

KOMBINATION VON PHOTOGRAMMETRIE UND STREIFENPROJEKTION ZUR VERMESSUNG GROSSER OBJEKTE

Dr. Martin Michaelis
Daimler-Benz AG, Forschungszentrum Ulm
Germany

Kommission V, Arbeitsgruppe 2

KEY WORDS: Industrial, Technology, Metrology, Close_Range, Three-dimensional, CAD

ABSTRACT

In industrial applications there is often a demand for a fast 3D-digitization of an object. The 3D-data must be delivered to CAD-systems for further evaluations. Optical measuring devices, based on the principle of fringe projection, can deliver a complete coverage of 3D-data of an object. Because of the limited area of measurement there is a need for a precise composition of many measurement scenes for big objects. Informations needed for that purpose, like points in a reference coordinate system or orientation parameters of the measuring device are contributed by photogrammetry. A method is presented, which combines both measuring techniques, photogrammetry and fringe projection, in a well suited way. The efficiency of this method is tested, based on measurements of a car door.

KURZFASSUNG

Industrielle Anwendungen erfordern oft eine schnelle, lückenlose 3D-Vermessung von Objekten, die anschließend als CAD-Datensätze bereitgestellt werden müssen. Auf dem Prinzip der Streifenprojektion basierende optische Meßsysteme liefern hierfür flächendeckend 3D-Daten des Meßobjektes. Das begrenzte Meßvolumen dieser Systeme macht ein paßgerechtes Zusammenfügen vieler Meßaufnahmen für große Objekte erforderlich. Die hierzu notwendigen Informationen, wie Referenzpunkte in einem übergeordneten Koordinatensystem bzw. Orientierungsparameter für die Aufnahmestandorte liefert die Photogrammetrie. Es wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Photogrammetrie mit der Streifenprojektion in geeigneter Weise miteinander kombiniert. Die Effizienz des Verfahrens wird anhand von Messungen einer PKW-Tür nachgewiesen.

1. EINLEITUNG

Im industriellen Einsatzbereich werden die Photogrammetrie und die Streifenprojektion meistens als autonome Verfahren eingesetzt, ohne miteinander in Konkurrenz zu treten oder sich gegenseitig zu ergänzen. Dabei zeichnen sich beide Verfahren teilweise durch unterschiedliche Leistungsmerkmale aus. Gegenüber der photogrammetrischen Bestimmung einzelner Objektpunkte liefern die Verfahren der Streifenprojektion unmittelbar ein flächendeckendes, pixelsynchrones, digitales Höhenmodell (DHM) der Objekt Oberfläche. Dieses DHM kann aufgrund der bei der Streifenprojektion i.d.R. starren Aufnahmegeometrie in kartesische Koordinaten umgerechnet werden. Der dadurch entstehende unregelmäßige Punktehaufen dient dann oft als Input für die CAD-Welt, in der ganze Objektflächen durch sogenannte Best-Fit-Algorithmen in mathematisch beschreibbare Flächen umgewandelt, bzw. in ein CAD-Modell überführt werden. Diese CAD-Daten wiederum werden für die unterschiedlichsten Anwendungen, wie der Formprüfung von Modellen und Werkzeugen, für Design-Studien oder für die schnelle, fräsdaten gesteuerte Herstellung von Prototypen benötigt.

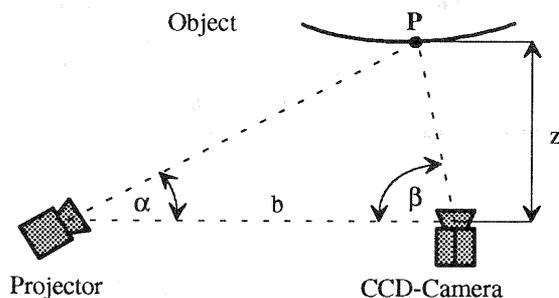
Sollen große Objektflächen zusammenhängend und hochgenau vermessen werden, wie z.B. die Karosserie eines Automobils, so ist die Streifenmeßtechnik auf sich allein gestellt, überfordert, da die unterschiedlichen Aufnahmepositionen relativ zum Objekt nicht bekannt sind und damit eine Verknüpfung der einzelnen Objektansichten nicht möglich ist. Die Positionierung des Streifenprojektionssystems über ein mechanisches Positioniersystem, z.B. in Form einer Koordinatenmeßmaschine, stellt aufgrund der platzraubenden und teuren Mechanik nur eine Übergangslösung zur großflächigen Objektvermessung dar. Hier ist der Einsatz der Photogrammetrie gefragt, die viele Aufnahmen als zusammenhängendes Bündel in einem Guß auswerten kann, und die neben den Objektkoordinaten u.a. noch die Aufnahmepositionen des Sensors liefert.

Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Vorzüge der Photogrammetrie mit den Vorteilen von Streifenprojektionsverfahren verbindet. Anhand einer konkreten Meßaufgabe, der flächendeckenden Vermessung einer Autotür, wird das Verfahren getestet.

2. BESCHREIBUNG DES VERFAHRENS

2.1 Prinzip der Streifenprojektion

Streifenprojektionsverfahren beruhen auf dem Prinzip der aktiven Triangulation. Ein Spezialprojektor bildet ein Gitter auf die Oberfläche des Meßobjektes ab, welches gleichzeitig von einer CCD-Kamera aufgenommen wird (Abb. 1). Entsprechend der Oberflächengestalt erscheint das Gitterbild verformt. Diese Streifenverformungen enthalten die für die folgende Rechnerauswertung notwendigen Informationen zur flächendeckenden Bestimmung der Objekttopographie. Kamera und Projektor haben dabei einen festen Abstand und einen konstanten Winkel zueinander. Bezüglich der Streifenpro-



$$z = b \cdot \frac{\tan \alpha \cdot \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

Fig. 1: Triangulation by fringe projection

jektion gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. Das wesentliche Merkmal von Verfahren nach dem sogenannten codierten Lichtansatz besteht in der zeitlich aufeinanderfolgenden Projektion mehrerer grauwertcodierter Streifenmuster in den Objektraum (Strutz et al., 1992; Riechmann, 1993). Dadurch können die Raumkoordinaten jedes Objektpunktes eindeutig bestimmt werden. Andere Verfahren nutzen nur ein einziges projiziertes Gitter, wobei die infolge der Objekttopographie auftretenden seitlichen Verschiebungen der Streifen als Phase gemessen werden (Dörband et al., 1995). Ausgehend von einem bekannten Referenzpunkt auf dem Objekt werden die den Phasenmeßwerten entsprechenden Höhendifferenzen aufaddiert.

2.2 Methode zur Verknüpfung der Meßszenen

Die Streifenmessung liefert flächendeckend 3D-Koordinaten für jede Meßszene. Die Photogrammetrie dient der Bestimmung von Verknüpfungspunkten (Targets) in einem übergeordneten Koordinatensystem. Zusätzliche Algorithmen ermöglichen die Verknüpfung der Resultate bzw. das eigentliche Zusammensetzen der gemessenen Einzelszenen für das gesamte Meßobjekt. Dieser Sach-

verhalt ist in Abb. 2 dokumentiert. Die CCD-Kamera des Streifenprojektionssystems nimmt ein Grauwertbild des in die Anfangsposition (I) gebrachten Meßobjektes (Prüfling) mit den darauf angebrachten Targets auf ('Bild I'). In der gleichen Position des Prüflings wird nun eine Streifenmessung durchgeführt. Das daraus resultierende Phasenbild ('Phase I') wird durch sogenanntes 'phase-unwrapping' in ein pixelsynchrones Höhenbild ('Zeta I') umgerechnet. Die in einer zentralperspektiven Geometrie vorliegenden Daten werden anschließend unter Berücksichtigung der Kalibrationsdaten des Meßsystems in ein lokales, kartesisches Modellkoordinatensystem transformiert ('xyz-I'). Danach wird der Prüfling in die nächste Position (II) gebracht, und es wird wie oben beschrieben

verfahren. Als nächstes erfolgt die Aufnahme in Position III usw.. Für jede Position liegen damit jeweils ein Grauwertbild und ein 3D-Punktehaufen in einem lokalen Modellkoordinatensystem vor. Die zur Verknüpfung der verschiedenen Ansichten notwendigen Targets müssen als nächstes lokalisiert, gemessen und die 3D-Koordinaten der Target-Zentren ermittelt werden. Wie bei der photogrammetrischen Bildmessung erfolgt die Messung der Targets automatisiert im jeweiligen Grauwertbild mit Hilfe eines 'Template-Matching'-Verfahrens. Ist die Subpixellage des Targets im Bild ermittelt, so können die entsprechenden 3D-Koordinaten aus den Modellkoordinaten (xyz) der gleichen Ansicht ermittelt werden. Dies geschieht mit einer Kombination aus Look-Up-Table (LUT) - Technik plus bilinearer Interpolation. Die im xyz-Punktehaufen mitgeführten Pixelkoordinaten aller Meßpunkte stellen die LUT dar. Die 3D-Koordinaten der 4 unmittelbaren Nachbarn des Targetzentrums dienen als Input für die bilineare Interpolation zur Berechnung der gesuchten xyz-Koordinaten. Die Koordinaten der Targets liegen nun sowohl im Modellkoordinatensystem der jeweiligen Einzelszene (Streifenprojektion) als auch in Form von XYZ-Koordinaten im übergeordneten Referenzsystem

(Photogrammetrie) vor. Damit ist die Voraussetzung zur Transformation der flächendeckend vorliegenden Einzelansichten in die Gesamtobjektansicht geschaffen. Eine räumliche Ähnlichkeitstransformation mit mindestens 3 Paßpunkten (Targets) liefert die entsprechenden Parameter zur Transformation. Im Anschluß an die Transformation erfolgt eine a-posteriori-Korrektur der ermittelten Koordinaten. Hierbei werden die Residuen in den Paßpunkten (Targets) genutzt, um ein Korrekturmodell zu generieren (Albertz et al., 1989). Dieses besteht aus Polynomfunktionen zweiten Grades, welche getrennt für jede Koordinatenrichtung berechnet und anschließend als Verbesserung an den transformierten Modellkoordinaten angebracht werden.

3.2 Eingesetzte Meßsysteme

Streifenprojektionssystem: Die Streifenmessung erfolgte mit einem System, welches auf dem Meßprinzip der Streifenprojektion mit nur einem Gitter basiert (siehe Kap. 2.1). Tabelle 1 zeigt die technischen Daten.

CCD-Flächensensor:	480 x 480 Pixel
Meßbereich-lateral:	400 mm x 400 mm
Meßbereich-Tiefe:	70 mm
Abstand Meßobjekt:	~ 1000 mm
Auflösung-lateral:	0.8 mm
Meßgenauigk.-Tiefe:	+/- 0.01 mm

Table 1: Technical data of fringe projection system

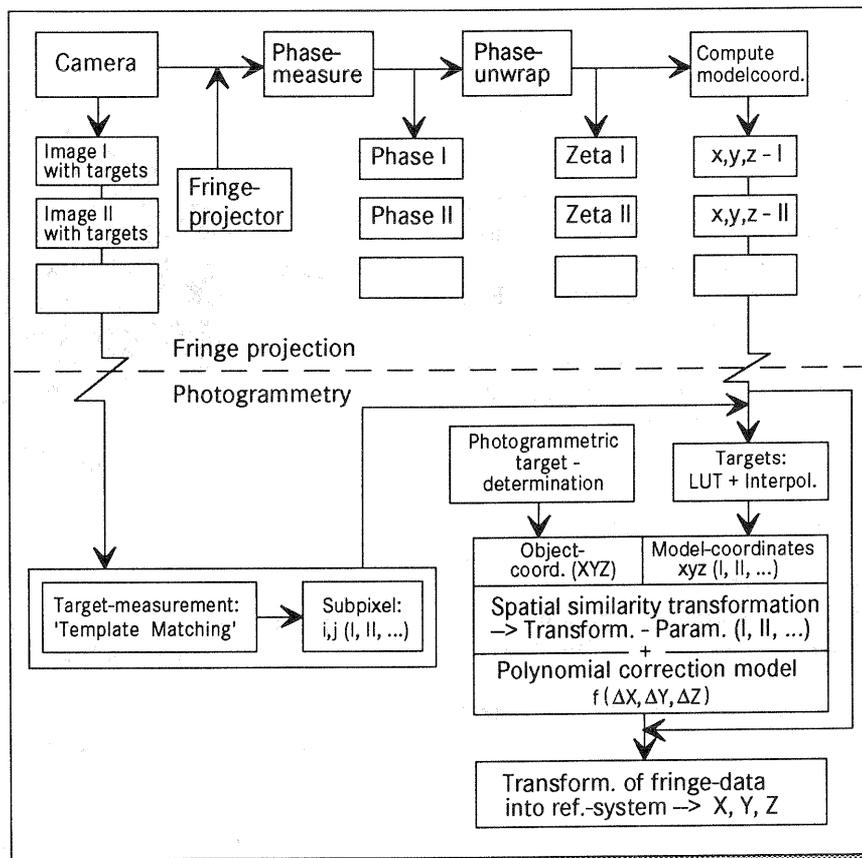


Fig. 2: Composition of fringe-scenes by combination of photogrammetry and fringe projection

3. AUFNAHME UND AUSWERTUNG

3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In der konkret vorliegenden Meßaufgabe sollte eine Autotür der Größe 110 cm x 60 cm flächendeckend vermessen und als CAD-Datensatz bereitgestellt werden. Dieses Meßobjekt ist als groß einzustufen, da die auf dem Markt erhältlichen Streifenmeßsysteme nur ein maximales Meßfeld von 40 cm x 40 cm erreichen.

Photogrammetriesystem: Zur photogrammetrischen Bestimmung der Targets im Objektkoordinatensystem wurde ein kommerzielles Photogrammetriesystem eingesetzt (Beyer et al., 1996). Zur Aufnahme diente eine Kodak DCS420 - Kamera mit 18 mm - Objektiv. Ein zentrisch zur optischen Achse angebrachter Ringblitz stellt sicher, daß nur Licht aus Richtung des Objektivs reflektiert wird und Fremdlichtquellen damit weitestgehend ohne Einfluß sind. Im Offline-Betrieb dieser Kamera (Auflösung: 1536 x 1024 Pixel) können bis zu

82 Bilder auf einer in die Kamera integrierten PCMCIA-Disk gespeichert werden. Die Messung der abgebildeten Targets erfolgt mit Hilfe eines robusten und schnellen 'Template Matching' Verfahrens. Die Bündelausgleichung schließt eine Simultankalibration der verwendeten Kamera ein (Wester-Ebbinghaus, 1991).

3.3 Photogrammetrische Punktbestimmung

Vorarbeiten: Vor Durchführung der photogrammetrischen Aufnahme wurde der Prüfling mit kreisrunden, retroreflektierenden Marken (Retrotargets) versehen. Die 49 Targets wurden gleichmäßig verteilt als 7 x 7 Raster auf der Tür angebracht. Zur Automatisierung des photogrammetrischen Meßprozesses dienten 4 zusätzliche codierte Targets. Die Definition des Objektkoordinatensystems bzw. des Maßstabes erfolgte über ein kalibriertes Koordinatenkreuz aus Invar mit darauf angebrachten Retrotargets. Das Kreuz wurde vor dem Prüfling positioniert.

Aufnahme: Die Tür wurde von jeweils 5 Positionen aus dem Stand und 5 Positionen aus der Hocke aufgenommen. In jeder Position wurde die Kamera zusätzlich um 90° verkantet, um sie im Zuge der nachfolgenden Bündelausgleichung simultan zu kalibrieren. Das Maßstabskreuz wurde nach der vierten Aufnahme entfernt, um Verdeckungen von Targets auf der Tür zu vermeiden. Insgesamt wurden 20 Bilder aufgenommen.

Auswertung: Die Orientierung der ersten 4 Aufnahmen erfolgte über das abgebildete Maßstabskreuz. Ein räumlicher Vorwärtsschnitt lieferte Näherungswerte für die Objektkoordinaten der übrigen Targets. Die Orientierungen aller weiteren Bilder wurden mit Hilfe der 4 codierten Targets berechnet. Das für die Bildmessung eingesetzte Template Matching - Verfahren lieferte Meßgenauigkeiten zwischen 1/30 Pixel bis 1/80 Pixel. Die abschließende Bündelausgleichung ergab Genauigkeiten im Objektraum von 15-20 µm lateral und 25 µm in der Tiefe.

3.4 Messung mit Streifenprojektionssystem

Die Meßaufnahme der Tür mit den darauf befindlichen Retrotargets stellte besondere Anforderungen an die Objektbeleuchtung. Zur Projektion des Streifenmusters wird standardmäßig eine Xenon-Hochleistungslichtquelle (300 Watt) verwendet. Die Grauwertbildaufnahme der Retrotargets erfordert jedoch eine Lichtquelle in unmittelbarer Nähe der CCD-Kamera. Hierzu wurde eigens ein LED-Leuchtring konstruiert, der zentrisch zur Objektivachse befestigt, für eine gleichmäßige Ausleuchtung der Retrotargets ohne störende Reflexionen an der Objektoberfläche sorgt. Der Meßablauf gestaltete sich wie folgt: Das Meßobjekt wurde zunächst in die erste

Position gebracht. Es erfolgte eine Streifenmessung unter Zuhilfenahme der Projektorbeleuchtung. Danach wurde der Projektor ausgeschaltet, die LED-Beleuchtung eingeschaltet, und es wurde in der gleichen Position ein Grauwertbild (ohne Streifen) aufgenommen. Danach wurde das Meßobjekt in die nächste Position verschoben und die oben beschriebene Aufnahme-prozedur wiederholt. Nach Abschluß aller Meßaufnahmen lagen pro Position ein Grauwertbild und ein pixelsynchrones Höhenbild (Zeta) vor. Abb. 3 zeigt ein solches Höhenbild der PKW-Tür aus der Streifenprojektionsmessung. Mit Hilfe der Kalibrationsdaten des Streifenmeßsystems wurden pro Meßansicht die xyz-Koordinaten im jeweils lokalen Modellkoordinatensystem berechnet.

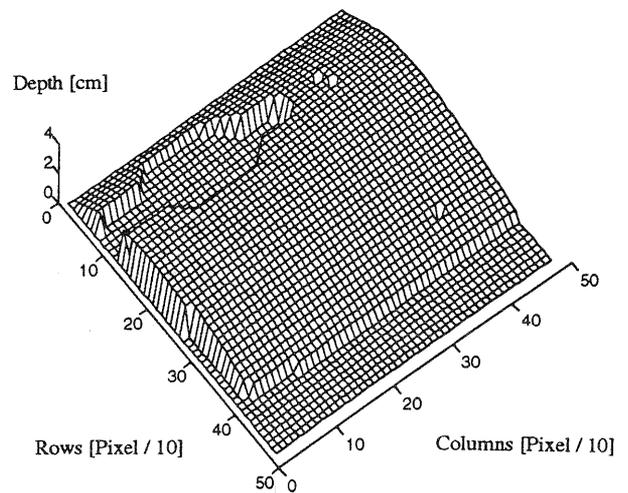


Fig. 3: 3D-view of a car door after fringe projection (Field of View = 40 cm x 40 cm)

3.5 Verknüpfung der Meßszenen

Absolut-Genauigkeit: Die Genauigkeiten der Targetmessung (Template Matching) in den Grauwertbildern des Streifenmeßsystems ergaben Werte zwischen 1/10 und 1/20 Pixel. Das entspricht 0.04 mm - 0.08 mm im Objektraum. Die Genauigkeiten nach der räumlichen Ähnlichkeitstransformation der Einzelmodelle in das Objektkoordinatensystem lassen sich anhand der transformierten Targetkoordinaten im Vergleich zu den photogrammetrisch bestimmten Referenzwerten ermitteln. Das beschriebene a-posteriori-Korrekturmodell wurde hierbei bereits berücksichtigt. Die Standardabweichungen in lateraler Richtung ($0.31 \text{ mm} < sX(sY) < 0.55 \text{ mm}$) sowie in Z-Richtung ($0.10 \text{ mm} < sZ < 0.15 \text{ mm}$) ergeben Punktgenauigkeiten im Objektraum, die im Subpixelbereich der lateralen Auflösung des Streifenprojektionssystems liegen. Zur Berechnung der Parameter

für das Korrekturmodell sind mindestens 6 Paßpunkte erforderlich, 9 gleichmäßig über die jeweilige Meßszene verteilte Targets (3 oben, 3 Mitte, 3 unten) sind jedoch empfehlenswert.

Relativ-Genauigkeit: Mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Verfahren wurden 3 Meßszenen mit insgesamt etwa 500 000 Meßpunkten zu einer Gesamtszene zusammengesetzt. Aufgrund der sich überlappenden Einzelansichten - die Überlappung war zu Kontrollzwecken vorgesehen - ergaben sich, bezogen auf die doppelt abgebildeten Targets in den Überlappungszonen, relative Abweichungen von $0.1 \text{ mm} < dX(dY) < 0.5 \text{ mm}$ lateral und $0.01 \text{ mm} < dZ < 0.04 \text{ mm}$ in der Tiefe. Die relative Punktgenauigkeit benachbarter Meßszenen liegt damit auch hier im Subpixelbereich des Streifenprojektionssystems.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die flächendeckende 3D-Erfassung großer Objekte wurde mittels eines Verfahrens, welches die Photogrammetrie mit der Streifenprojektion verbindet, realisiert und vorgestellt. Die Aufgabe der Photogrammetrie besteht hierbei in der Bestimmung ausgewählter Punkte des flächendeckend zu digitalisierenden Objektes in einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem. Die Messung der gleichen Objektpunkte mit dem Streifenprojektionssystem ermöglicht eine Verknüpfung der Auswertungsergebnisse aus beiden Aufnahmeverfahren über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation. Daran gekoppelt ist ein Korrekturmodell, welches Restklaffungen in Paßpunkten getrennt für jede Koordinatenrichtung berücksichtigt. Die Genauigkeit, mit der mehrere Ansichten aus der Streifenprojektion zusammengesetzt werden können, orientiert sich an der Genauigkeit aus der photogrammetrischen Punktbestimmung. Das Resultat nach Zusammensetzen einzelner Meßszenen aus der Streifenprojektion kann also nicht genauer sein als die photogrammetrische Auswertung an Genauigkeit vorgibt. Andererseits kann die Genauigkeit auch nicht wesentlich besser sein als das Streifenprojektionssystem an Auflösung im Objektraum bietet. Im gezeigten Anwendungsbeispiel (PKW-Tür) lag die Genauigkeit, mit der Meßszenen aus der Streifenprojektion zusammengesetzt wurden, im angestrebten Subpixelbereich des hier verwendeten Streifenprojektionssystems.

Das vorgestellte Verfahren ist modular aufgebaut und erlaubt damit die Kombination eines beliebigen Industrie-Photogrammetriesystems mit einem beliebigen Streifenprojektionssystem. Damit ist die Voraussetzung für eine schnelle und flexible, flächendeckende 3D-Erfassung großer Objekte geschaffen.

Literatur

Albertz, J., Kreiling, W., 1989. Photogrammetrisches Taschenbuch, Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Beyer, H.A., Uffenkamp, V., 1996. Quality control in industry with digital photogrammetry. ABW-Workshop, Esslingen, 1/96.

Dörband, B., Köthe, R., Zilker, A., 1995. Streifenprojektion prüft in Echtzeit mit $5 \mu\text{m}$ Auflösung. Werkstatt und Betrieb, 3/95.

Riechmann, W., 1993. Photogrammetrie in der Automobilindustrie. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 2/93.

Strutz, T., Riechmann, W., Stahs, T., 1992. Tiefendatengewinnung mit dem codierten Lichtansatz - Einsatzmöglichkeiten in der Automobilindustrie. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berichtsband 29.

Wester-Ebbinghaus, W., 1991. Photogrammetrische Systeme in der industriellen Meßtechnik. 26. DVW-Seminar, München, 3/91.