

Photogrammetrische 3D-Messsysteme

CARL-THOMAS SCHNEIDER, Braunschweig

Keywords: 3-D measuring system, industrial photogrammetry, automatic measurement, coded targets

Zusammenfassung: Seit der Einführung PC-basierter photogrammetrischer 3D-Messsysteme für Anwendungen im Nahbereich wie Architektur oder industrielle Messtechnik hat sich durch den stetig gewachsenen Automatisierungsgrad ein immer breiteres Anwendungsfeld erschlossen. Dieser Beitrag beschreibt die einzelnen Entwicklungsstadien anhand repräsentativer Systeme mit ihren spezifischen Merkmalen aus den jeweiligen Anwendungsgebieten.

Summary: *Photogrammetric 3-D Measuring Systems.* PC based photogrammetric 3-D measurement systems for close range applications have become increasingly automated in the past decades. Since then more and more applications in architecture or industry could be performed. This publication covers the development stages by describing the relevant systems with their specific features for the fields of application.

1 Einleitung

Seit der Einführung PC-basierter 3D-Messsysteme für die Nahbereichsphotogrammetrie ist ihre Weiterentwicklung geprägt von dem Ziel, die Verarbeitung der Standardauswerteroutinen stets weiter zu vereinfachen und zu automatisieren. Diese Entwicklung lässt sich beispielhaft an Systemen für die Anwendungsgebiete Architektur- bzw. Industriephotogrammetrie beschreiben, die die unterschiedlichen Entwicklungsschritte der Automatisierung widerspiegeln.

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit 3D-Messsystemen, die primär für den Einsatz in der Nahbereichsphotogrammetrie entwickelt worden sind. Selbstverständlich sind viele dieser Aufgaben ebenfalls mit analytischen Plottern oder anderen digitalen Systemen aus dem Bereich der Luftbildphotogrammetrie oder der Fernerkundung zu lösen, diese werden jedoch im Folgenden nicht näher behandelt.

2 3D-Messsysteme in der Nahbereichsphotogrammetrie

3D-Messsysteme in der Nahbereichsphotogrammetrie basieren auf dem photogrammetrischen Grundprinzip, ein Objekt mit Bildern aufzunehmen und anhand dieser Bilder die Merkmale des Objekts zu vermessen. Abwandlungen dieses Prinzips sowie Kombinationen mit zusätzlichen Hilfsmitteln wie Tastspitzen oder spezielle Beleuchtungsprinzipien finden sich in Kapitel 3.

Die so definierten Systeme werden in zwei Hauptanwendungsrichtungen eingesetzt, der Architekturphotogrammetrie (inkl. Bauvermessung, Archäologie, Unfallaufnahme) und der industriellen Messtechnik. Während bei der Architekturphotogrammetrie überwiegend natürliche Merkmale von Gebäuden vermessen werden, wird bei industriellen Anwendungen meist die Lage von künstlich signalisierten Punkten gesucht.

2.1 Systeme für die Architekturphotogrammetrie

In der Mitte der achtziger Jahre wurden die ersten Architekturphotogrammetrie-Systeme vorgestellt, die statt mechanisch bewegter Komponenten aus Personalcomputer, Digitizer und Auswertesoftware bestanden (Abb. 1). Dadurch ließ sich zum ersten Mal ein Massenmarkt erschließen, da die Investitionskosten gering waren und sich die Möglichkeit bot, Nahbereichsphotogrammetrie zum Standardwerkzeug eines Ingenieurbüros werden zu lassen (siehe ZINNDORF 2004, in diesem Heft).

Die ersten kommerziell verfügbaren Systeme bestanden aus einem handelsüblichen Digitalisiertablett, zunächst DOS-basiertem Personalcomputer und einer Software, die Bildmessung, Bildorientierung, grafische Auswertung und Ergebnisdarstellung erlaubte. Solche Systeme waren z. B. Rollei MR2 und Leica Elcovision (KINZEL & POMASKA 1988, ZINNDORF 2004). Zur Bildaufnahme wurden Réseaukameras verwendet, die durch ein vor der Bildebene angebrachtes Kreuzraster ermöglichten, ein kamerafestes Bildkoordinatensystem zu definieren und zusätzlich Filmverzug und -wölbung rechnerisch zu korrigieren (WESTER-EBBINGHAUS 1989).

Der Einsatzbereich dieser Systeme war durch die erzielbare Genauigkeit begrenzt. Da sämtliche Bildmessungen per Messlupe auf dem Digitalisiertablett durchgeführt wurden, ließen sich relative Messgenauigkeiten bis ca. 1:5000 erreichen. Dies beein-



Abb. 1: Architekturphotogrammetrie-System.

trächtigte jedoch nicht die weite Verbreitung der Systeme in den Bereichen Architektur, Archäologie, Denkmalpflege, Bauwesen oder auch polizeiliche Unfallaufnahme bzw. kriminalistische Beweissicherung.

Der nächste Entwicklungssprung gelang durch die Verarbeitung digitaler Bilder Anfang der neunziger Jahre. Hierzu wurde die Hardware ergänzt um Bildscanner, mit denen entweder Papiervergrößerungen oder direkt Dias oder Negative gescannt wurden. Durch die Verwendung digitaler Bilder wurden die Digitalisiertablets nicht mehr benötigt, die Bilder konnten direkt am Monitor über Cursor, kombiniert mit Zoom-Funktion, gemessen werden. Ein wesentlicher Vorteil digitaler Bilder besteht zudem darin, dass es erstmalig möglich war, über spezielle Bildverarbeitungsverfahren einige Messfunktionen zu automatisieren. Hierzu zählte zunächst die automatische Erkennung und Messung der Réseaukreuze, ein Teil des Auswerteprozesses, der bei manueller Auswertung sehr zeitaufwendig ist und die erzielbare Genauigkeit stark beeinflusst. Daneben war die einfache Herstellung digitaler Entzerrungen möglich, die eine kostengünstige Alternative zur Strichzeichnung darstellt.

Inzwischen haben digitale Kameras die klassischen filmbasierten Réseaukameras weitgehend ersetzt. Digitalkameras besitzen heute Sensoren mit bis zu 4500×3000 Bildelementen, mit denen sich Auflösungen in ähnlicher Größenordnung wie bei Kleinbildern erzielen lassen. Erste Kameras mit sinnvoller Auflösung von 3000×2000 Bildelementen standen schon seit Mitte der neunziger Jahre zur Verfügung, waren jedoch auf Grund ihrer hohen Kosten nicht im gleichen Preissegment wie die übrigen Systemkomponenten verfügbar.

Die heutigen Entwicklungsarbeiten an diesen Systemen beschäftigen sich mit der automatischen Extraktion von Bildelementen. Ziel ist, natürliche Merkmale wie Hauskanten, Fensteröffnungen, Straßenkanten etc. automatisch zu erkennen und ihre Position im Bild zu bestimmen. Dies wird dazu dienen, die Auswertung weiter zu vereinfachen und die Auswertezeiten zu verkürzen.

2.2 Systeme für industrielle Anwendungen

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Systeme wurden zunächst auch für Anwendungen im industriellen Umfeld eingesetzt, fanden jedoch wegen der nicht ausreichenden Genauigkeit kaum Nutzer. Zur Erhöhung der Genauigkeit waren größere Bildformate und feinere Réseaugitter notwendig. Aus diesem Grund entstanden Ende der achtziger Jahre für den Nahbereich einsetzbare Großformatkameras mit einem Bildformat von $23\text{ cm} \times 23\text{ cm}$ (FRASER & BROWN 1986, RIECHMANN 1990). Die fotografischen Bilder dieser Kameras wurden mit PC-gesteuerten Réseauscannern ausgewertet, bei denen das ursprüngliche Bild partiell gescannt und ausgewertet wurde (Abb. 2). Da im Gegensatz zu Anwendungen in der Architekturphotogrammetrie nur einzelne signalisierte Punkte zu erfassen sind, genügt es, nur die Teile des Bildes zu scannen, in denen sich Messpunkte abbilden. Die gesuchten Objektpunkte werden mit kreisförmigen Messmarken signalisiert, die sich im Bild auf Grund der perspektivischen Verzerrung als Ellipsen abbilden. Spezielle Bildverarbeitungsoperatoren ermöglichen ihre präzise Mittelpunktbestimmung (LUHMANN 1986).

Erst die Markteinführung von Digitalkameras mit 3000×2000 Bildelementen Mitte der neunziger Jahre ermöglichte eine breite Nutzung der Nahbereichsphotogrammetrie im industriellen Umfeld. Während die hochauflösende Réseaukamera inkl. Scanner einen Systempreis von ca. 150.000 Euro bedeutete, waren nun Systempreise von 50.000 bis 60.000 Euro möglich.

Ein weiterer Schritt zur automatischen Auswertung war die Entwicklung der co-

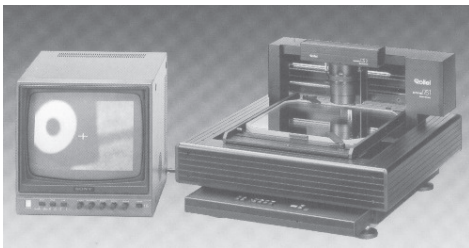


Abb. 2: Auswertesystem mit Réseauscanner.



Abb. 3: Industriemesssystem mit Digitalkamera.

dierten Zielmarke (SCHNEIDER 1991). Dabei wird eine konventionelle kreisförmige Messmarke mit einem zusätzlichen Codering oder anderem maschinenlesbarem Code erweitert (Abb. 4). Dieser Code lässt sich ebenso wie die Messmarke selbst im Bild automatisch erkennen und detektieren. Dies ermöglicht die automatische Zuordnung homologer Punkte ohne manuellen Eingriff. Unter dieser Voraussetzung ist ein automatischer Auswerteprozess von der Bildaufnahme über Bildmessung und Orientierung bis zur Koordinatenberechnung möglich.

Seit 1995 werden solche Systeme für die unterschiedlichsten Messaufgaben eingesetzt und sind heute in vielen Industriezweigen ein Standardmessmittel. Die Kamertechnik hat sich stets weiterentwickelt hin zu größeren Sensoren und in die Kamera integrierter Intelligenz. So bietet die Kameraserie INCA I–III (BROWN & DOLD 1995) einen in die Kamera integrierten PC zur Vorverarbeitung der Bilder. Heute stehen handelsübliche Digitalkameras mit bis zu

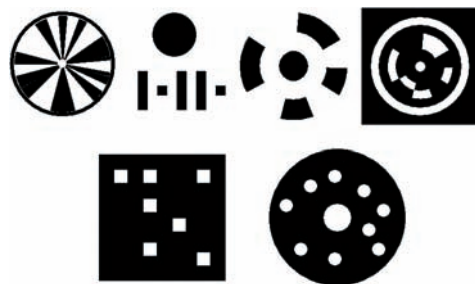


Abb. 4: Codierte Messmarken (aus LUHMANN 2003).

4500 × 3000 Bildelementen zur Verfügung und relative Objektgenauigkeiten über 1:100.000 sind erzielbar (LUHMANN & GODDING 2004, in diesem Heft).

3 Spezielle photogrammetrische 3D-Messsysteme für industrielle Anwendungen

Neben den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen klassischen 3D-Messsystemen für den Nahbereich sind speziell für industrielle Anwendungen weitere Systemtypen entwickelt worden, die zwar ebenso auf dem photogrammetrischen Grundprinzip beruhen, jedoch durch zusätzliche Systemkomponenten oder Vorrichtungen erweitert wurden. Man kann hier zwischen mobilen und stationären Systemen unterscheiden, die also entweder zum Messobjekt gebracht werden können (mobil) oder bei denen das Messobjekt zum Messgerät gebracht wird (stationär).

3.1 Mobile Systeme (optisch/taktil)

Im industriellen Umfeld besteht häufig nicht die Möglichkeit, die relevanten Objektpunkte, also die, deren Koordinaten letztlich bestimmt werden sollen, künstlich zu signalisieren oder sie diskret im Bild zu erkennen. Messmarken sind oft auf Grund der Beschaffenheit der Objekt Oberfläche oder wegen des zusätzlichen Aufwands des Aufbringens und Entfernens nicht praktikabel. Andererseits sind Punkte häufig nicht diskret erkennbar, wenn sie sich zum Beispiel auf einer glatten Oberfläche befinden. Um solche Punkte dennoch messen zu können, sind photogrammetrische Messsysteme mit einem Hilfsmittel zur mechanischen Antastung ergänzt worden. Diese mechanische Antastung ist auf zwei unterschiedliche Arten realisiert worden, zum einen mit passiven Tastern, die mit Messmarken ausgestattet sind, zum anderen mit aktiven Tastern, die selbst den Bildsensor tragen.

Ende der achtziger Jahre wurden die ersten Systeme mit passiven Tastern vorgestellt. Sie arbeiten nach dem Prinzip, dass zwei oder mehr elektronische Kameras in

einer festen und bekannten Position zueinander aufgestellt sind. Hier sind Systeme mit variabel positionierbaren Kameras verfügbar (BROWN & DOLD 1995, PETERSEN 1992) oder mit fest zueinander positionierten Kameras, die sich in einem gemeinsamen Gehäuse befinden. Die Kameras erfassen einen gemeinsamen Bereich (Messvolumen), innerhalb dessen sich das Messobjekt befindet. Die relevanten Punkte am Objekt werden nun mit einem Taster angetastet und die Position der Messmarken auf dem Taster durch einen einfachen Vorwärtsschnitt bei bekannter äußerer Orientierung der Kameras bestimmt. Da die relative Position der Messmarken auf dem Taster zu der Tastspitze bekannt ist, kann direkt die Position der Tastspitze bestimmt werden. Diese Systeme werden auch als Online-Systeme bezeichnet, da sie ohne zeitliche Verzögerung die Koordinaten des angetasteten Punktes liefern. Allerdings wird jeweils nur ein Punkt zeitgleich bestimmt.

Ende der neunziger Jahre wurde eine weitere Variante der optisch/taktilen Antastung



Abb. 5: Messsystem mit aktivem Taster.

unter Verwendung eines aktiven Tasters vorgestellt (SINNREICH & BÖSEMANN 1999). Bei einem aktiven Taster ist die Kamera in den Taster integriert und fest mit der Tastspitze verbunden (Abb. 5). Die Kamera blickt auf ein bekanntes Punktfeld, ähnlich einem Passpunktfeld, und kann durch einfachen Rückwärtsschnitt ihre Position, bezogen auf das Punktfeld, bestimmen. Da die Position der Tastspitze relativ zum Projektionszentrum der Kamera durch Kalibrierung bekannt ist, kann ebenso die Position des Anstapunktes, bezogen auf das Punktfeld, berechnet werden. Die Kamera ist dabei direkt mit dem Rechner verbunden, auf dem die Auswertung der Bildinformationen durchgeführt wird. Als Referenzpunktfeld dient eine stabile Platte oder Wand, auf der eine Anzahl von codierten und uncodierten Punkten angebracht ist, deren relative Lage zueinander bekannt ist.

3.2 Stationäre Systeme

Etwa gleichzeitig mit der Vorstellung der ersten mobilen Messsysteme wurden auch die ersten Ansätze zu stationären 3D-Messsystemen präsentiert. Es bestand der Wunsch, die Vorteile der photogrammetrischen 3D-Vermessung, nämlich berührungsloses und schnelles Messen, zur Qualitätskontrolle von Bauteilen zu nutzen. Das Grundprinzip dieser Systeme bestand in einer Messzelle, in der die Aufnahmesensoren (i. d. R. elektronische Kameras) und Beleuchtungseinrichtungen fest zueinander angeordnet waren. Zusätzlich konnten die Systeme um Positioniervorrichtungen für die Messobjekte wie Drehtisch o. ä. ergänzt werden. Die Anwendung erstreckte sich entweder auf die Messung einer Vielzahl unterschiedlicher Objekte in einem System oder auf nur eine eng eingegrenzte Messaufgabe.

Ein Beispiel für ein System zur Vermessung unterschiedlichster Bauteile ist das Anfang der neunziger Jahre entwickelte Programmierbare Optische Messmittel (POM) (LOSER & LUHMANN 1992). Hierbei handelte es sich um eine Einrichtung, mit der unterschiedlichste Bauteile wie Armaturentafel, Windschutzscheibe oder Innenverkleidun-

gen mit jeweils unterschiedlichen Messprogrammen, aber gleichem Hardwareaufbau gemessen werden konnten. Zur Bildaufnahme diente eine Réseau-Scanning Kamera (RIECHMANN 1990), die durch einen beweglichen Sensor, der innerhalb der Bildebene verschoben werden konnte, eine sehr hohe relative Auflösung erzielen konnte. Unterschiedliche, rechnergesteuerte Beleuchtungskomponenten wie Laserlinien, Weißlicht etc. ermöglichten die für die automatische Bildauswertung notwendige spezielle Beleuchtung des Objekts. Die enorme Komplexität des Ansatzes und die Leistungsgrenzen der zur Verfügung stehenden Hardware führten dazu, dass das Projekt zum damaligen Zeitpunkt nicht zur Serienreife gelangte.

Zur gleichen Zeit wurde ein ähnliches System vorgestellt, das jedoch nur auf eine einzige Messaufgabe, nämlich die Vermessung von Rohren (KFZ-Bremsleitungen, Hydraulikleitungen, Abgasanlagen), ausgelegt war (BÖSEMANN 1996). Das System besteht aus einem Rahmen, der 16 CCD-Kameras trägt, die das Messvolumen von 1200 mm × 2500 mm × 600 mm erfassen. Eine Durchlichtbeleuchtung ermöglicht die Darstellung der zu vermessenden Rohrleitung im Bild als dunkles Polygon vor hellem Hintergrund. Eine solche Abbildung vereinfacht die automatische Erkennung des Rohres im Bild und ermöglicht die Auswertung ohne Interaktion des Benutzers. Ein solches System findet sich heute an vielen Orten in der Fertigung von Rohrleitungen und ist so weit in den Fertigungsprozess integriert, dass direkt Korrekturdaten an die Fertigungsautomaten gesandt werden können, wenn die Messwerte nicht den Sollwerten der Konstruktion entsprechen.

Dieses zweite Beispiel steht stellvertretend für eine Vielzahl von Systemen, die heute, nach photogrammetrischen Prinzipien arbeitend, für einfache 3D-Prüfaufgaben eingesetzt werden. Häufig stammen diese Systeme von Herstellern oder Entwicklergruppen, die in der photogrammetrischen Fachwelt kaum bekannt sind, aber ähnliches Fachwissen aufgebaut haben und anwen-

4 Ausblick

Der Nahbereichsphotogrammetrie stehen heute handelsübliche Hardwarekomponenten wie Rechner und Kameras zur Verfügung, die den Anforderungen der Anwender gerecht werden und einen wirtschaftlich gewinnbringenden Einsatz der Systeme ermöglichen. Die am Markt verfügbaren photogrammetrischen 3D-Messsysteme sind technisch ausgereift, es müssen jedoch bereits jetzt die Grundlagen für die Systeme der nächsten und übernächsten Generation geschaffen werden. Hierbei ist zum einen der Wunsch der Anwender nach weiter automatisierter Bilderkennung ohne jegliche Signalisierung oder sonstige Objektpräparation zu erfüllen. Ein weiterer Wunsch besteht darin, die Systeme so in einen automatisierten Fertigungsprozess zu integrieren, dass sie sich selbständig an die jeweiligen Umgebungsbedingungen anpassen, ohne dass das Expertenwissen eines Bedieners gefordert ist. Letztlich muss die Ergebnisdarstellung weiter optimiert werden, so dass der Anwender die Daten in kürzester Zeit analysieren kann, damit so schnell wie möglich die daraus folgenden Entscheidungen getroffen werden können.

5 Literatur

- BÖSEMANN, W., 1996: The optical tube measurement system OLM – photogrammetric methods used for industrial automation and process control. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **31**, B5: 55–58.
- BROWN, J. & DOLD, J., 1995: V-STARS – A system for digital industrial photogrammetry. – In: GRÜN/KAHMEN (ed.): *Optical 3-D Measurement Techniques III*. – pp. 12–21, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- FRASER, C. & BROWN, D.C., 1986: Industrial photogrammetry – new developments and recent applications. – *The Photogrammetric Record* **12** (68): 197–217.
- KINZEL, R. & POMASKA, G., 1988: Erste Anwendererfahrungen mit dem System Rolleimetric MR2. – *Der Vermessungsingenieur*, **1988** (39): 21–24.
- LOSER, R. & LUHMANN, T., 1992: The programmable optical 3-D measuring system POM – applications and performance. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **29**, B5: 533–540.
- LUHMANN, T., 1986: Ein Verfahren zur rotationsinvarianten Punktbestimmung. – *Bildmessung und Luftbildwesen*, **1986** (4): 147–154.
- LUHMANN, T., 2003: *Nahbereichsphotogrammetrie*. – 2. Aufl., 586 S., Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LUHMANN, T. & GODDING, R., 2004: Messgenauigkeit und Kameramodellierung – Kernfragen der Industriephotogrammetrie. – *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **2004** (1).
- PETTERSEN, H., 1992: Metrology Norway System – an on-line industrial photogrammetry system. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **29**, B5: 43–49.
- RIECHMANN, W., 1990: The reseau-scanning camera – conception and first measurement results. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **28/5,2**: 1117–1125.
- SCHNEIDER, C.-T., 1991: Mehrbildzuordnung. – In: *Dimension 1991 – Optische Formerfassung*. – DGZfP, Vol. **27**: 61–67, Berlin.
- SINNREICH, K. & BÖSEMANN, W., 1999: Der mobile 3D-Messtaster von AICON – ein neues System für die digitale Industrie-Photogrammetrie. – *Publikationen der DGPF*, Band **7**: 175–181, Berlin.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., 1989: Das Réseau im photogrammetrischen Bildraum. – *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, **1989** (3): 3–10.
- ZINNDORF, ST., 2004: Photogrammetrische Low-Cost-Systeme. – *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **2004** (1).

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. CARL-THOMAS SCHNEIDER
AICON 3D Systems GmbH
Biberweg 30 C
D-38114 Braunschweig
Tel.: +49-531-58 000 58
Fax: +49-531-58 000 60
e-mail: ct.schneider@aicon.de

Manuskript eingereicht: September 2003
Angenommen: Oktober 2003