

Zur Erfassung von Freiformflächen mit Streifenprojektionssystem und digitaler Nahbereichsphotogrammetrie

PETER ANDRÄ¹ & JÜRGEN PEIPE²

Zusammenfassung: Die optische 3D-Erfassung von Objektoberflächen ist eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung und Fertigung industrieller Produkte, z.B. von Fahrzeugen und Komponenten im Automobil- und Flugzeugbau. Streifenprojektionssysteme sind hierfür geeignet, sie liefern dichte 3D-Punktwolken in kurzer Zeit. Mehrere Messfelder lassen sich durch photogrammetrisch bestimmte Referenzpunkte miteinander verbinden, um auch große Objekte exakt erfassen zu können. Im vorliegenden Bericht werden verschiedene Möglichkeiten der photogrammetrischen Punktbestimmung bei weitgehend automatisierter Auswertung sowie unterschiedliche Strategien für die Verknüpfung der Messfelder diskutiert.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung, Herstellung und Qualitätskontrolle von industriellen Produkten und Bauteilen werden zunehmend optische Messverfahren eingesetzt. Die verwendeten Messsysteme sollen mobil, flexibel und benutzerfreundlich sein und rasch genaue Ergebnisse liefern. Schnelle flächenhafte geometrische Formbestimmung ist mit Streifenprojektionssystemen möglich, die in kurzer Zeit dichte 3D-Punktwolken generieren. Es werden die Koordinaten von Freiformflächen bestimmt, aber auch konstruktionsrelevante Geometriemerkmale, wie z.B. Formlinien, Kanten, Bohrungen und Löcher.

Je nach Messsystem können kleinere oder größere Objekte bzw. Objektbereiche aufgenommen werden. Müssen mehrere Messfelder zusammengefügt werden, um ein Objekt vollständig zu erfassen, so kann dies mit Hilfe überlappender Bereiche geschehen. Bei wenigen Messfeldern gelingt das mit guter Genauigkeit, nicht aber bei einer größeren Zahl. In diesem Fall können Referenzpunkte eingeführt werden, die mit übergeordneter Genauigkeit zu bestimmen sind und deren 3D-Koordinaten die Verknüpfung der Messfelder ermöglichen. Als Methode zur Herstellung eines Netzwerks von Referenzpunkten bietet sich die Photogrammetrie an. Grundlegende Untersuchungen zu diesem Thema - die sich z.T. auch mit der Anwendung photogrammetrischer Verfahren bei der Kalibrierung von Streifenprojektionssystemen befassen - sind der Literatur zu entnehmen (z.B. MALZ, 1996; RIECHMANN & THIELBEER, 1997; MICHAELIS, 1997; SCHARSICH & PFEIFER, 1998; HAU, 1999; GÜHRING et al., 2000).

¹ Dr. Peter Andrä, Steinbichler Optotechnik GmbH, Am Bauhof 4, D-83115 Neubeuern
e-mail: P.Andrae@Steinbichler.de

² Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie,
D-85577 Neubiberg
e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

In diesem Bericht werden zum einen mehrere Möglichkeiten der 3D-Punktbestimmung mit Hilfe von Geräten und Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie bei weitgehend automatisierter Auswertung diskutiert. Zwei Kameras unterschiedlicher Qualität kamen zum Einsatz. Außerdem wurden die Bildanzahl und die Zahl der Referenzpunkte variiert. Zum anderen wurde ein Fahrzeug-Designmodell mit einem Streifenprojektionssystem aufgenommen, die Messfelder wurden nach den genannten Verknüpfungsmethoden zusammengefügt und die Ergebnisse der 3D-Rekonstruktion miteinander verglichen.

2 COMET Streifenprojektionssystem

Das Messprinzip des verwendeten Streifenprojektionssystems COMET der Fa. Steinbichler/Neubeuern (Abb. 1; ANDRÄ et al., 2002) beruht auf aktiver Musterprojektion, Aufzeichnung des vom Objekt reflektierten Signals in einer CCD-Kamera, Phasenmessung des abgebildeten Musters und Berechnung von 3D-Daten mit hoher Punktdichte - mehr als eine Million Punkte - durch Triangulation. Dabei beinhalten die Verformungen des projizierten Musters die Information zur Bestimmung der Oberflächentopographie des aufgenommenen Objekts. Projektor und Kamera sind mechanisch stabil in ein Gehäuse eingebaut, ihre Entfernung und Orientierung wird durch Systemkalibrierung ermittelt und bleibt über längere Zeit unverändert. Die Weiterverarbeitung der umfangreichen Datenmengen, z.B. die Ausdünnung und Strukturierung der X,Y,Z Punktwolken, erfolgt mit dem zugehörigen Programm *COMETplus* zur Generierung geschlossener Polygonnetze und geränderter 3D-Modelle.



Abb. 1 Streifenprojektionssystem COMET C400VZ

Als Neuentwicklung stand das Streifenprojektionssystem *COMET VarioZoom* zur Verfügung, das es gestattet, die Messfeldgröße und Objektauflösung zu variieren, ohne dass ein Austausch der Hardware oder eine Neukalibrierung notwendig ist (Tab. 1). So ist es möglich, ein Objekt zum Beispiel im Standard-Mode zu digitalisieren und zusätzlich Details mit höherer Auflösung im Zoom-Mode abzubilden. Das Messsystem ist mobil einsetzbar, kann also beliebig positioniert werden, um eine Oberfläche von allen Seiten vollständig aufzunehmen.

<i>VarioZoom</i> Sensor	C400VZ	C250VZ	C100VZ
Hochauflösender und Standard-Mode:			
Messfeld (mm ²)	420 x 340	245 x 200	100 x 80
Abstand der Messpunkte (mm)	0.3 - 0.6	0.17 - 0.34	0.07 - 0.14
Zoom-Mode:			
Messfeld (mm ²)	210 x 170	120 x 100	50 x 40
Abstand der Messpunkte (mm)	0.3	0.17	0.07
Genauigkeit (mm)	0.070	0.040	0.020

Tab. 1 Technische Daten COMET *VarioZoom*

Bei der in diesem Bericht beschriebenen Vermessung eines Fahrzeug-Designmodells (Maßstab ca. 1 : 2.5) wurde eine Messfeldgröße von 420 x 340 mm² gewählt, um das ganze Objekt mit möglichst wenig Messfeldern - es waren dann schließlich 49 - erfassen zu können.

3 Photogrammetrische Messungen

Ziel der photogrammetrischen Arbeiten war es, 3D-Koordinaten von Referenzpunkten mit hoher Genauigkeit bereitzustellen, geeignet für die Verknüpfung der einzelnen, mit dem Streifenprojektionssystem erhaltenen Punktwolken. Die Bilder wurden mit zwei Digitalkameras unterschiedlicher Güte und Preisklasse aufgenommen; Bild- und Punktzahl waren zu variieren und es sollten die Messungen und Berechnungen weitgehend automatisiert erfolgen, also eine Arbeitsweise gewählt werden, die es auch einem Nicht-Photogrammeter ermöglicht, zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen.

Zunächst wurden auf dem Fahrzeugmodell und in seiner Umgebung uncodierte und codierte (für die automatische Erkennung der Punktnummer) retroreflektierende Kreismarken angebracht und eine Reihe von kalibrierten Maßstäben hinzugelegt (Abb. 2). Das Objekt wurde von regelmäßig verteilten Standpunkten rundum photographiert, so dass ca. 100 Aufnahmen in drei der Höhe nach getrennten Bildverbänden zur Verfügung standen, inklusive der für die simultane Kalibrierung der Kamera im Rahmen der nachfolgenden Bündelausgleichung erforderlichen gewälzten Aufnahmen.

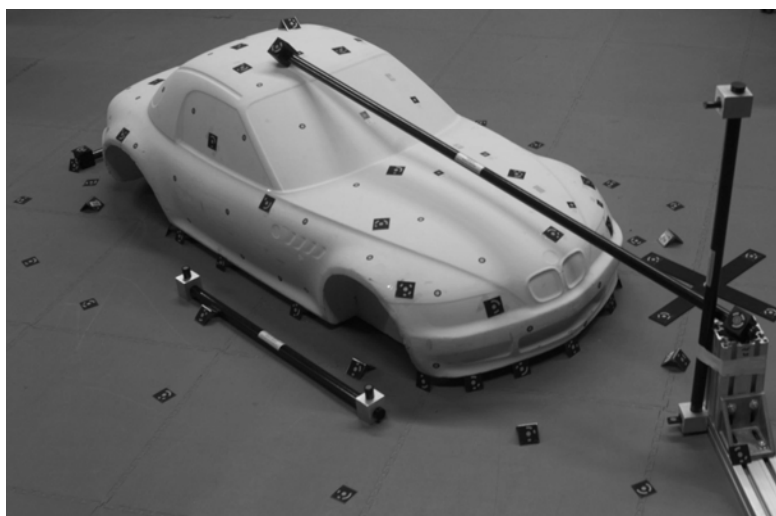


Abb. 2 Aufnahmeanordnung

Als Kamera diente zum einen die in vielen industriellen Anwendungen bewährte Kodak DCS 660 (3040 x 2008 Pixel, 28 mm Brennweite), zum anderen die wesentlich preiswertere Prosumer-Kamera Fuji FinePix S1 Pro (2304 x 1536 Pixel, 28 mm Brennweite - die hier angegebene Zahl der Bildelemente entspricht der realen Sensorauflösung; die durch Interpolation erreichbare Bildauflösung von 3040 x 2016 Pixel wurde nicht verwendet, da hierdurch die Messgenauigkeit nicht zunimmt). Die Fuji Kamera weist - bisherigen Untersuchungen zufolge (PRISKY, 2002) - gute Stabilität und Genauigkeit auf, ist mit den für 35 mm SLR-Kameras üblichen Objektiven einsetzbar und lässt - wie auch die Kodak Kamera - manuelle Einstellungen zu, die der Photogrammeter benötigt, damit die innere Orientierung der Kamera sich nicht durch automatische Funktionen verändert.

Bildmessung und Bündelausgleichung wurden mit der AICON DPA-Win Software (SCHNEIDER, 1996) durchgeführt. In diesem Programm wird ein automatisierter Messablauf realisiert, sofern eine ausreichende Anzahl codierter Marken in den Bildern erkennbar und messbar ist. Dann können auch uncodierte Marken automatisch zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise ist sehr vorteilhaft, wenn - wie hier - ein hochredundanter Bildverband vorliegt. Unvermeidbare Fehlmessungen werden an den stark überbestimmten Punkten automatisch aufgedeckt und im weiteren Verlauf als Ausreißer deaktiviert. Eine Kontrolle einzelner Messungen von Hand würde den Zeitbedarf erheblich steigern und so den Vorteil der automatischen Funktionen zunichte machen.

Die Bündeltriangulation des mit der Kodak DCS 660 aufgenommenen Bildverbandes ergab die 3D-Koordinaten der markierten Objektpunkte mit Standardabweichungen von $s_x = 0.012$ mm, $s_y = 0.013$ mm und $s_z = 0.011$ mm. Diese Werte zeigen die innere Genauigkeit nach der Ausgleichung und sind zu günstig geschätzt, vor allem auch wegen der Vielzahl der Strahlenschnitte pro Objektpunkt. Betrachtet man die im Netzwerk enthaltenen kalibrierten Maßstäbe als realistischere Indikatoren für die Objektgenauigkeit, so zeigen sie Abweichungen von 15 μ m bis 27 μ m gegenüber ihren Sollwerten, bei einer Genauigkeit der kalibrierten Ist-Längen von 20 μ m. Die Genauigkeit der Bildmessung (für die Kodak Kamera) betrug 0.37 μ m, entsprechend 0.04 Pixel. Mit der Fuji Kamera wurde eine Bildmessgenauigkeit von 0.47 μ m erreicht, mit daraus folgenden Standardabweichungen der Objektkoordinaten von $s_x = s_y = 0.017$ mm und $s_z = 0.015$ mm - dies bei einer geringeren Auflösung und einem etwas kleineren Sensor im Vergleich zur Kodak Kamera (und einem geringeren Preis!). Weitere Rechenversionen wurden mit variierenden Bild- und Punktzahlen durchgeführt (Resultate siehe Kap. 4).

4 Ergebnisse der Oberflächenerfassung

Für die Verknüpfung der einzelnen, mit dem Streifenprojektionssystem aufgenommenen Messfelder (Abb. 3 und 4) werden unterschiedliche Strategien verfolgt (ANDRÄ et al., 2002), abhängig auch von der Größe des erfassten Objekts und der erforderlichen Genauigkeit. Zum einen kann die Zuordnung direkt durch Anpassung überlappender Bereiche erfolgen. Bei nicht ausreichend strukturierter/texturierter Oberfläche können am Objekt angebrachte oder projizierte Marken unterstützend hinzutreten. Zum anderen wird, wie erwähnt, ein Netz von Referenzpunkten etabliert, auf die die einzelnen Messfelder transformiert werden. Diese Vorgehensweise ist vor allem für den Zusammenschluss einer größeren Zahl von Messfeldern zu empfehlen. Photogrammetrisch bestimmte Referenzpunkte können so die Genauigkeit der gesamten Messprozedur steigern.

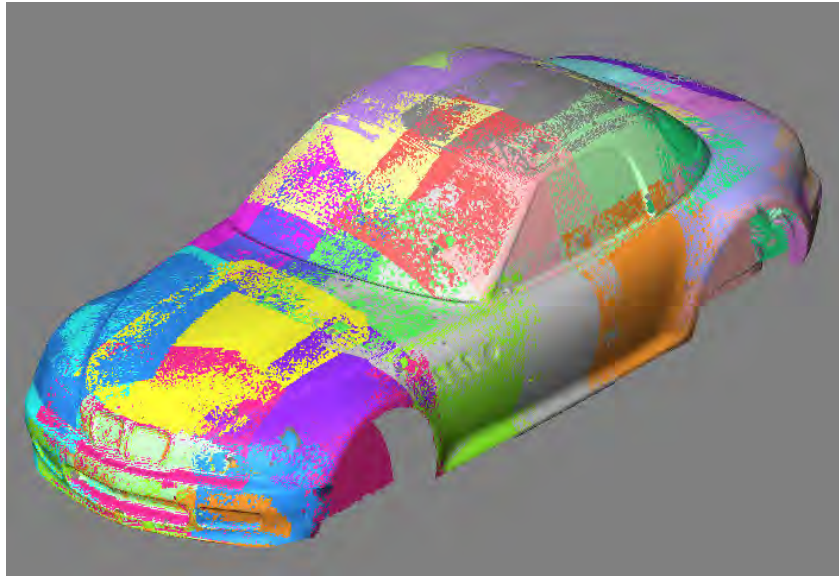


Abb. 3 Messfelder des Streifenprojektionssystems



Abb. 4 3D-Modell des Fahrzeug-Designmodells

Will man die vorgestellten Untersuchungen abschließend bewerten, so ergibt sich folgendes:

- Geräte und Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie sind geeignet, ein Netzwerk hochgenauer Referenzpunkte für die Verknüpfung von 3D-Punktwolken zu generieren, die mit einem Streifenprojektionssystem erzeugt werden.
- Eine sorgfältige Auswahl der Kamerastandorte ist erforderlich, um optimale Strahlenschnitte an den Referenzpunkten zu erhalten.
- Eine Erhöhung der Zahl der Bilder und der Objektpunkte steigert die Zuverlässigkeit des photogrammetrischen Netzwerks.
- Werden codierte retroreflektierende Marken zur Signalisierung des Objekts verwendet, so ist ein automatischer Datenfluss von den digitalen Bildern bis zu den 3D-Koordinaten der Referenzpunkte möglich.
- Hochauflösende digitale Profi-Kameras sind für die Punktbestimmung geeignet, wenn diese durch Bündelausgleichung konvergenter und redundanter Bildverbände mit inte-

grierter Simultankalibrierung geschieht. Eine geringere Genauigkeit wird erzielt, wenn preiswertere Kameras wie z.B. die Fuji S1 Pro benutzt werden.

- Durch Flächenmatching können einzelne, sich überlappende Messfelder des Streifenprojektionssystems ohne zusätzliche Information miteinander verknüpft werden.
- Bei größeren Objekten wird die Genauigkeit der gesamten Objekterfassung durch die Transformation der Messfelder auf die Referenzpunkte gesteigert.
- Die Qualität des resultierenden 3D-Modells ergibt sich aus dem Zusammenwirken beider Messtechniken, sie hängt sowohl von der Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung als auch von der des Streifenprojektionssystems ab.

4 Literaturverzeichnis

- ANDRÄ, P., STEINBICHLER, H., MAIDHOF, A., LAZAR, M., THOSS, F., 2002: COMET *VarioZoom* - A novel sensor concept for flexible optical 3-D coordinate measurement. - VDI-Berichte 1964, VDI-Verlag, Düsseldorf: 285-292.
- GÜHRING, J., BRENNER, C., BÖHM, J., FRITSCH, D., 2000: Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector. - Int. Arch. Photogrammetry & Rem. Sensing, Vol. 33/B5.1, Amsterdam: 327-338.
- HAU, TH., 1999: Adaption photogrammetrischer Verfahren zur flexiblen Orientierung und Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors. - PFG, 6/1999: 357-369.
- MALZ, R.W., 1996: "Free-flying" 3-d sensors for efficient close-range measurement and reverse engineering. - Int. Arch. Photogrammetry & Rem. Sensing, Vol. 31/B5, Wien: 336-346.
- MICHAELIS, M., 1997: 3D-Objekterfassung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion. - 16. Wiss-techn. Jahrestagung der DGPF, Publ. DGPF, Bd. 5, Berlin: 167-173.
- PRISKY, M., 2002: Erfassung von Freiformflächen mit Streifenprojektionsverfahren und Nahbereichsphotogrammetrie. - Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg: 101 S.
- RIECHMANN, W., THIELBEER, B., 1997: Hochaufgelöste Oberflächenerfassung durch Photogrammetrie und Streifenprojektion. - PFG, 3/1997: 155-164.
- SCHARSICH, P., PFEIFER, T., 1998: Aktive Mehrbildphotogrammetrie für die flächenhafte dreidimensionale Formerfassung. - 17. Wiss-techn. Jahrestagung der DGPF, Publ. DGPF, Bd. 6, Berlin: 279-286.
- SCHNEIDER, C.-T., 1996: DPA-Win - A PC based digital photogrammetric station for fast and flexible on-site measurement. - Int. Arch. Photogrammetry & Rem. Sensing, Vol. 31/B5, Wien: 530-533.