in den Bildern hochgenau identifiziert und verfolgt werden können. Dafür ist es unabdingbar, dass signalisierte Punkte zum Einsatz kommen. Da im vorgestellten Verfahren stets Messungen aus verschiedenen Epochen benötigt werden, ist es weiterhin notwendig, dass ein Punkt in mindestens drei aufeinander folgenden Epochen gemessen werden kann.

Das Ergebnis der Auswertung inklusive der Modellierung der zeitlichen Komponenten der in **Abb. 2** dargestellten asynchronen Messungen ist beispielhaft in **Abb. 3** zu sehen. Die rot dargestellten Punkte im rechten Bildausschnitt sind die um die Asynchronität korrigierten korrespondierenden Messpunkte.

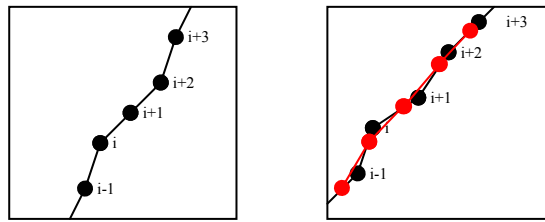


Abb. 3: Bildausschnitte aus zwei Bildsequenzen mit den korrigierten Messpunkten einer Trajektorie (links: Kamera 1; rechts: Kamera 2)

3.3 Kalibrierverfahren

Analog zur geometrischen Kamerakalibrierung kann auch die zeitliche Kalibrierung als Simultan- oder Testfeldkalibrierung erfolgen. Bei der Simultankalibrierung werden die Parameter für die zeitliche Kalibrierung im Rahmen der Sequenzauswertung bestimmt. Dafür sind allerdings die in Abschnitt 3.2 erwähnten speziellen Anforderungen zu erfüllen. Die Testfeldkalibrierung wird im Vorfeld der realen Aufnahmen durchgeführt. Es ist dabei von essentieller Bedeutung, dass die gleichen Hardware-Komponenten und die gleiche Ansteuerungssoftware für die Kameras sowie die Aufnahme- bzw. Synchronisierungsmodi wie für die eigentlichen Aufnahmen zum Einsatz kommen. Nur dann ist das Ergebnis auf die realen Versuche übertragbar. Eine Testfeldkalibrierung kann je nach Anforderungen an die Genauigkeit mit unterschiedlichen Prüfkörpern durchgeführt werden. Bei Fahrzeugsicherheitsversuchen kommen beispielsweise spezielle Uhren zum Einsatz. In (RIEDE ET AL., 2004) wird stattdessen ein handelsüblicher Röhrenmonitor genutzt. Anhand der gerade aktualisierten Zeile kann mit Hilfe der Bildwiederholfrequenz bestimmt werden, wie asynchron die Kameras aufnehmen.

4 Praktische Untersuchung

In den praktischen Untersuchungen wurde eine sich drehende dreidimensionale Testtafel verwendet. Die beobachteten Objektpunkte erreichten Geschwindigkeiten von etwa 12 m/sec. Diese wurde mit zwei digitalen Hochgeschwindigkeitskameras mit einer Aufnahme-frequenz von 1000 Hz beobachtet. Die äußeren Orientierungen der beiden Kameras wurden im Vorfeld über die ruhende Tafel bestimmt. Die inneren Orientierungen wurden ebenfalls vor den Aufnahmen bestimmt. Sowohl die innere als auch die äußere Orientierung der Kameras wurden für die folgende Auswertung als konstant angesehen. Zur vereinfachten Bestimmung der Asynchronität wurde davon ausgegangen, dass sich die Objektgeschwindigkeit differentiell, d.h. von einem Bild zum anderen, nicht ändert und dass keine zeitliche Drift vorhanden ist.

Über ein externes System zur Messung der Asynchronität konnte festgestellt werden, dass die beiden Aufnahmesysteme eine Asynchronität von etwa 0.8 ms aufweisen. Bei einer Aufnahme-frequenz von 1000 Hz entspricht dies einer Asynchronität von etwa 80 % der Bildfolgezeit. Für die theoretische Genauigkeitsabschätzung wurde davon ausgegangen, dass die Punkte mit einer Bildmessgenauigkeit von etwa 1/20 Pixel gemessen werden.

Punkt auf der Testtafel		Theoretische Werte / Abschätzung	Auswertung ohne Modellierung der Asynchronität	Auswertung mit Modellierung der Asynchronität
Asynchronität		0.8 ms	./.	0.85 ms
Punkt C12	σ_x	0.4 mm	5.1 mm	0.5 mm
	σ_y	0.2 mm	3.0 mm	0.3 mm
	σ_z	0.7 mm	9.4 mm	0.9 mm

(σ_x , σ_y , σ_z : Standardabweichungen der berechneten Punktkoordinaten)

Tab. 1: Zusammenstellung der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Zunächst wurden die Messungen mit einem herkömmlichen Verfahren ausgewertet, ohne Modellierung der Asynchronität. Die gleichen Messungen wurden im Folgenden mit dem vorgestellten erweiterten Verfahren ausgewertet. In **Tab. 1** sind die Ergebnisse der beiden Durchläufe zusammen mit der theoretischen Abschätzung anhand eines Punktes auf der Testtafel beispielhaft zusammengefasst. In diesem Anwendungsfall ist die Genauigkeit der dreidimensionalen Punktbestimmung mit dem erweiterten Ansatz etwa um den Faktor 10 besser. Des Weiteren entsprechen diese Ergebnisse annähernd den theoretischen Abschätzungen für diese Aufnahmekonstellation.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, das die photogrammetrische Auswertung asynchroner Bildsequenzen erlaubt. Neben dem konstanten Anteil der Asynchronität, dem Zeit-Offset, wird auch ein zeitlich linearer Anteil, die zeitliche Drift, modelliert. Im Rahmen der Auswertung werden die beiden Komponenten bestimmt und bei der dreidimensionalen Punktbestimmung berücksichtigt. Dadurch kann das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Auswertung von Bildsequenzen zur Bestimmung von dreidimensionalen Trajektorien deutlich verbessert werden. Für die Berücksichtigung der Asynchronität im Auswertebau können, analog zur Kamerakalibrierung, die zeitlichen Komponenten sowohl in einer Simultan-, als auch in einer Testfeldkalibrierung bestimmt und in der späteren Auswertung realer Versuche berücksichtigt werden.

In den ersten praktischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich durch die Erweiterung des funktionalen Modells der Ausgleichung um die Parameter der zeitlichen Komponenten der optischen Messkette eine deutliche Verbesserung des Genauigkeitspotentials der dreidimensionalen Punktbestimmung erzielen lässt. In weiteren Untersuchungen muss sich die Anwendbarkeit dieser Erweiterung noch bewähren. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit die getroffenen Anforderungen an die Versuchskonstellation modifiziert oder abgeschwächt werden können und wie die Bestimmbarkeit der Komponenten unter verschiedenen Bedingungen erfolgen kann.

6 Danksagung

Die Grundlagen der Untersuchung wurden in einem Gemeinschaftsprojekt zwischen der deutschen Automobilindustrie und dem Institut für Photogrammetrie und GeoInformation der Universität Hannover erarbeitet. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei den Projektpartnern für die stets gute und kooperative Zusammenarbeit. Die Projektpartner aus der deutschen Automobilindustrie waren die Audi AG, die BMW AG, die DaimlerChrysler AG, die Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG und die Volkswagen AG.

7 Literatur

- D'Apuzzo, N. (2003): *Surface Measurement and Tracking of Human Body Parts from Multi Station Video Sequences*. Dissertation ETH Zürich Nr. 15271.
- Luhmann, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. 2. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Maas, H.-G. (1992): *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Dissertation ETH Zürich Nr. 9665.
- Putze, T. (2004): *Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen*. In: Seyfert, E. (Hrsg.), Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 12, S. 325-332.
- Raguse, K., Wiggenhagen, M. (2003): *Quality parameters of the optical data channel used in impact tests*. In: Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. II, Repro Zentrum ETH Zürich, S. 252-258.
- Raguse, K., Derpmann-Hagenström, P., Köller, P. (2004): *Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche*. In: Seyfert, E. (Hrsg.), Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 12, S. 367-374.
- Riede, R., Wendt, A., Luhmann, T. (2004): *Synchrone Mehrbildphotogrammetrie zur Aufnahme statischer und dynamischer 3D-Objekte*. In Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 124-131.
- Santel, F., Linder, W., Heipke, C. (2003): *Image Sequence Analysis of Surf Zones: Methodology and First Results*. In: Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. II, Repro Zentrum ETH Zürich, S. 184-190.
- Willneff, J. (2003): *A Spatio-Temporal Matching Algorithm for 3D Particle Tracking Velocimetry*. Dissertation ETH Zürich Nr. 15276.