

Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung

THOMAS LUHMANN, Oldenburg

Keywords: close-range photogrammetry, camera calibration, accuracy, image sequences, high-speed camera, stereo vision, beam splitting

Zusammenfassung: Der Beitrag diskutiert Konstruktionsmöglichkeiten, Kalibrierungsansätze und Einsatzmöglichkeiten photogrammetrischer Aufnahmesysteme, bei denen mit nur einem Aufnahmesensor ein Stereobild mittels optischer Strahlteilung erzeugt wird. Das Aufnahmeprinzip eignet sich besonders dann, wenn eine Stereobildsequenz aufgenommen werden soll, bei der beide Bilder zeitlich exakt synchron erfasst werden müssen oder wenn andere Bedingungen nur *eine* Kamera zulassen. Der hier vorgeschlagene Weg entspricht dem Prinzip des Spiegelstereoskops. Das mathematische Abbildungsmodell muss gegebenenfalls um Parameter zur Beschreibung von Spiegeldeformationen erweitert werden. Eine Pilotanwendung liegt im Bereich der Hochgeschwindigkeitsaufnahme und 3D-Auswertung von Bildsequenzen für Sicherheitsversuche im Automobilbau vor.

Summary: *On the photogrammetric use of single cameras with optical stereo beam splitting.* This article discusses possibilities for the construction, calibration and application of photogrammetric imaging systems based on one camera which acquires a stereo image by optical beam splitting. This imaging principle is most useful if stereo image sequences are required where both images are to be synchronized exactly, or where only one camera can be used due to other restrictions. The presented solution is similar to the design of a mirror stereoscope. The mathematical imaging model has to be extended if mirror components are used which generate significant image deformations. A prototype has been developed and tested for example applications in the field of high-speed imaging and 3-D image sequence processing for car safety testing.

1 Einleitung

Dreidimensionale Auswertungen von schnell ablaufenden dynamischen Prozessen (z. B. Strömungsmessungen, Sicherheitsversuche im Fahrzeugbau) gewinnen in jüngster Zeit zunehmend an Bedeutung. Häufig unterliegen die aufzunehmenden Objekte dabei hohen dynamischen Belastungen und Veränderungen, so dass neben der dreidimensionalen Messtechnik auch die zeitliche Komponente von Bedeutung ist. Es sind also in der Regel Bildsequenzen mit mindestens zwei Kameras aufzunehmen.

Die Synchronisation von zwei oder mehr gleichzeitig aufnehmenden Kameras ist nicht trivial und häufig nur mit hohem tech-

nischen Aufwand möglich. Bei analoger Aufnahmetechnik kann die gleichzeitige Belichtung beispielsweise über elektrisch ausgelöste Verschlüsse erfolgen. Weiterhin sind Techniken mit gepulsten Lichtquellen (Stroboskopie) bekannt, die zum Beispiel in der Motografie bei Langzeitbelichtungen eingesetzt werden (DORRER & PEIPE 1987).

Heute werden jedoch fast ausschließlich Digital- oder Videokameras eingesetzt. Die Synchronisation mehrerer Kameras erfolgt in der Regel über ein externes Triggersignal, das von einer der Kameras oder einem Frame Grabber generiert wird. Die Genauigkeit der Synchronisation hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, vor allem von den elektrischen Bauteilen (Kabel, Frequenze-



Abb. 1: Digitalkamera Fuji FinePix S1 Pro mit Stereostrahlteiler Stereoworld.

nerator, Sync-Impuls) und der Leistungsfähigkeit des Frame Grabbers. Am Markt verfügbare Frame Grabber haben je nach Fabrikat sehr unterschiedliche Synchronisationsgenauigkeiten (Beispiel: Viper Quad von CORECO IMAGING besitzt keine messbare Asynchronität bei 25 Bildern pro Sekunde). Digitalvideokameras mit FireWire-Anschluss lassen Synchronisationsfehler von bis zu 2 ms zu und sind daher für viele dynamische Anwendungen nicht geeignet (RIEDE et al. 2004).

Wenn höhere Bildfrequenzen gefordert werden, kommen häufig Hochgeschwindigkeitskameras zum Einsatz, die heute mit bis zu 1000 Bilder pro Sekunde bei einer Bildauflösung von bis ca. 1500×1000 Pixel verfügbar sind. Die Synchronisation von zwei oder mehrerer dieser Kameras ist technisch aufwendig und in realen Systemen keinesfalls garantiert. Demzufolge ist eine schnelle und synchrone Stereo- oder Mehrbilderfassung nur mit hohem finanziellen Aufwand möglich.

Es wird daher hier auf Anregung der Unternehmen Volkswagen und Porsche ein Ansatz untersucht, 3D-Auswertungen schneller Bildsequenzen mit Hilfe nur einer Highspeedkamera vorzunehmen, die mit einem optischen Stereovorsatz ausgestattet ist. Dadurch entstehen zwei virtuelle Kameras, deren effektive Bildauflösung um mindestens 50% in horizontaler Richtung reduziert

ist. Eine derartige Kamera nimmt per se synchrone Bilder auf. Zusätzlich wird der Kostenaufwand reduziert, da nur eine Highspeedkamera verwendet zu werden braucht. Nachteilig auf die Messgenauigkeit wird sich ein eventuell verkürzter Basisabstand bzw. die auf die Hälfte reduzierte Bildauflösung auswirken.

Die Idee ist nicht neu. Für den Amateurbereich existieren seit langem Stereovorsatzoptiken, mit denen eine handelsübliche Spiegelreflexkamera in eine Stereokamera umgebaut werden kann (Abb. 1). Der Basisabstand der (virtuellen) Kameras entspricht dabei in etwa dem menschlichen Augenabstand, d. h. die resultierenden Bilder können unmittelbar in geeigneten Stereobetrachtern räumlich betrachtet werden. Auch für photogrammetrische Messaufgaben wurde das Prinzip bereits verschiedentlich umgesetzt. So beschreibt SCHÖLER (1981) einen mathematischen Ansatz für das Abbildungsmodell für einen optischen Stereostrahlteiler. Stereostrahlteilung ist ebenso aus der Stereomikroskopie bekannt, wenngleich hier Abbildungsmaßstäbe größer 1 auftreten und somit nicht vergleichbar mit den Anforderungen im Sicherheitsversuch sind. Eine Anwendung der Stereostrahlteilung auf Hochgeschwindigkeitskameras ist dem Autor nicht bekannt. Photogrammetrische Literatur zu diesem Thema ist ansonsten nur spärlich vorhanden. Einige Ausführungen zu Stereovorsatzkameras finden sich in REGENSBURGER (1990), EDIRISINGHE & JIANG und SIBERT & URQUHART (1994). DORRER (1998) erläutert den Einsatz einer Stereovorsatzkamera im Mars Pathfinder. WILLNEFF & MAAS (2000) sowie PUTZE (2004) diskutieren Systeme mit vier Umlenkspiegeln. Über eine Anwendung in der Mikromontage berichten BERNDT & TUTSCH 2003.

2 Optischer Aufbau

2.1 Konstruktionsmöglichkeiten mit zwei Objektiven

Für die Herstellung von Stereoalbbildern sind verschiedene Ansätze denkbar. Es ist möglich, die Strahlaufteilung direkt vor dem

Bildsensor vorzunehmen und die beiden getrennten Strahlenbündel über separate Objektive zu bündeln (Abb. 2a). Das Prinzip hat gegenüber einer Lösung mit einem gemeinsamen Objektiv jedoch gravierende Nachteile:

- es müssen zwei Objektive kalibriert werden,
- die resultierende Bildweite a' ergibt sich aus der Summe $a'_1 + a'_2 + a'_3$, d. h. die Bildweite ist wesentlich von der Basis abhängig,
- daraus folgt z.B. mit $f = 10$ mm und $a' = 250$ mm eine fokussierte Aufnahmedistanz von nur $a = 10.4$ mm,

- sowie bei Blende 16 eine Schärfentiefe von nur 0.014 mm,
- das Strahlenbündel ist sehr schmal.

Für photogrammetrische Messaufgaben ergeben sich somit ohne zusätzliche Zwischenoptiken keine sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten. Abb. 2b zeigt dazu eine prinzipielle Lösungsmöglichkeit mit einer zusätzlichen Linse zwischen Strahlteiler und Sensor, die dem Prinzip eines Stereomikroskops (REGENSBURGER 1990) angelehnt ist. Sie wird hier aufgrund der aufwendigeren photogrammetrischen Modellierung nicht weiter verfolgt.

2.2 Abbildungsmodell mit einem zentralen Objektiv

Abb. 3 stellt das geometrische Abbildungsmodell eines Spiegelstereovorsatzes mit zentralem Objektiv dar. Gegenüber den oben gezeigten Varianten kann hier eine Kamera mit existierendem Objektiv oder auch verschiedenen Objektiven eingesetzt werden. Unter der Annahme ebener Spiegel- und Strahlteilerflächen ergeben sich danach zwei virtuelle Kameras mit den Projektionszentren O' und O'' , die nach wie vor der Zentralperspektiven Abbildung genügen.

Die Basis b ist definiert zwischen den zwei Punkten O' und O'' . An diesen Punkten ist die photogrammetrische äußere Orientierung definiert, d. h. eine Änderung der Spiegelnennung oder -lage erzeugt eine veränderte Abbildungsgeometrie analog zur herkömmlichen Aufnahme mit getrennten Kameras. Der Bezugspunkt für die innere Orientierung der Kamera ist das im Objektiv liegende Projektionszentrum O . Der Öffnungswinkel τ für das halbe Bild ergibt sich aus dem halben horizontalen Sensorformat $s/2$ und der Kamerakonstante c . Für den Neigungswinkel der inneren Spiegel gilt $\beta_1 > \tau$, damit der äußere Strahl des Bildrandes noch vom Spiegel reflektiert wird. Der äußere Spiegel besitzt die Neigung β_2 und weist gegenüber dem inneren Spiegel einen Drehwinkel von α auf. In jedem Fall muss β_2 kleiner als β_1 sein, damit die beiden Hauptstrahlen h_1 und h_2 konvergent verlaufen

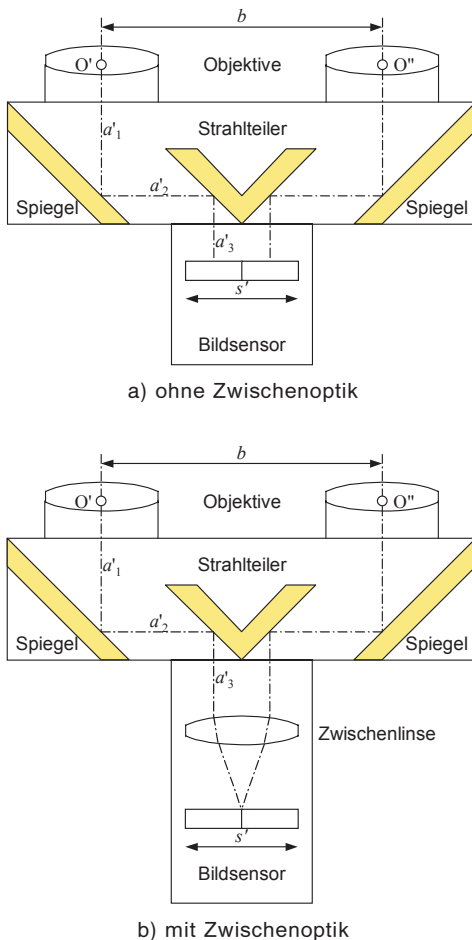


Abb. 2: Prinzip einer Stereovorsatzkamera mit getrennten Objektiven.

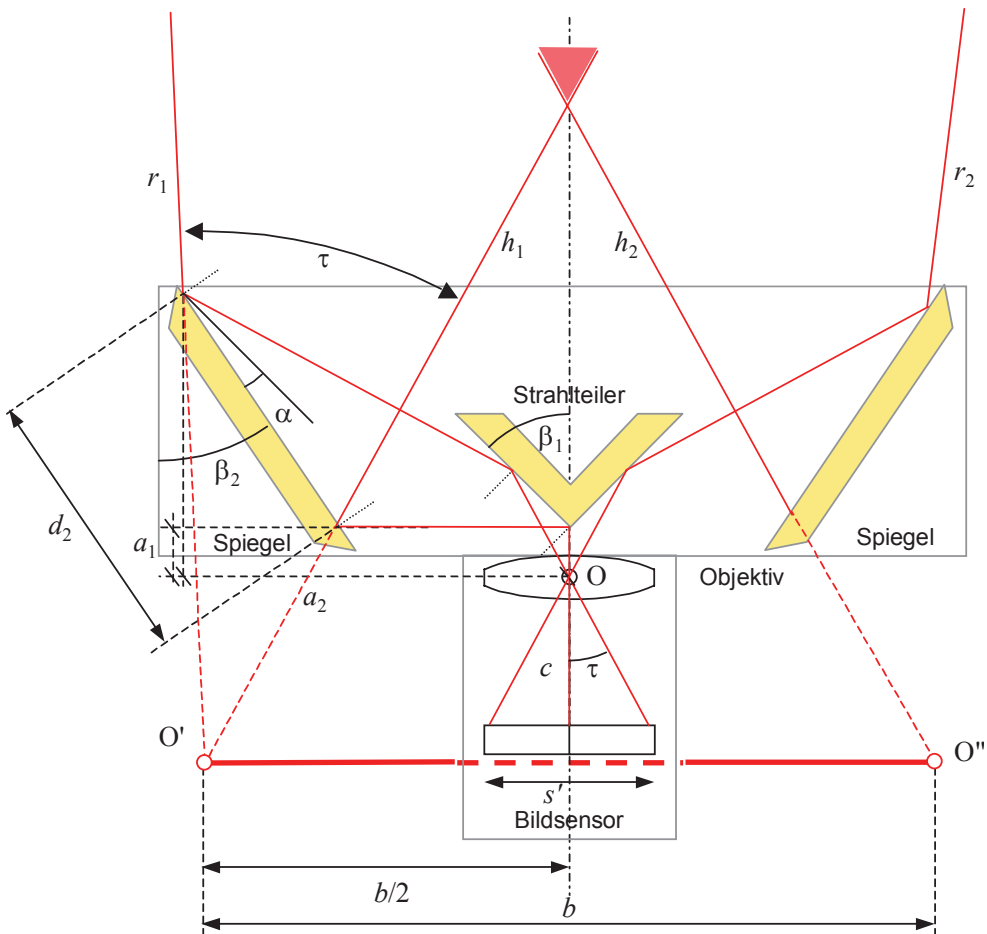


Abb. 3: Geometrisches Abbildungsmodell.

fen und einen stereoskopisch überdeckten Raum ergeben. Gleichzeitig sollte β_2 gegenüber τ so eingestellt werden, dass die Randstrahlen r_1 und r_2 divergieren, um einen Objektraum zu erfassen, das breiter als die Basis b ist.

Die notwendige Größe der äußeren Spiegel ist primär eine Funktion des Öffnungswinkels des Objektivs sowie von Abstand und Drehwinkel der Spiegel. Die Spiegelgröße wächst linear mit abnehmender Brennweite und zunehmendem Spiegelabstand. Das resultierende horizontale (stereoskopische) Messvolumen wird jeweils durch die inneren und äußeren Abbildungsstrahlen begrenzt und kann dabei eine Figur wie

in Abb. 4 annehmen. Das vertikale Messvolumen ist wie sonst auch nur durch Öffnungswinkel und vertikales Bildformat definiert.

Die Ebenheit der Spiegelflächen muss den Anforderungen an die gewünschte Bildmessgenauigkeit genügen. Nach Abb. 5 führt ein gegenüber der idealisierten Spiegelebene S um ε geneigtes Flächenstück S' zu einer Winkelabweichung des Bildstrahls r' um 2ε . Die maximale zulässige Richtungsabweichung kann mit

$$2\varepsilon = \frac{\Delta x'}{c}$$

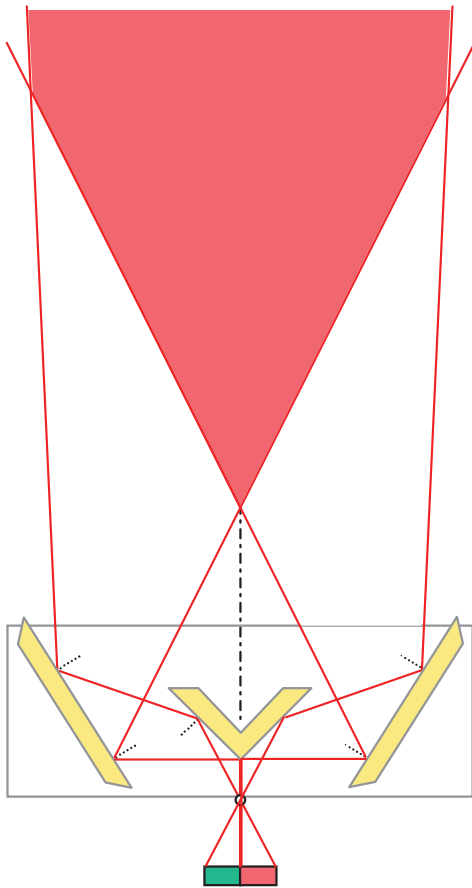


Abb. 4: Resultierendes stereoskopisches Messvolumen.

abgeschätzt werden, wobei $\Delta x'$ die erreichbare Bildmessgenauigkeit und c die Kamerakonstante darstellen. Für ein Beispiel mit $\Delta x' = 0.5 \mu\text{m}$ (ca. $1/20$ Pixel) und $c = 12.5 \text{ mm}$ ergibt sich die Winkelauflösung zu $2\varepsilon = 0.0023^\circ$. Die maximale zulässige Unebenheit einer Spiegelfläche beträgt auf einer Länge d

$$\Delta h = \varepsilon \cdot d = \frac{\Delta x' \cdot d}{2c}.$$

Für das obige Zahlenbeispiel dürfte ein Spiegel auf einer Länge von $d = 50 \text{ mm}$ eine maximale Unebenheit von $\Delta h = 0.001 \text{ mm} = 1 \mu\text{m}$ aufweisen, für kürzere Längen ergeben sich entsprechend noch kleinere Werte.

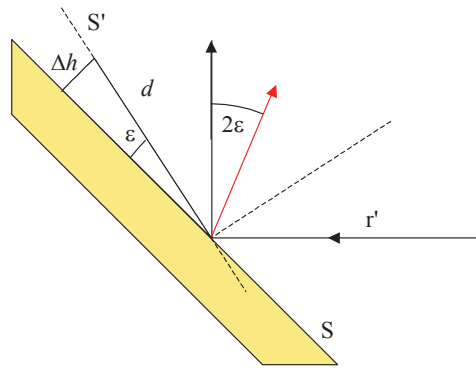


Abb. 5: Einfluss unebener Spiegelflächen.

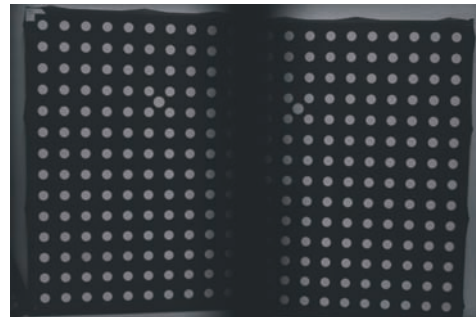


Abb. 6: Beispielhafte Testfeldaufnahme mit Stereovorsatz (Fuji FinePix S1 Pro).

An die Ebenheit werden also sehr hohe Anforderungen gestellt, sofern sie mathematisch nicht im Abbildungsmodell berücksichtigt werden kann.

Abb. 6 zeigt beispielhaft ein Bildpaar, das einer Digitalkamera Fuji FinePix S1 Pro und mit dem Stereovorsatz aus Abb. 1 aufgenommen worden ist. Es zeigt sich deutlich, dass zwischen den beiden Bildhälften ein breiterer Streifen vorhanden ist, in dem keine Bildinformation vorliegt. Der Grund liegt hier in der Nahtstelle zwischen den beiden inneren Spiegeln, die vermutlich wenig präzise ausgeführt worden ist und dadurch den nutzbaren Bildbereich um ca. 2 mm reduziert. Während dies für eine Kleinbildstereoaufnahme (Bildformat $36 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$) möglicherweise noch toleriert werden kann, ist ein derartig breiter Mittelstreifen bei den sehr viel kleineren Videobildformaten ($4.5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ bis $11 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$) nicht

akzeptierbar. Die Strahlteilung sollte daher über ein scharfkantiges Prisma erfolgen.

3 Kameramodellierung

3.1 Existierende photogrammetrische Ansätze

SCHÖLER beschreibt bereits 1981 ein analytisches Modell zur photogrammetrischen Auswertung von Stereovorsatzkameras. Der Ansatz basiert auf der optischen Konstruktion der Abbildungsgeometrie und definiert die beiden als Bezugspunkte wichtigen Projektionszentren durch die Lage der Eintrittspupillen, die sich als kreisförmige Öffnungen jeweils im Abstand der halben Basislänge von der optischen Achse des Objektivs bilden (Öffnungen I und II in Abb. 7).

SCHÖLER (1981) leitet Gleichungen zur direkten photogrammetrischen Koordinatenberechnung in der Form $\underline{X} = f(x', y', \dots)$ ab. Das Modell enthält keine bildfehlerbeschreibenden Funktionen und setzt daher die klassische Messkamera voraus, die üblicherweise praktisch verzeichnungsfrei ist und über eine ebene Bildfläche verfügt. Die gleichen Anforderungen werden an das Spiegelsystem gestellt, bei dem vollkommen ebene Spiegelflächen vorausgesetzt werden. Weiterhin ist der Ansatz nicht günstig für

eine Formulierung als Beobachtungsgleichungen in einem Ausgleichssystem und wird daher nicht weiter verfolgt.

Eine vollständige Modellierung der Abbildungsgeometrie ist prinzipiell möglich. KOTOWSKI (1987) hat einen umfassenden photogrammetrischen Ansatz für lichtbrechende Trennflächen entwickelt (Multimedia-Photogrammetrie), der ebene und gekrümmte optische Trennflächen mit unterschiedlichen Brechzahlen in das analytische Abbildungsmodell integriert und auch innerhalb einer photogrammetrischen Bündelausgleichung realisiert werden kann. Nach dem Prinzip des Ray Tracing wird jeder Abbildungsstrahl vom Objektraum bis in den Bildraum verfolgt, wobei seine Brechungen an etwaigen Trennflächen oder Spiegeln durch Einfall- und Ausfallwinkel beschrieben werden, die jeweils aus dem Normalenvektor einer Trennfläche bzw. entsprechend dem Snellius'schen Brechungsgesetz abgeleitet werden. Die Anwendung auf Multimedia-Konfigurationen bei der Erfassung von Mehrbildsequenzen beschreibt MAAS (1995).

Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wird, kann auf diesen komplexen mathematischen Ansatz jedoch verzichtet werden, wenn ein geeignetes Bündelausgleichungsprogramm mit integrierten Bedingungsgleichungen und Modellierung der Abbildungsfläche (Bildfläche) eingesetzt wird, das praktisch jede beliebige Stereoanordnung kalibrieren und orientieren kann.

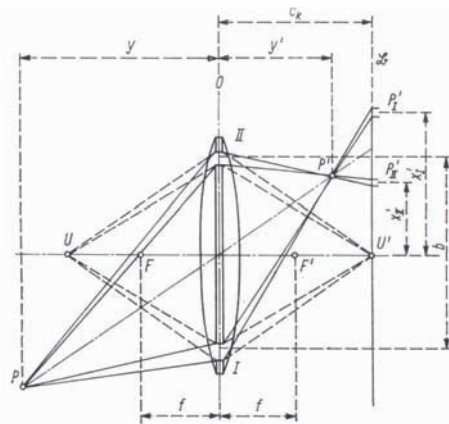


Abb. 7: Definition der Projektionszentren im Abbildungsmodell einer Stereovorsatzkamera nach SCHÖLER (1981).

3.2 Kameramodell

Zur Kalibrierung der inneren Orientierung der Stereokamera wird jedes Halbbild getrennt betrachtet. Liegen hinreichend ebene Spiegelflächen vor, kann ein herkömmlicher Parametersatz für die Kalibrierung herangezogen werden mit Funktionen für die radialsymmetrische Verzeichnung, tangentiale und asymmetrische Verzeichnung sowie Affinität und Scherung (Übersichten in LUHMANN 2003). Für jedes Halbbild liegt der Bildhauptpunkt jeweils am inneren Rand, je nach Justierung der optischen Komponenten auch außerhalb des Bildes.

Alternativ zu zwei unabhängig betrachteten Kameras kann auch ein Ansatz gewählt werden, beide Bildhälften mit einer gemeinsamen Korrekturfunktion für die radial-symmetrische Verzeichnung (da nur ein Objektiv existiert) und für Affinität und Scherung (da nur ein gemeinsamer Bildsensor existiert) zu beschreiben, die anderen Parameter jedoch getrennt zu bestimmen. Insbesondere werden die Parameter der tangentialen und asymmetrischen Verzeichnung durch Schiefstellung der Spiegelflächen beeinflusst und können größere Werte als die der radialen Verzeichnung annehmen (Beispiel in Abb. 11).

Unebene Spiegelflächen sind mit den oben beschriebenen Parametern nicht modellierbar. In diesem Fall hat sich ein Ansatz bewährt, nicht-systematische Bilddeformationen mit Hilfe eines Korrekturgitters auf der Basis finiter Elemente zu beschreiben (Bündelausgleichungsprogramm FiBun, TECKLENBURG et al. 2001). Diese Bilddefor-

mationen können durch alle optischen Komponenten sowie durch mögliche Sensorunebenheiten hervorgerufen sein.

Abb. 8 zeigt das mit FiBun berechnete Sensordeformationsmodell der Stereokamera aus Abb. 1. Im oberen Bild wird deutlich, dass die Einflüsse des Spiegelvorsatzes zu großen Abweichungen im Bild führen, die ohne ein Korrekturgitter nicht kompensiert werden können. Man sieht weiterhin, dass die Deformationen im linken und im rechten Teil des Sensors völlig verschieden ausfallen. Die Ursache liegt eindeutig in den Eigenschaften des Spiegelvorsatzes. Zum Vergleich zeigt das untere Bild ein Kalibrierungsergebnis der gleichen Kamera-Objektiv-Kombination ohne Spiegelvorsatz. Sensordeformationen sind in diesem Maßstab kaum erkennbar.

Je nach mechanischer Stabilität von Kamera, Objektiv und Spiegelvorsatz ist weiterhin eine bildvariante Modellierung des Projektionszentrums (Kamerakonstante und Bildhauptpunkt) erforderlich (MAAS 1999, TECKLENBURG et al. 2001). Eine bildvariante (von Bild zu Bild variierende) Bestimmung des Projektionszentrums wird zum Beispiel durch die Bündelausgleichungsprogramme FiBun (IAPG) oder Ax.Ori (AXIOS 3D Services, www.axios3d.de) ermöglicht.

Neben der inneren Orientierung werden die Parameter der relativen Orientierung beider Bilder benötigt. Wenn das Aufnahmesystem zwischen zwei Bildern keinen mechanischen Veränderungen unterliegt, kann in der Bündelausgleichung die zusätzliche Bedingung integriert werden, dass beide Kameras über die Bildsequenz eine feste relative Orientierung aufweisen.

4 Praktische Versuche

Abb. 9 zeigt zwei für die spätere Highspeed-Stereoaufnahme konzipierte Laboraufbauten mit unterschiedlichen Highspeed-kameras, jeweils mit 12.5 mm-Objektiv, 90°-Prisma und zwei Planspiegeln von 170 mm × 160 mm Seitenlänge. Im ersten Versuch wurde eine Weinberger Visario verwendet, die bei einem Bildformat von ca. 8.4 mm × 11.3 mm ein stereoskopisches

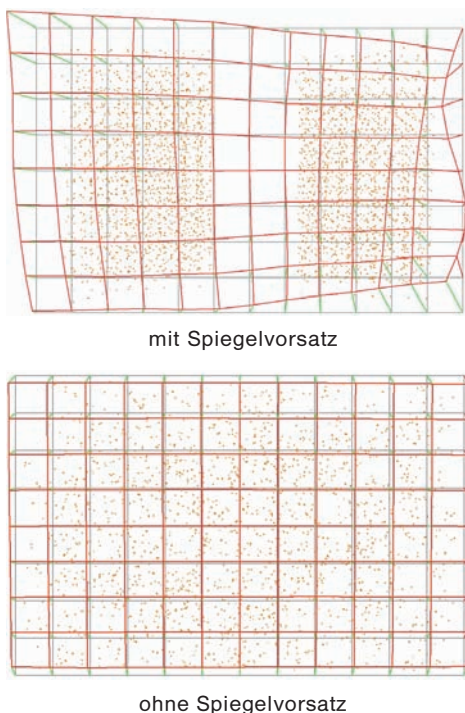
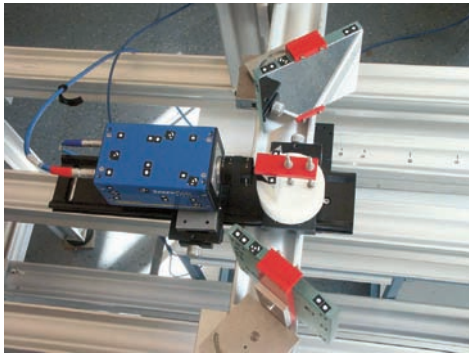


Abb. 8: Berechnete Sensordeformationen (Fuji FinePix S1, 28 mm Objektiv).



Weinberger Visario



NAC HiDcam II

Abb. 9: Versuchsaufbauten mit Highspeed-Kamera und optischer Stereobildtrennung.



Abb. 10: Erste Prototypenversion.

Messvolumen von $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ bei einem Aufnahmeabstand von ca. 0.8 m erzeugt. Die wirksame Basislänge beträgt $b = 300 \text{ mm}$. Im zweiten Versuch

wurde eine Highspeedkamera NAC HiDcam II eingesetzt, die bei einem Bildformat von ca. $15.4 \text{ mm} \times 6.1 \text{ mm}$ ein Messvolumen von $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ bei einem Aufnahmeabstand von ca. 2.0 m erzeugt. Ein auf dieser Basis entwickelter erster Prototyp befindet sich inzwischen im praktischen Einsatz.

Das Aufnahmesystem wird jeweils mit Hilfe von Testfeldaufnahmen kalibriert, die den üblichen Kalibrieranordnungen für die Simultankalibrierung folgen (LUHMANN 2003).

Nach der Bündelausgleichung wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

		Weinberger Visario	NAC HiDcam II
Sigma 0		$0.9 \mu\text{m}$ (0.05 Pixel)	$0.52 \mu\text{m}$ (0.04 Pixel)
Parameter Innere Orientierung	c	-12.6174	-12.5386
	x'_0	-0.0399	-0.2189
	y'_0	-0.2630	-0.2277
	A_1	$-5.00\text{e-}04$	$-5.72\text{e-}04$
	A_2	$5.29\text{e-}06$	$5.44\text{e-}06$
	A_3	$-1.86\text{e-}08$	$-2.09\text{e-}08$
	B_1	$-4.12\text{e-}05$	$1.606\text{e-}05$
	B_2	$-1.73\text{e-}04$	$-9.07\text{e-}05$
	C_1	$-2.25\text{e-}05$	$-3.36\text{e-}04$
C_2	$-1.62\text{e-}04$	$1.07\text{e-}04$	
RMS Objektkoordinaten	X		0.018 mm
	Y		0.014 mm
	Z	0.012 mm 0.024 mm 0.029 mm	0.023 mm
Basis	b	303 mm	190 mm

In beiden Fällen wurden Bildmessgenauigkeiten im Submikrometerbereich erreicht. Die Objektpunktgenauigkeiten liegen entsprechend im Bereich bis maximal ca. $30 \mu\text{m}$.

Die etwas schlechteren Messergebnisse des ersten Versuches sind weniger auf die verwendete Kamera als vielmehr auf ungünstigere Versuchsbedingungen (Störlicht, Erschütterungen) zurückzuführen.

Die hier verwendeten Planspiegel zeigen nur eine geringe Unebenheit, die durch das Finite-Elemente-Gitter beschrieben wird. Leichte Abweichungen der Spiegelebenen

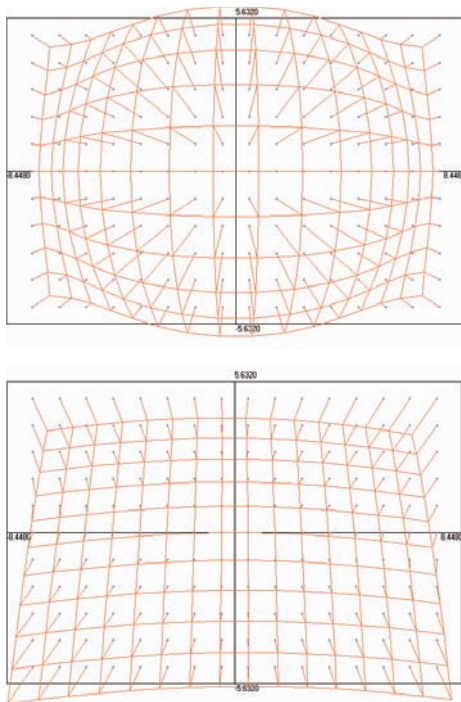


Abb. 11: Radial-symmetrische (oben) und tangential-asymmetrische (unten) Verzeichnung (jeweils 50fach überhöht, Objektiv 12.5 mm).

aus der Vertikalebene führen jedoch zu erheblichen Werten der tangentialen Verzeichnung. Sie erreicht größere Beträge im Bild als die radial-symmetrische Verzeichnung (siehe Abb. 11).

5 Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert ein Konzept für die synchrone Stereoerfassung mit einer einzelnen Kamera mittels Spiegelvorsatzes. Die Anordnung der optischen Komponenten in der Reihenfolge Kamera/Sensor, Objektiv, Strahlteiler (Prisma) und Umlenkspiegel ist einfach zu realisieren und erlaubt die Verwendung vorhandener Objektive. Das geometrische Abbildungsmodell führt zu zwei virtuellen Projektionszentren, deren Lage wie üblich die Stereobasis definiert. Das stereoskopisch nutzbare Messvolumen ist je nach Spiegeldrehung und Öffnungswinkel des Objektivs begrenzt.

Mit Testfeldaufnahmen und Simultankalibrierungen kann nachgewiesen werden, dass das Abbildungsmodell hinreichend mathematisch beschrieben werden kann, auch wenn Unebenheiten der Spiegelflächen zu erheblichen Bildfehlern führen. So lassen sich auch mit einem Spiegelstereovorsatz Bildmessgenauigkeiten erzielen, die mit denen herkömmlicher Digitalkameras vergleichbar sind.

Danksagung

Der Autor bedankt sich für die gute Zusammenarbeit mit den Unternehmen Volkswagen AG (Wolfsburg) und Ferd. Porsche AG (Weissach), ohne deren Beteiligung die oben beschriebene Entwicklung nicht zustande gekommen wäre. Dank gilt ebenso Frau Dipl.-Ing. HEIDI HASTEDT für die durchgeführten Versuche und Berechnungen.

Literatur

- BERNDT, M. & TUTSCH, R., 2003: Optischer 3D-Sensor zur räumlichen Positionsbestimmung bei der Mikromontage. – *Applied Machine Vision*, Stuttgart: 111–118.
- DORRER, E., 1998: Einsatz der IMP-Stereokamera beim Mars Pathfinder. – In: LIST (ed.): *Publikationen der DGPF*. – Band 6: 259–270.
- DORRER, E. & PEIPE, J. (Ed.), 1987: *Motografie*. – Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Heft 23, Universität der Bundeswehr, München, 280 S.
- EDIRISINGHE, E. A. & JIANG, J., unbekanntes Datum: *Stereo Imaging, an Emerging Technology*. – unbekanntes Herkunftsland, liegt dem Verfasser in Druckform vor.
- GODDING, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. – *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Heft 2/1993: 82–90.
- KOTOWSKI, R., 1987: *Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel*. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 330, 78 S.
- LUHMANN, T., 2003: *Nahbereichsphotogrammetrie*. – 2. Aufl., 586 S., Wichmann Verlag, Heidelberg.
- MAAS, H.-G., 1995: *New developments in multimedia photogrammetry*. – In: GRUEN/KAHMEN

- (Ed.): Optical 3-D Measurement Techniques III. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 91–97.
- MAAS, H.-G., 1999: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. – Publikationen der DGPF, Band 7, München 1998: 47–53.
- PUTZE, T., 2004: Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen. – Publikationen der DGPF, Band 13, Halle: 325–332.
- REGENSBURGER, K., 1990: Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik. – VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 228 S.
- RIEDE, R., WENDT, A. & LUHMANN, T., 2004: Synchrone Mehrbildphotogrammetrie zur Aufnahme statischer und dynamischer 3D-Objekte. – In: LUHMANN (Ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 124–131.
- SCHÖLER, H., 1981: Production of photogrammetric stereo pairs by beam division in single-lens cameras. – Kompendium Photogrammetrie, Vol. XV, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig: 77–86.
- SIEBERT, J.P. & URQUHART, C.W., 1994: C3D: a Novel Vision-Based 3-D Data Acquisition System. – Proceedings of Monalisa Workshop, Hamburg.
- Stereoworld, 2002: http://www.pauck.de/marco/photo/stereo/stereo_world/stereo_world.html (letzter Zugriff: 05.05.2004)
- TECKLENBURG, W., LUHMANN, T. & HASTEDT, H., 2001: Camera modelling with image-variant parameters and finite elements. – In: GRUEN/KAHMEN (Ed.): Optical 3-D Measurement Techniques V. – Wichmann Verlag, Heidelberg: 328–335.
- WILLNEFF, J., MAAS, H.-G., 2000: Design and calibration of a four-headed camera system for use in microgravity research. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam 2000: 894–899.

Anschrift des Autors:

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

Manuskript eingereicht: Juni 2004

Angenommen: August 2004