

# Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung

Hans-Gerd Maas<sup>1</sup>

**Zusammenfassung:** Hochauflösende digitale Stillvideokameras, die sich im Laufe der letzten Jahre zu einem der 'Arbeitspferde' der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie entwickelt haben, müssen als nicht-metrische Kameras angesehen und daher kalibriert werden. Als Problem hat sich dabei die geometrische Instabilität von Stillvideokameras erwiesen, die zu starken Änderungen der inneren Orientierung zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen führen kann und das Genauigkeitspotential bei der Bestimmung von 3-D Koordinaten erheblich einschränkt.

Es wird ein teilweise projektiver Ansatz gezeigt, der durch geeignete Parametrisierung in der Bündelblockausgleichung der variablen inneren Orientierung Rechnung trägt und von der Bestimmung einer inneren Orientierung für jedes einzelne Bild eines Bildverbandes ausgeht. In praktischen Anwendungen konnte dadurch das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen 3-D Koordinatenbestimmung gegenüber einer konventionellen Parametrisierung im Bündel um das Zwei- bis Vierfache verbessert werden.

## 1. Einleitung

Verfahren der Selbstkalibrierung haben in der Nahbereichsphotogrammetrie seit ihrer erstmaligen Erwähnung in der Literatur (Kenefick et al., 1972; Kölbl, 1972) kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Dies gilt insbesondere seit hochauflösende, als nicht-metrisch zu betrachtende Stillvideokameras zum Arbeitspferd der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie geworden sind. Einen Durchbruch erzielte hier 1993 die Kodak DCS200 mit einem 1524x1012 Pixel CCD Sensor, interner A/D Wandlung und Speicherkapazität für 50 unkomprimierte Bilder auf einer internen Harddisk. Diese Kamera stellte für die digitale Photogrammetrie erstmals ein autonomes, weitgehend feldtaugliches System zur Akquisition von digitalen Bildern hoher geometrischer und radiometrischer Qualität dar. Die Anwendung solcher Stillvideokameras in der photogrammetrischen Koordinatenmeßtechnik, sowohl durch Firmen wie auch durch Hochschulinstitute, erfolgte unmittelbar nach ihrem Erscheinen auf dem Markt (u.a. van den Heuvel 1993, Peipe et al. 1993, Maas/Kersten 1994, Fraser/Shortis 1994).

Gleichzeitig stellen Kameras dieses Typs mit einem hochwertigen CCD Sensor in einem Kameragehäuse von zweifelhafter geometrischer Stabilität besondere Anforderungen an Verfahren der Selbstkalibrierung. Wie schon durch (Kenefick et al., 1972) und (Kölbl, 1972) gezeigt, sind für die simultane Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung aus Aufnahmen einer Punktwolke unbekannter Geometrie mindestens drei Aufnahmen notwendig, wobei die Kamera zur Vermeidung von Korrelationen bei einer der Aufnahmen um 180° um

---

<sup>1</sup> Dr. Hans-Gerd Maas, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Delft University of Technology, Thijsseweg 11, 2629 JA Delft, The Netherlands, Tel. 0031-15-2782556, Fax 0031-15-2782745, e-mail h.-g.maas@geo.tudelft.nl

ihre Achse gedreht werden sollte. Ist - wie in der digitalen Photogrammetrie häufig verlangt - auch die simultane Bestimmung eines horizontalen Maßstabsfaktors verlangt, so wird eine vierte Aufnahme, vorteilhaft mit um  $90^\circ$  um ihre Achse gedrehter Kamera, notwendig. In der Praxis der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie werden häufig noch deutlich mehr Aufnahmen verwendet. Dabei ergibt sich das Problem, daß die innere Orientierung von Stillvideokameras nicht als stabil angenommen werden kann. Mit einem auf der Kamerarückseite federnd angebrachten Sensor, einem aus Kunststoff bestehenden Kameragehäuse und einer Bajonettmontage des Objektivs sind Änderungen der Koordinaten des Hauptpunktes um einige Pixel möglich, und auch die Kammerkonstante kann sich zwischen zwei Aufnahmen signifikant verändern. Diese Effekte konnten in einem Vergleich verschiedener Kameras (Maas/Niederöst, 1997) bei praktisch allen Stillvideokameras beobachtet werden. Damit sind auf Rotationsstrategien basierende Verfahren der Selbstkalibrierung (z.B. Godding, 1993) nur noch beschränkt anwendbar. Versuche, die geometrische Instabilität von Kameras durch mechanische Eingriffe zu verbessern, sind verschiedentlich unternommen worden, können die Probleme aber nicht vollständig beheben und haben außerdem Einfluß auf die Garantieverpflichtungen des Herstellers.

Daher soll im Folgenden ein Ansatz zur Lösung des Problems durch geeignete Parametrisierung in der Bündelblockausgleichung diskutiert und durch praktische Anwendungen verifiziert werden.

## **2. Teilweise projektiver Ansatz**

Aus den oben genannten Gründen ist der übliche Ansatz der Bündelblockausgleichung mit einem gemeinsamen Zusatzparametersatz für alle Aufnahmen nicht adäquat für die Selbstkalibrierung von Stillvideokameras. Eine dazu konträre Vorgehensweise wäre der Ansatz eines eigenen, unabhängigen Zusatzparametersatzes für jedes Bild des Verbandes; ein solcher Ansatz stellt höhere Ansprüche an die Verfügbarkeit von Passpunkten oder anderer geodätischer Zusatzinformation, z.B. in Form von Distanzbeobachtungen, und wird in vielen praktischen Anwendungen unrealistisch sein. Als Kompromiss bietet sich ein teilweise projektiver Ansatz an, bei dem für jedes Bild eine eigene innere Orientierung angesetzt wird, die jedoch durch vorgegebene Näherungswerte und Varianzen teilweise gezwungen wird, während für die Zusatzparameter (Objektivverzeichnung etc. - je nach verwendetem Kameramodell) ein gemeinsamer Satz für alle Aufnahmen angesetzt wird. Diverse Programme zur Bündelblockausgleichung, darunter auch das im Rahmen dieser Arbeiten verwendete Programm *sgap* des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, erlauben eine solche Parametrisierung. Die Bündellösung und die Bestimmung der vorzugebenden Näherungswerte und Varianzen für die Parameter der inneren Orientierung kann entweder im Laufe der Iterationen in der Bündelblockausgleichung oder durch mehrmaliges rekursives Aufrufen der Bündelblockausgleichung erzielt werden.

## **3. Verifikation durch Testfeldkalibrierung**

Zur Verifikation dieser Parametrisierung und zur Quantisierung der diskutierten Effekte wurde ein Bildverband eines Testfeldes der ETH Zürich mit einer Kodak DCS460 mit 28mm Objektiv aufgenommen und ausgewertet. Das Testfeld (Abb. 1) hat eine Ausdehnung von ca. 4.0m x 2.0m x 1.2m. Referenzkoordinaten von 186 Punkten wurden durch Theodolitmessungen bestimmt, wobei die Standardabweichungen in der Größenordnung von  $20\mu\text{m}$  (Lage) bis  $30\mu\text{m}$  (Tiefe) lagen. Zusätzlich wurden einige kodierte Zielmarken (Niederöst/Maas, 1996) zur Automatisierung des Auswertung verwendet. Der Verband bestand aus 15 Aufnahmen,

welche konvergent von fünf Standpunkten aufgenommen wurden. Zur Evaluation von Rotationsstrategien wurde von jedem Standpunkt je ein Bild mit horizontaler Kamera und um  $90^\circ$  nach rechts und links rotierter Kamera aufgenommen. Aufgrund des nicht-quadratischen Objekt- und Bildformats sowie von Verdeckungen wurden die Punkte in 3 bis 15 Aufnahmen abgebildet; die mittlere Anzahl Strahlen pro Punkt betrug 12. Bildkoordinaten der signalisierten Punkte wurden durch Least-Squares Template Matching bestimmt, wobei die Standardabweichungen der Bildkoordinaten bei  $1/40 - 1/50$  Pixel lagen.

Als Zusatzparametersatz in der Bündelblockausgleichung wurde der auf (Brown, 1971) zurückgehende Satz mit innerer Orientierung, radialer und dezentrierender Objektivverzerrung sowie zwei Parametern einer affinen Transformation verwendet. Die Wahl des Zusatzparametersatzes ist im Hinblick auf die hier beschriebenen Untersuchungen relativ unkritisch, da die größten Probleme bei der Kalibrierung von Stillvideokameras aus der inneren Orientierung entstehen.



Abb. 1: Testfeld der ETH Zürich zur Kalibrierung von CCD Kameras

Die wesentlichsten Ergebnisse der Bündelblockausgleichung sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Für verschiedene Rechenversionen sind jeweils der Gewichtseinheitsfehler und die geschätzten Standardabweichungen der Objektkoordinaten sowie die aus Vergleich mit den Theodolitmessungen ermittelten äußeren Genauigkeiten angegeben. Dabei wurde die Bündelblockausgleichung einmal konventionell mit einer gemeinsamen inneren Orientierung für alle Bilder und einmal teilweise projektiv parametrisiert. Als Lagerung wurde eine freie Netzausgleichung gewählt.

Version	innere Genauigkeit				äußere Genauigkeit		
	$\hat{\sigma}_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\hat{\sigma}_x$ [mm]	$\hat{\sigma}_y$ [mm]	$\hat{\sigma}_z$ [mm]	$\mu_x$ [mm]	$\mu_y$ [mm]	$\mu_z$ [mm]
konventionell	0.56	0.047	0.041	0.110	0.201	0.131	0.299
tlw. projektiv	0.19	0.012	0.010	0.025	0.037	0.035	0.051

Tabelle 1: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit Testfeldaufnahmen (Z = Tiefenkoordinate)

Die Ergebnisse zeigen, daß der teilweise projektive Ansatz zu deutlich besseren Resultaten führt. Dies gilt sowohl für die innere wie auch für die äußere Genauigkeit, welche in allen Koordinatenrichtungen um mindestens einen Faktor vier besser ist. Diskrepanzen zwischen innerer und äußerer Genauigkeit bleiben bestehen und sind wahrscheinlich durch das Genauigkeitspotential der Theodolitmessungen erklärbar. Die Lage des Hauptpunktes variierte über einen Bereich von 10 Pixel in x und 13 Pixel in y, die Kammerkonstante variierte über 28µm. Dieselben Effekte ergeben sich auch bei Lagerung auf ein minimales Datum.

#### 4. Praktische Anwendung an einer Staumauer

Als Beispiel einer praktischen Anwendung des Ansatzes sei die Koordinatenbestimmung signalisierter Punkte an einer Staumauer gezeigt (Auf der Maur et al., 1997/98; Maas, 1998). Beim verwendeten Objekt handelt es sich um die Staumauer 'Nalps' im schweizerischen Kanton Graubünden. Die Mauer weist bei einer Kronenlänge von 480m und einer Höhe von 100m auf der Luftseite in Abhängigkeit vom Wasserstand sowie saisonalen und kurzfristigen Temperatureffekten eine maximale Deformation von 80 mm auf. Deformationsmessungen werden in regelmäßigen Abständen mit klassischen geodätischen Verfahren durchgeführt (Lotungen, Alignements, Dehnungsmeßstreifen, geodätische Netzmessung). Ziel der photogrammetrischen Messungen war nicht, diese erprobten Meßverfahren zu ersetzen, sondern eine effiziente Methode zur Netzverdichtung (z.B. mit dem Ziel der Bestimmung lokaler Scherkräfte) aufzuzeigen.



Abb. 2: Staumauer Nalps

Photogrammetrische Verfahren sind bereits in der Vergangenheit zur Deformationsmessung an Staumauern eingesetzt worden (z.B. Fryer/Bartlett 1989, Fryer 1995, Kersten/Maas 1995), konnten aber bislang nicht das geforderte Genauigkeitspotential im Millimeterbereich liefern. Durch die kontinuierliche Entwicklung im Bereich der Halbleitersensoren jedoch hat die digitale Nahbereichsphotogrammetrie mittlerweile ein Genauigkeitspotential erreicht, welches demjenigen geodätischer Netzmessungsverfahren mit Theodolit und elektrooptischem Entfernungsmesser nahe kommt. Ein relatives Genauigkeitspotential (welches oft als das Verhältnis der Standardabweichung der Objektkoordinaten zur Objektdimension definiert wird) von deutlich besser als 1 : 100'000 ist sowohl im Labor wie auch in industriellen Anwendungen verschiedentlich erreicht worden.

Die Staumauer wurde durch insgesamt 60 Zielmarken signalisiert. Beim Entwurf der Zielmarken wurde ein Kompromiß erreicht zwischen Größe (notwendig zur automatischen Bildkoordinatenbestimmung mit Subpixelgenauigkeit) und Handhabbarkeit der Marken; zusätzlich wurde noch eine zentrische Markierung für eine Referenzmessung per Theodolit integriert.

Für die Aufnahmen stand eine digitale Stillvideokameras Kodak DCS460 mit 3060 x 2036 Pixel CCD Sensor zur Verfügung. Zwei unabhängige Datensätze wurden mit einem 18 mm und einem 28 mm Objektiv aufgenommen. Die Projektparameter sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Die Aufnahmen wurden zum Teil von terrestrischen Standpunkten und zum Teil von einem Helikopter gemacht. Referenzkoordinaten wurden durch geodätische Netzmessung beschafft. Aus Zeitgründen konnten diese nicht an einem Tag durchgeführt werden; ferner wurden die beiden Bildverbände nicht am selben Tag aufgenommen. Bei einer Deformation von 80 mm über ein Jahr könnte die Vergleichbarkeit der Messungen durch diese Tatsache eingeschränkt sein. Die Standardabweichung der Punktkoordinaten aus der geodätischen Netzmessung betrug für die meisten Punkte etwa 2mm in allen drei Koordinatenrichtungen; aufgrund von durch Sichtbeschränkungen verursachter suboptimaler Netzgeometrie waren die Standardabweichungen der Punkte am linken und rechten Rand der Staumauer deutlich größer.

Die Bilddaten wurden halbautomatisch verarbeitet: Signalisierte Punkte wurden durch einen Operateur identifiziert und durch Least-Squares Template Matching automatisch gemessen. Eine volle Automatisierung der Auswertung der Bilddaten weiterer Kampagnen ist möglich, war aber nicht Ziel der Pilotstudie. Bei der Bündelblockausgleichung wurde für beide Datensätze je eine Version mit einer gemeinsamen inneren Orientierung für alle Bilder sowie der teilweise projektive Ansatz mit iterativer Bestimmung einer inneren Orientierung für jede Aufnahme gerechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

	Kamera	Objektiv	Aufnahmen	Maßstab	Strahlen pro Punkt
Nalps - 18	DCS460	18 mm	34	8'200	14.7
Nalps - 28	DCS460	28 mm	41	6'400	13.8

Tabelle 2: Projektparameter Staumauer Nalps

Zur Lagerung wurden 12 Passpunkte verwendet. Aufgrund der schlechteren Referenzkoordinaten der äußeren Punkte wurde die Analyse der Kontrollpunkte auf 20 Punkte im mittleren Bereich der Mauer beschränkt.

	Version	innere Genauigkeit				äußere Genauigkeit		
		$\hat{\sigma}_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\hat{\sigma}_x$ [mm]	$\hat{\sigma}_y$ [mm]	$\hat{\sigma}_z$ [mm]	$\mu_x$ [mm]	$\mu_y$ [mm]	$\mu_z$ [mm]
Nalps - 18	konventionell	1.61	5.4	4.8	3.6	5.3	7.2	2.4
Nalps - 18	tlw. projektiv	0.58	3.0	3.0	1.9	3.7	2.8	2.4
Nalps - 28	konventionell	2.06	6.9	7.2	4.4	9.6	4.3	2.5
Nalps - 28	tlw. projektiv	0.55	2.8	1.6	2.4	3.5	1.8	2.5

Tabelle 3: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung für Bildverbände der Staumauer Nalps

Auch hier zeigt sich, daß die Ergebnisse sich durch den teilweise projektiven Ansatz deutlich verbessern. Aufgrund der im Vergleich zum Testfeld geringeren relativen Tiefenausdehnung

der Staumauer ist der Effekt hier zwar weniger groß, macht jedoch immer noch etwa einen Faktor zwei aus. Die Parameter der inneren Orientierung schwanken dabei um bis zu 19 Pixel (Hauptpunkt) bzw. 0.11mm (Kammer-konstante). Eine Lagerung auf ein minimales Datum ergab aufgrund der Netzgeometrie und der Parametrisierung im Bündel nicht ausreichende Genauigkeiten.

## **5. Schlußfolgerung**

Die Instabilität der inneren Orientierung von Stillvideokameras stellt eine starke Einschränkung des Genauigkeitspotentials dar. Dies gilt insbesondere für Objekte mit großer Tiefenausdehnung, bei denen die Effekte nur zum Teil durch Korrelationen zwischen äußerer und innerer Orientierung projektiv absorbiert werden. In einzelnen Fällen kann das Genauigkeitspotential des CCD Sensors um eine Größenordnung reduziert werden. Durch einen teilweise projektiven Ansatz in der Parametrisierung der Bündelblockausgleichung können diese Effekte großenteils korrigiert werden. In praktischen Tests konnte die äußere Genauigkeit, bestimmt durch Vergleich mit durch Theodolitmessungen bestimmten Koordinaten, um den Faktor zwei bis vier verbessert werden. Die Beschaffung von Referenzkoordinaten in diesem Genauigkeitsbereich erweist sich als problematisch, da das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Koordinatenmeßtechnik dem von Theodolitmessungen kaum mehr nachsteht.

## **6. Literaturangaben:**

- Auf der Maur, C., Erny, D., Bürcher, I., Isler, B., 1997/98: Photogrammetrische Punktbestimmung an der Staumauer Nalps. Diplomarbeiten am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich
- Brown, D., 1971: Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866
- Fraser, C., Shortis, M., 1994: Vision metrology in industrial inspection: A practical evaluation. IAPRS Vol. 30, Part V, pp. 87-91
- Fryer, J., Bartlett, P., 1989: Photogrammetric Monitoring of Chichester Dam. Surveillance & Monitoring Surveys, University of Melbourne, Australia, pp. 74-85
- Fryer, J., 1995: Photogrammetric Monitoring of a Large Dam. FIG Commission 6, Symposium on Engineering Surveying, Cape Town, South Africa, February 6-10
- Godding, R., 1993: Ein photogrammetrisches System zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. ZPF 2/93
- van den Heuvel, F., 1993: Automated 3-D measurement with the DCS200 digital camera. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds. Gruen/Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 63-71
- Kenefick, J., Gyer, M., Harp, B., 1972: Analytical self-calibration. Photogrammetric Engineering, Vol. 38, No. 11, pp. 1117-1126
- Kersten, Th., Maas, H.-G., 1995: Photogrammetric 3-D point determination for dam monitoring. Optical 3-D Measurement Techniques III (Eds.: A. Grün, H. Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe
- Kölbl, O., 1972: Selbstkalibrierung von Aufnahmekammern. Bildmessung und Luftbildwesen 1/71, S. 31-37

- Maas, H.-G., Kersten, Th., 1994: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie bei der Endmontage im Schiffsbau. ZPF 3/94
- Maas, H.-G., Niederöst, M., 1997: The accuracy potential of large format stillvideo cameras. Videometrics V (Ed. S. el Hakim), SPIE Proceedings Series Vol. 3174
- Maas, H.-G., 1998: Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls. IAG Special Commission 4 Symposium 'Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering' (Eds. Kahmen/Brückl/Wunderlich), Eisenstadt/Austria, 22.-24.4.98
- Niederöst, M., Maas, H.-G., 1997: Codierte Zielmarken in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie. Tagungsband Jahrestagung DGPF `96, Oldenburg
- Peipe, J., Schneider, C.-Th., Sinnreich, K., 1993: Digital photogrammetric station DPA - A measurement system for close range photogrammetry. Optical 3-D Measurement Techniques II (Eds. Grün/Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 292-300