

Digitale Nahbereichsphotogrammetrie bei der Endmontage im Schiffsbau

Hans-Gerd Maas, Thomas Kersten

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie

ETH - Hönggerberg, CH - 8093 Zürich, Schweiz

Tel. +41 - 1 - 633 3058, Fax +41 - 1 - 372 0438, e-mail gerd@p.igp.ethz.ch

Tel. +41 - 1 - 633 3287, Fax +41 - 1 - 372 0438, e-mail thomas@p.igp.ethz.ch

Zusammenfassung:

Automatische oder halbautomatische Systeme für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie stellen ein sehr effizientes und genaues Meßwerkzeug für eine Reihe von Meßaufgaben in der industriellen Fertigung dar. Im Rahmen dieser Publikation sollen Erfahrungen und Ergebnisse einer Pilotstudie über die Anwendbarkeit der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie im Rahmen der Fertigung und Qualitätskontrolle an einer nordamerikanischen Werft vorgestellt werden.

Abstract:

Automatic or semi-automatic systems for digital close range photogrammetry are a very efficient and accurate tool for a large number of measuring tasks in industrial production processes. This presentation shows experiences and results of a pilot study on the applicability of digital close range photogrammetry in production and quality control conducted on a north-american shipyard.

1. Einleitung

Bei der in der Veröffentlichung beschriebenen Anwendung handelt es sich um eines von fünf Pilotprojekten, die vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich auf einer Werft von Bath Iron Works (BIW) durchgeführt wurden. Ziel der Pilotstudien war die Beurteilung der Leistungsfähigkeit moderner digital-photogrammetrischer Systeme für Meßaufgaben, wie sie typischerweise im Rahmen der Fertigung und Qualitätskontrolle im Schiffsbau anfallen.

Das hier gezeigte Projekt hat die Kontrolle der Maßhaltigkeit von Sektionen des Rumpfes bei der Endmontage eines Schiffes zum Ziel. Üblicherweise werden bei BIW Sektionen des Rumpfes mit Dimensionen von ca. 25m x 25m x 12m und einem Gewicht von einigen hundert Tonnen in einer Montagehalle aufgebaut und so weit wie möglich ausgerüstet, um dann auf dem Baudock an den bereits bestehenden Teil des Rumpfes angefügt bzw. integriert zu werden. Dabei sind aufgrund der im Schiffsbau üblichen großen Toleranzen häufig zeit- und kostenaufwendige Nachbearbeitungen notwendig.

Abb. 1 zeigt eine Ansicht eines in Zusammenbau befindlichen Rumpfes (in Richtung der Hauptachse des Schiffes gesehen), Abb. 2 die Schnittfläche einer halbfertigen Sektion des Rumpfes, welche in den in Abb. 1 gezeigten Teil zu integrieren ist. Im bisherigen Produktionsablauf bei BIW war es tatsächlich so, daß die Paßgenauigkeit der Sektion erst beim Zusammenbau auf dem Dock festgestellt wurde, was den Ablauf beträchtlich störte und den Aufwand bei der Nachbearbeitung noch erhöhte. Aufgabe eines Meßsystems ist nun, durch Kontrollmessungen vor dem Zusammenbau und



Abb. 1: Teilweise montierter Rumpf auf der Dockanlage



Abb. 2: Rumpfsektion in der Montagehalle

möglichst schon während der Montage der Sektion diese umständliche Prozedur zu verkürzen. Die Aufgabe läßt sich reduzieren auf die Bestimmung der 3-D Koordinaten von ca. 30 - 50 Punkten auf jeder Seite des aneinander zu fügenden Vertikalschnittes (Abb. 1, Abb. 2) und zusätzlich einiger weniger Punkte an der horizontalen Schnittstelle, welche anschließend in ein geeignetes gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Für die Pilotstudie wurden diese Punkte mit retroreflektierenden Zielmarken signalisiert, welche in Abb. 1 teilweise sichtbar sind.

Es ist zu beachten, daß die Datenakquisition im Rahmen der Pilotstudie unter Produktionsbedingungen erfolgte. Ein Arbeitsstopp in der Halle für die Zeit der Datenakquisition ist - auch wenn es

sich nur um einige Minuten handelt - völlig unrealistisch. Daher muß mit störenden Effekten wie Vibrationen, Störlichtern, Temperaturgradienten bis hin zur zeitweisen Verdeckung zu messender Punkten gerechnet werden; eine Verdunkelung des Raumes oder andere Maßnahmen zur Optimierung der Beleuchtungssituation waren ebenfalls nicht möglich.

2. Hard- und Softwaremodule

Zur Aufnahme des Objektes wurde eine hochauflösende Still-Video Kamera Kodak DCS200mi verwendet, die Auswertung erfolgte auf einer SUN SparcStation mit am IGP entwickelter Software.

Die Entscheidung für ein digitalphotogrammetrisches System war wegen der Notwendigkeit kurzer Zeiträume zwischen Datenaufnahme und -verarbeitung sowie aufgrund des Wunsches nach Teilautomatisierung der Auswertung eindeutig. Eine Still-Video Kamera bietet sich dabei als flexibles, relativ preiswertes Instrument für die Datengewinnung an. Bei der DCS200mi handelt es sich um eine handelsübliche Spiegelreflexkamera (Nikon 8008s), bei der statt des Films ein hochauflösender CCD Chip von Kodak in der Bildebene liegt; auf der integrierten 80MB Festplatte können 50 unkomprimierte Bilder gespeichert und über eine SCSI Schnittstelle auf andere Systeme übertragen werden. Im Gegensatz zu vielen anderen CCD Kameras, die einen Hostcomputer zur Stromversorgung, A/D-Wandlung und Bildspeicherung benötigen, kann die DCS200mi als völlig autonomes digitales Aufnahmesystem angesehen werden. Diese Tatsache und der vergleichsweise günstige Preis von ca. 15'000 DM hat sie zu einem beliebten Instrument für die digitale Nahbereichsphotogrammetrie gemacht, insbesondere für industrielle Anwendungen und Architekturphotogrammetrie (van den Heuvel, 1993; Peipe et al., 1993; Maas/Kersten, 1994).



Abb. 3: Kodak DCS200mi

camera body:	Nikon 8008s
sensor:	1524 x 1012 full frame CCD, 14 mm x 9.3 mm, black-and-white
frame grabber:	in camera body
storage:	50 images, uncompressed, on harddisk in camera body
interface:	SCSI port
software:	Adobe Photoshop (Mac) / Photostyler (PC)
weight:	1.7 kg
power supply:	AC adaptor/charger
lens mount:	Nikon bajonet

Tabelle 1: Technische Daten der DCS200mi

Im Rahmen der Pilotstudie wurden ausschließlich mit retroreflektierenden Zielmarken signalisierte diskrete Punkte gemessen. Auf kantenbasierte Verfahren wurde aufgrund der Komplexität der Szenen, häufiger Verdeckungen und Einschränkungen bei der Kontrollierbarkeit der Beleuchtungssituation verzichtet.

Die Aufnahme retroreflektierender Zielmarken bedingt eine Lichtquelle, welche sehr nah bei der Aufnahmeachse der Kamera plaziert sein muß, da die Zielmarken Licht in einem engen Kegel um

die Einfallsachse zurückwerfen; dazu werden idealerweise Ringlichter verwendet. Aufgrund der Vorgabe der Verwendung von standardisierten Hardwarekomponenten wurde im Rahmen der Pilotstudie ein gewöhnliches aufsteckbares Blitzlicht von Nikon verwendet.

Das für die Auswertung verwendete Softwarepaket ist in Abb. 4 dargestellt.

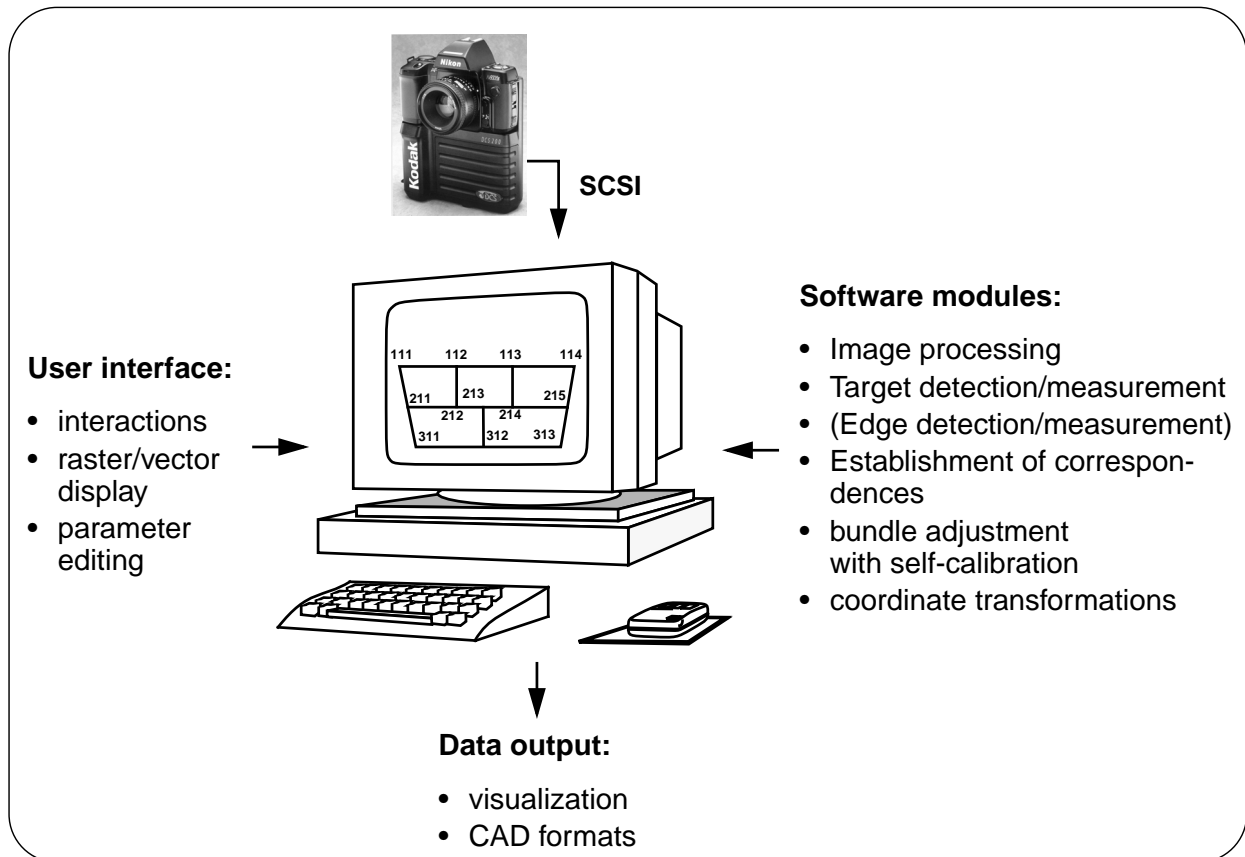


Abb. 4: Auswertesystem

Bei den einzelnen Modulen handelt es sich um Techniken, die in der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie aus verschiedenen anderen Anwendungen bereits seit einigen Jahren bekannt sind. Entscheidend für ein flexibles, auch durch einen Nicht-Photogrammeter bedienbares System ist die Integration dieser Module unter einer Benutzeroberfläche, welche dem Anwender die Handhabung des Systems erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht.

Verschiedene Stufen der Automatisierung sind dabei denkbar:

- Eine rein manuelle Messung der Bildkoordinaten signalisierter Punkte wird kaum sinnvoll sein, da die Messung wesentlich schneller und genauer mit Schwerpunktoperatoren (z.B. Maas, 1992), Template Matching (z.B. Baltsavias, 1991), Ellipsenoperatoren (Luhmann, 1986) oder anderen flächen- oder kantenbasierten Verfahren erfolgen kann; die Auswahl des geeigneten Operators hängt u.a. von der Größe der Zielmarken, den Kontrastverhältnissen am Objekt und Beleuchtungseinflüssen ab.
- Eine automatische Detektion signalisierter Punkte im Bild kann dagegen bereits zu Schwierigkeiten führen, wenn keine guten Näherungswerte gegeben sind und störende Lichtquellen im Objektraum nicht vermieden werden können. Ein einfaches Schwellwertverfahren wird in der vorliegenden Anwendung trotz der Verwendung retroreflektierender Zielmarken keine befriedi-

genden Ergebnisse zeigen; eine interessante Möglichkeit ist hier die Subtraktion von mit und ohne Blitzlicht aufgenommenen Bildern.

- Die Punktzuordnung im Bildverband erfolgt in einfachen Auswertesystemen für die Nahbereichsphotogrammetrie manuell. Hier kann bei guten Näherungswerten oder - bei fehlenden Näherungswerten - über die Verwendung von Kernlinien und Kernlinienschnittverfahren (Maas, 1991a,b; Dold/Maas, 1994) eine wesentliche Reduktion des Meßaufwandes erreicht werden. Da eine vollautomatische Zuordnung aller Punkte bei nur beschränkt kontrollierbaren äußeren Bedingungen bei der Aufnahme wiederum kritisch ist, wird man hier in der Regel zweistufig vorgehen: Der Benutzer identifiziert einige Punkte in jedem Bild, damit eine grobe Orientierung gerechnet werden kann, danach erfolgt die Zuordnung der restlichen detektierten Punkte automatisch.
- Die Detektion und Lokalisierung von Ausreißern in der anschließenden Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung (Grün, 1986; Wester-Ebbinghaus, 1983) ist in kommerziell verfügbaren Bündelprogrammen enthalten.

Vollautomatische digital-photogrammetrische Systeme wurden in den letzten Jahren für verschiedene Spezialanwendungen im Nahbereich vorgestellt (z.B. Luhmann, 1990; Maas, 1991a; Pettersen, 1992). Eine volle Automatisierung der oben beschriebenen Aufgabe scheint jedoch - insbesondere unter den bereits genannten Einschränkungen bei der Kontrollierbarkeit der Beleuchtungssituation - unter Bewahrung von Robustheit und Flexibilität des Systems zur Zeit nicht möglich.

3. Ergebnisse

Die DCS200mi erwies sich im Laufe der Pilotstudien als sehr flexibles digitales Aufnahmesystem, dessen Handhabung vom Benutzer als sehr angenehm empfunden wurde. Die Speicherkapazität von 50 Bildern auf der internen Festplatte stellt bei größeren Projekten eine Einschränkung dar; da eine größere Festplatte jedoch die Handlichkeit der Kamera beeinträchtigen würde, scheint für solche Fällen ein Laptop mit geeigneter Schnittstelle als die beste Lösung. Auch das standardmäßige Blitzlicht der Kamera erwies sich als gut geeignet für den Zweck: 20 mm große retroreflektierende Zielmarken waren selbst bei Außenaufnahmen mit einer Aufnahmedistanz von 50 m noch gut sichtbar und meßbar.

Im Rahmen dieser Präsentation sollen im folgenden die Ergebnisse von drei Messungen gezeigt werden, die aus Sicht der Aufgabenstellung und der auftauchenden Probleme als repräsentativ für Meßaufgaben im Schiffsbau angesehen werden können:

1. Die Schnittfläche der Rumpfsktion in der Montagehalle wurde mit der DCS200mi und 28 mm Nikkor Objektiv aufgenommen (ein 28mm Objektiv auf der DCS200 entspricht bezogen auf das Sensorformat etwa einem 70 mm Objektiv auf einer Kleinbildkamera); insgesamt wurden 32 Aufnahmen von 7 Stationen gemacht. Die hohe Anzahl von Aufnahmen ergibt sich vor allem aufgrund der beengten räumlichen Verhältnisse, die es notwendig machten, von jeder Station 3-4 Aufnahmen mit verschwenkter Kameraachse zu machen, um das Objekt vollständig zu erfassen; außerdem bedingt die Notwendigkeit der Selbstkalibrierung zusätzliche Aufnahmen mit um 90° und 180° gedrehter Kameraachse (Godding, 1993); schließlich konnten auch Verdeckungen von Punkten für verschiedene Aufnahmestandorte und -zeiten nicht vermieden werden, sodaß zur Erhaltung der Redundanz sicherheitshalber mehr Aufnahmen als nötig gemacht wurden. Alle Aufnahmen wurden mit Blende 22 und Blitzsynchronisation bei 1/125 Sekunde gemacht, sodaß

nur die Zielmarken, nicht aber die Objektkonturen im Bild sichtbar waren (Abb. 2 zeigt nur ein Übersichtsbild); damit konnte auch grundsätzlich auf Unendlich fokussiert werden.

2. Wegen der durch die beengten räumlichen Verhältnisse erzwungenen großen Anzahl von Aufnahmen wurde dieselbe Schnittfläche ein zweites Mal mit einem Nikkor 18 mm Objektiv aufgenommen. Dies bietet gleichzeitig die Möglichkeit der Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Aufgrund geänderter Zugänglichkeitsverhältnisse in der Montagehalle konnten nur von 5 Standpunkten Aufnahmen gemacht werden. Da auch das 18 mm Objektiv das Objekt nicht komplett abzubilden vermochte und auch hier eine Selbstkalibrierung durchgeführt werden mußte, wurden insgesamt 19 Aufnahmen gemacht.
3. Die Schnittfläche auf dem Baudock (Abb. 1) wurde ebenfalls mit dem 28 mm Nikkor aufgenommen. Aufgrund von Einschränkungen der Zugänglichkeit durch Bautätigkeiten konnten hier jedoch nur 9 Aufnahmen von 6 Stationen aufgenommen werden. Aufnahmen mit rotierter Kameraachse für die Selbstkalibrierung wurden nicht gemacht, stattdessen wurden die Kalibrierungsparameter von der vorigen Messung übernommen. Die Lichtverhältnisse ließen hier eine sehr weitgehende Abblendung der Kamera nicht zu, sodaß die Objektkonturen hier komplett sichtbar blieben.

Die wichtigsten Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeiten dieser drei Messungen werden in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Messung	σ_0	RMS der Standardabweichungen im Objektraum (X,Y,Z)
1	0.47 μm	0.52 mm, 1.31 mm, 0.88 mm
2	0.45 μm	0.60 mm, 1.47 mm, 0.45 mm
3	0.49 μm	0.58 mm, 1.92 mm, 1.05 mm

Tabelle 2: Erzielte Genauigkeiten (Y in Richtung der Schiffsachse, Z = Höhe)

Somit wurden in diesen Pilotstudien unter Produktionsbedingungen Standardabweichungen von etwa 1/20 Pixel im Bildraum (was einer relativen Genauigkeit von 1 : 20'000 - 1 : 30'000 entspricht) erzielt - ein Wert, der mit einer analogen Kleinbildkamera kaum erreichbar sein dürfte und fast das Niveau einer Mittelformatkamera erreicht. Im Objektraum ergibt sich aus den Standardabweichungen bezogen auf die Breite des Schiffes von etwas mehr als 20 m eine Relativgenauigkeit von etwa 1 : 40'000.

4. Ausblick

Im Rahmen der in dieser Publikation beschriebenen Pilotstudie konnte gezeigt werden, daß ein auf weitgehend standardisierten Komponenten bestehendes digital-photogrammetrisches System für Vermessungsaufgaben beim Schiffsbau sehr gut geeignet ist. Die Ergebnisse der Studie konnten sowohl hinsichtlich Kosten und Zeitaufwand wie auch im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit die Erwartungen erfüllen.

Die hochauflösende Still-Video Kamera Kodak DCS200mi erwies sich als ein flexibles, autonomes System für die Bilddatengewinnung mit einem hohen Genauigkeitspotential. Sie dürfte für die nahe Zukunft das "Arbeitspferd" der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie sein.

Eine entscheidende Bedeutung kommt bei digital-photogrammetrischen Systemen für industrielle

Anwendungen der Ausgestaltung der Benutzerschnittstelle zu. Diese entscheidet nicht nur über Benutzungskomfort und Flexibilität eines Systems, sondern generell über Akzeptanz oder Nicht-Akzeptanz einer Technik durch den Benutzer. Dies ist gleichzeitig ein Punkt, in den sehr viel Entwicklungsarbeit investiert werden kann, was von manchen Computerfirmen durch häufigen Wechsel der Benutzeroberfläche nicht gerade erleichtert wird. Der Grad der Automatisierung eines Systems sollte nicht auf Kosten der Robustheit und der Flexibilität des Systems zu hoch getrieben werden; ein gewisses Maß an Interaktion wird vom Benutzer durchaus akzeptiert, außerdem scheint ein vollautomatisches photogrammetrisches Meßsystem für beliebig komplexe industrielle Anwendungen im Moment undenkbar.

Die gestellten Genauigkeitsanforderungen konnten erfüllt werden, obwohl bei der Aufnahme unter Produktionsbedingungen die Beleuchtungsbedingungen keinesfalls ideal waren und in vielen Fällen Kompromisse bei der Aufnahmegeometrie eingegangen werden mußten. Extrapoliert man die Hardwareentwicklung in die nahe Zukunft (-> höher auflösende CCD Kameras), so ergibt sich auf der Genauigkeitsseite noch ein bequemes Polster, welches sogar noch einige Sub-Optimalitäten der oben genannten Art bei der Datenakquisition erlaubt.

5. Dank

Die Pilotstudie wurde in Zusammenarbeit mit Bath Iron Works Corporation in Maine (USA) durchgeführt. Für die Unterstützung der Arbeiten vor Ort möchten wir den zuständigen Stellen bei Bath Iron Works, insbesondere Herrn George W. Johnson und seiner Gruppe, herzlich danken.

Literatur

1. Dold, J., Maas, H.-G., 1994: An application of epipolar line intersection in a hybrid close range photogrammetric system. ISPRS Intercongress Symposium, Melbourne, Australia, March 1-4, 1994
2. Godding, R., 1993: Ein photogrammetrisches System zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. ZPF 2/93
3. Grün, A., 1986: Photogrammetrische Punktbestimmung nach der Bündelmethode. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 40
4. van den Heuvel, F., 1993: Automated 3-D Measurement with the DCS200 Digital Camera. Proceedings of 2nd Conference on Optical 3-D Measurement Techniques (Eds. Gruen/Kahmen), Zurich, October 4-7, pp. 63-71
5. Luhmann, Th., 1986: Ein Verfahren zur rotationsinvarianten Punktbestimmung. BuL 54, Nr. 4, S. 147-154
6. Luhmann, Th., 1990: An integrated system for real-time and on-line applications in industrial photogrammetry. SPIE Proceedings Series Vol. 1395, pp. 488-495
7. Maas, H.-G., 1991a: Digital Photogrammetry for the Determination of Tracer Particle Coordinates in Turbulent Flow Research. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (Vol. 57, No. 12, pp. 1593-1597)
8. Maas, H.-G., 1991b: Automated Photogrammetric Surface Reconstruction with Structured Light. International Conference on Industrial Vision Metrology, Winnipeg, Canada, 11.-12. 7. 1991
9. Maas, H.-G., Kersten, Th., 1994: Experiences with a high resolution still video camera in digital photogrammetric applications on a shipyard. ISPRS Intercongress Symposium, Melbourne, Australia, March 1-4, 1994

10. Pettersen, A., 1992: Metrology Norway System - an on-line Industrial Photogrammetric System. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Part B5, p. 43
11. Peipe, J., Schneider, C.-Th., Sinnreich, K., 1993: Digital Photogrammetric Station DPA - A Measurement System for Close Range Photogrammetry. Proceedings of the 2nd Conference on Optical 3-D Measurement Techniques (Eds. Gruen/Kahmen), Zurich, October 4-7, pp. 292-300
12. Wester-Ebbinghaus, W., 1983: Ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern. DGK Reihe C, Nr. 289