

Erfassung und Interpretation von dichten Oberflächendaten

JAN BÖHM *

Zusammenfassung: Moderne Streifenprojektionssysteme sind in der Lage innerhalb kürzester Zeit Oberflächen dicht zu erfassen. Die Anzahl der erfassten Punkte geht dabei in die Hunderttausende, selbst Millionen von Punkte sind möglich. Spezielle Verfahren der 3D Bildverarbeitung sind notwendig um diese Daten zu verarbeiten und zu interpretieren. Der Beitrag beschreibt das am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelte Streifenprojektionssystem zur photogrammetrischen Erfassung von dichten Oberflächendaten und die aktuellen Arbeiten zur Verarbeitung und Interpretation. Die Anwendungen liegen vor allem in der industriellen Inspektion, umfassen jedoch auch Bereiche wie Denkmalspflege und Medizin.

1 Einleitung

Es stehen heute zahlreiche Alternativen zur Erfassung dichter Oberflächen zur Verfügung. Die heute gebräuchlichen Verfahren lassen sich grob in triangulierende und laufzeitmessende Verfahren unterteilen. Zu ersteren zählen zum Beispiel das Stereo-Matching, Laser-Triangulation und viele andere. Den meisten Systemen zur dichten Erfassung ist gemein, dass das Messergebnis in einem Raster vorliegt, das bestimmt wird entweder durch einen rasterförmigen Sensor zum Beispiel eine CCD Kamera, eine mechanische Komponente zum Beispiel einen Kreuztisch oder einer Kombination aus Sensor und mechanischer Komponente zum Beispiel eine Laserlinie und ein Drehtisch. Dies unterscheidet die dichte Erfassung grundsätzlich von Verfahren, die auf manueller Auswertung oder auf Merkmalsoperatoren basieren. Dort liegt das Ergebnis oft in einer ungeordneten Punktwolke vor und muss nachträglich interpoliert oder trianguliert werden. Die Anordnung der Punkte in einem Raster hat den Vorteil, dass bereits eine Ordnungsinformation vorliegt. Diese Ordnungsinformation kann in den Verarbeitungsschritten zu einer beschleunigten Prozessierung genutzt werden.

2 Streifenprojektion zur Erfassung von dichten Oberflächendaten

Streifenprojektions-Systeme gehören sicherlich zu den populärsten Sensoren zur dichten Oberflächenerfassung. Zahlreiche kommerzielle Realisierungen des prinzipiellen Verfahrens sind heute auf dem Markt, zum Beispiel von ABW, Breuckmann, GOM, Steinbichler oder Imetric. Gegenüber den vorher erwähnten Alternativen zeichnet sich die Streifenprojektion durch ihre Zuverlässigkeit, Robustheit gegenüber der Oberflächentextur, sowie ihre Geschwindigkeit aus. Das heißt, anders als bei shape-from-x Verfahren können auch Objekte mit starken Sprüngen in der Oberfläche und großer Ausdehnung in Aufnahme­richtung zuverlässig erfasst

*Dipl.-Inform. M.Sc. Jan Böhm, jan.boehm@ifp.uni-stuttgart.de, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24, 70174 Stuttgart

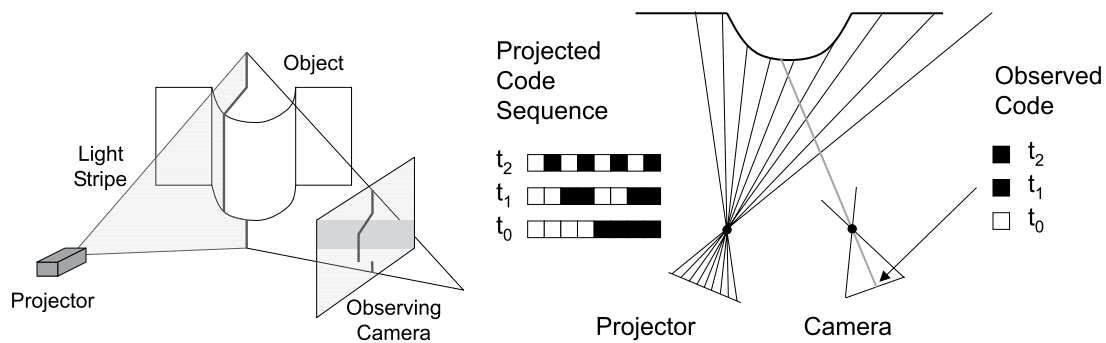


Abb. 1: Das Prinzip des Lichtschnitts und des codierten Lichtansatzes mit einer Kamera und einem Projektor.

werden. Mit einem Streifenprojektor können selbst Objekte ohne jegliche Textur erfasst werden, dies ist bei Stereo-Matching nicht möglich, außerdem ist die Streifenprojektion wesentlich schneller als ein Matching. Dies trifft mit Sicherheit auch auf Laser-Scanner Systeme zu, jedoch sind Streifenprojektoren in der Regel die wesentlich kostengünstigere Alternative.

Ohne auf die Details einzelner Implementierungen eingehen zu können, sollen im Folgende die Grundzüge der Streifenprojektionstechnik nach dem codierten Lichtansatz kurz dargestellt werden (ALTSCHULER ET AL. 1979). Die Streifenprojektion basiert auf dem Lichtschnittverfahren, wie es in Abbildung 1 angedeutet ist. Eine einzelne Linie wird auf die Objektoberfläche projiziert und unter einem anderen Winkel von einer Kamera beobachtet. Die Deformation der Linie ergibt die Parallaxen und somit die dreidimensionale Form entlang der Linie. Um eine Oberfläche dicht zu erfassen muss ein Vielzahl von Linien in dichten Abständen projiziert werden. Um dennoch die Eindeutigkeit zu gewährleisten werden die Linien nicht gleichzeitig sondern nach einem bestimmten Verfahren in zeitlicher Folge gestaffelt als binäres Muster projiziert. Das hierfür von nahezu allen Systemen verwendete Verfahren ist die Gray-Code Sequenz. Mit der Gray-Code Sequenz müssen für n Linien lediglich ldn Muster auf das Objekt projiziert werden (siehe Abbildung 2).

Die Gray-Code Sequenz löst die Korrespondenz zwischen Projektor-Koordinaten und Kamera-Koordinaten jedoch nur grob auf Pixelebene. Um Subpixel-Genauigkeit zu erreichen muss eine weitere Muster-Sequenz projiziert werden. Bisherige Systeme verwenden hierfür den Phasenshift (siehe Abbildung 2). Zwei Nachteile des Phasenshift-Verfahrens sind anzumerken. Zum einen ist die Annahme einer sinusförmigen Abbildung des Streifenmusters auf dem Sensor bei einem rasterbasierten Projektionssystem zunächst nicht erfüllt. Dies führt zu deutlich nachweisbaren Messfehlern. Die Sinusform des Streifenmusters muss erst erzeugt werden. Dies kann zum einen durch ein gezieltes 'Unschärf'-Stellen der Projektionseinheit erfolgen. Der Nachteil hierbei ist, dass diese Unschärfe nur in einem bestimmten Abstand des Objekts vom Projektor das gewünschte Ergebnis erzielt. Variiert der Abstand der Objektoberfläche stark in Aufnahme-richtung, dann wird das Streifenmuster nur in manchen Bereichen des Objekt sinusförmig abgebildet, in anderen nicht. Eine zweite Möglichkeit zur Erzeugung sinusförmiger Muster aus Raster-Projektoren ist die Anbringung optischer (Tiefpass)-Filter vor dem Projektor. Dies ist jedoch nur in einer Streifenrichtung möglich, so dass keine Kreuz-Projektion mehr erfolgen kann.

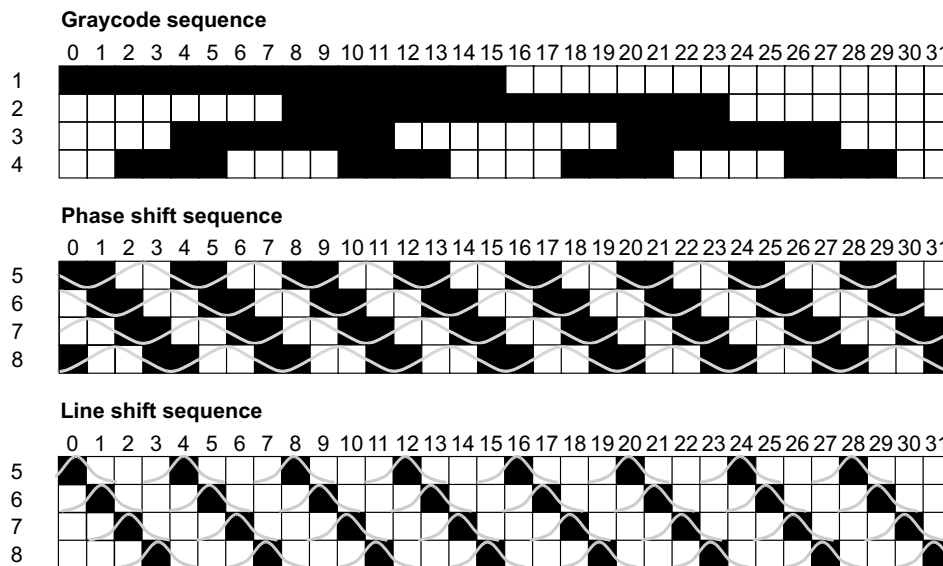


Abb. 2: Die Gray-Code Sequenz und die beiden Alternativen zur Subpixel Bestimmung, Phasenshift und Line-shift.

Ein weiterer Nachteil des Phasenshift-Verfahrens betrifft die Auswertung der Korrespondenz eines Kamerapixels zu einem Projektorstreifen. Beim Phasenshift wird die ganzzahlige Pixel-Koordinate der Kamera zu einer Subpixel-Koordinate des Projektors in Beziehung gesetzt. Beobachten mehrere Kameras dieselbe Streifensequenz, so kann keine direkte Pixel-zu-Pixel Korrespondenz zwischen den beteiligten Kameras aufgebaut werden.

2.1 Line-shift Verfahren

Um diesen Nachteilen des Phasenshifts zu begegnen wurde am Institut für Photogrammetrie von J. Gühring (GÜHRING ET AL. 2000) ein neues Verfahren für die Durchführung und Auswertung von Messungen nach dem codierten Lichtansatz entwickelt. Das neue Line-shift Verfahren basiert nicht mehr auf der Annahme einer sinusförmigen Abbildung des Streifenmuster. Stattdessen wird getrennt für jede projizierte Linie das Zentrum im Bild bestimmt (siehe Abbildung 2). Durch das neue Verfahren werden ganzzahlige Projektorkoordinaten mit Subpixel-Koordinaten der Kameras verknüpft. Dies ermöglicht die direkte Verknüpfung von Bildmessungen mehrerer Kameras, die dieselbe Streifensequenz beobachten. Sind mehrere Kameras an der Messung beteiligt führt dies zu einer Steigerung der Redundanz und somit zu zuverlässigeren und genaueren Resultaten. Ein weiterer Vorteil der neuen Methode ist die verbesserte Kompensation von Reflektivitätsunterschieden in der Objektoberfläche.

2.2 Photogrammetrische Prozessierung

Besitzt der Projektor die Möglichkeit das Streifen-Muster sowohl horizontal als auch vertikal zu projizieren, so kann der Projektor als inverse Kamera modelliert werden. Das heißt, die in der Photogrammetrie üblichen Verfahren zur Kalibrierung und Berechnung von räumlichen Koordinaten können analog auf den Projektor angewandt werden. Für den Projektor wer-

den die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bestimmt, außerdem werden noch die zusätzlichen Parameter wie Radialverzeichnung etc. bestimmt (BRENNER ET AL. 1999). Dieses Vorgehen liefert exzellente Resultate, wenn ein geometrisch stabil aufgebauter Projektor in Kombination mit einer Kamera eingesetzt wird.

Für geometrisch weniger stabile Projektionseinheiten ist eine Kombination mit mehreren Kameras vorzuziehen, bei der die Koordinaten des Projektors nicht in die Berechnung der räumlichen Koordinaten einbezogen werden. Daher muss der Projektor nicht kalibriert werden. Stattdessen wird die Streifen-Sequenz nur dazu verwendet die Korrespondenz zwischen den beteiligten Kameras zu lösen.

Die Photogrammetrische Kalibrierung und Prozessierung hat gegenüber der häufig anzutreffenden Methode der direkten Kalibrierung den Vorteil, dass keine hochgenaue Kalibriereinheit, zum Beispiel eine Referenzebene und ein Verschiebetisch, benötigt wird. Zudem liegen die Parameter der äußeren und inneren Orientierung explizit vor und behalten ihre Gültigkeit auch außerhalb des ursprünglichen Kalibriervolumens. Die Residuen und die Kovarianz Matrizen, die auch bei der Auswertung anfallen, erlauben eine gute Selbstdiagnose des Systems.

Die oben beschriebenen Algorithmen und Verfahren wurden in mehreren Aufbauten realisiert und getestet. In einem Aufbau mit einem ABW 640 Projektor und einer hochauflösenden Digitalkamera (Abbildung 3 Links) kann auf einer Fläche von $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ein Raster von 640 auf 640 Punkten erzeugt werden. Dies entspricht in etwa einer Auflösung von $0,3 \text{ mm}$ am Objekt. In einem Ebenheits-Test an einer Referenzebene, wie er in ähnlicher Weise auch für die Abnahme- und Überwachungsrichtlinien optischer 3D-Sensoren vorgeschlagen wurde, erzielt das System eine Ebenheit von $0,031 \text{ mm}$ bei einer maximalen Abweichung von $0,174 \text{ mm}$.

Ein weiteres Beispiel ist die Integration eines Streifenprojektions-System in einer Multi-Sensor Mess-Maschine (BÖHM ET AL. 2001). Die Maschine, konzipiert für den automatisierten Messvorgang industrieller Teile, trägt mehrere Sensor-Plattformen, darunter eine Stereokamera mit einer Basis von ca. 300 mm (Abbildung 3 Mitte). Diese Stereo-Kamera wurde mit einem LCD-Projektor zu einem dicht messenden 3D-Sensor kombiniert. Durch die Aktorik der Maschine kann die Stereo-Kamera automatisiert und optimal zum Objekt positioniert werden.

3 Interpretation von dichten Oberflächendaten

Das vorgestellte System zur Erfassung von dichten Oberflächendaten liefert eine dichte Punktwolke in einer Rasteranordnung. Diese Daten sind direkt geeignet für eine Visualisierung. Eine solche Visualisierung kann in bestimmten Anwendungen bereits das Endziel sein. Für die Ableitung von Messergebnissen im Bereich der industriellen Anwendungen muss die Punktwolke jedoch noch weiteren Verarbeitungsschritten unterzogen werden.

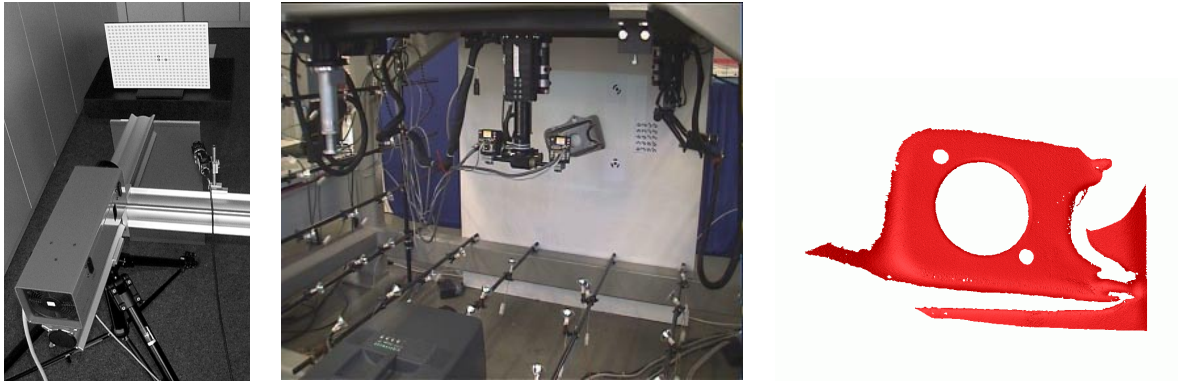


Abb. 3: Links: Labor Aufbau, Mitte: Multi-Sensor Mess-Maschine, Rechts: Datensatz, wie er mit dem mittleren Aufbau erzeugt wurde in schattierter Darstellung.

3.1 Vorverarbeitung

Durch die Anordnung der Punktwolke in Form einer Matrix, ist es möglich alle aus der Bildverarbeitung bekannten Operatoren in nahezu unveränderter Form auch auf das Ergebnis einer 3D Messung anzuwenden. Dies gilt insbesondere für die Operatoren zur Vorverarbeitung, also zum Beispiel Glättungs-Operatoren. Der Einsatz von Glättungs-Filtern findet häufig statt, wenn maskenbasierte Verfahren in der Weiterverarbeitung zum Einsatz kommen. Die Glättung füllt eventuell vorhandene Lücken in der Matrix auf, die anderenfalls zu Fehlern in den Berechnungen führen würden.

Auch einfache Operatoren zur Merkmalsextraktion wie zum Beispiel Kantendetektoren können auf 3D-Daten angewandt werden. Diese einfachen Operatoren führen jedoch nur zum Erfolg, wenn die Oberfläche starke Diskontinuitäten aufweist. Insbesondere bei gekrümmten Flächen mit stetigen Übergängen ist es notwendig auf flächenbasierte Merkmale, wie sie im nächsten Abschnitt erläutert werden, überzugehen.

3.2 Differential-geometrische Merkmale

Sind für einen beliebigen Punkt einer Oberfläche der Normalenvektor N und die ersten und zweiten Ableitungen bekannt, so können für diesen Punkt nach den bekannten Formeln (1) die minimale und maximale beziehungsweise die Mittlere und die Gaußsche Krümmung (2) berechnet werden (DO CARMO 1976). Die Mittlere und die Gaußsche Krümmung sind auf Grund ihrer Rotations- und Translations-Invarianz ein wichtiges und beliebtes Merkmal räumlicher Flächen bei vielen Aufgabenstellung der Computer Vision, insbesondere bei der Segmentierung.

Mehrere Schemata zur Berechnung der Krümmungseigenschaften einer Oberfläche aus einer Punktwolke sind in der Literatur vorgeschlagen worden. Einige Techniken wurden speziell für triangulierte Flächen entwickelt. Diese Techniken verwenden jedoch meist nur einen sehr kleinen Nachbarschafts-Bereich um den zu untersuchenden Punkt, und liefern daher unzuverlässige Resultate. Speziell im Bezug auf Daten, die aus Streifenprojektions-Systemen gewonnen wurden, sind Methoden interessant, die von einer rasterförmigen Organisation der

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{x}_u \mathbf{x}_u & F &= \mathbf{x}_u \mathbf{x}_v & G &= \mathbf{x}_v \mathbf{x}_v \\ L &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{uu} & M &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{uv} & N &= \mathbf{N} \mathbf{x}_{vv} \end{aligned} \quad (1)$$

$$H = \frac{EN+GL-2FM}{2(EG-F^2)} \quad K = \frac{LN-M^2}{EG-F^2} \quad (2)$$

$$z = f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (3)$$

Abb. 4: Formeln für die Berechnung der Krümmungen.

Punkte ausgehen.

Die einfachste Möglichkeit ist es, mit Hilfe einer Faltungs-Operation direkt die ersten und zweiten Ableitungen der Oberfläche zu berechnen, die für die Herleitung der Krümmungen benutzt werden. Jedoch sind besonders die zweiten Ableitungen sehr empfindlich gegen Rauschen. Zuverlässigere Resultate können erzielt werden indem eine Polynom-Fläche in die Umgebung des Punktes durch Kleinste-Quadrate-Methoden eingepasst wird. Üblicherweise wird hierfür ein explizites bivariates Polynom zweiter Ordnung angesetzt (3). Aus den Koeffizienten des Polynoms können die Ableitungen berechnet werden. Die Berechnungs-Ergebnisse werden jeweils für das Zentrums-Pixel der Maske gespeichert. Liegen nach üblicher Konvention x- und y-Achse in der Bildebene so lautet bei einem Polynom $z = f(x, y)$ das Minimierungskriterium $\sum (f(x_i, y_i) - z_i)^2$. Die Residuen liegen also entlang der z-Achse und nicht unbedingt senkrecht zur Oberfläche, das heißt sie entsprechen nicht dem geometrischen Abstand. Verschiebt man das Eingangsbild erhält man für jeden Pixel die Ableitungen und den Normalenvektor und kann somit die Krümmungen berechnen.

3.3 Modellgestützte Segmentierung

Nachdem für jedes Pixel die Krümmungs-Eigenschaften bekannt sind, kann eine Gruppierung der Pixel zu Regionen ähnlicher Krümmung erfolgen. Klassische Klassifikations-Schemata sind bekannt, nach denen die Pixel in ebene, konvex oder konkav gekrümmte Regionen eingeteilt werden. J.P. Besel (BESL 1988) entwickelte ein Klassifikations-Schema das zwischen acht verschiedenen Typen unterscheidet, je nach dem Vorzeichen der Mittleren- und der Gaußschen Krümmung.

Hat man jedoch durch eine zuverlässige Datenerfassung und erweiterte Berechnungsmethoden zuverlässige Werte für die Krümmungseigenschaften, kann eine genauere Unterteilung der Regionen nach ihrem jeweiligen Krümmungswert erfolgen. Hierfür wurde vom Autor ein modellbasiertes Segmentierungs-Verfahren entwickelt (BÖHM ET AL. 2000), welches die Krümmungsinformationen eines vorgegebenen Modells in den Segmentierungsprozess einfließen lässt. Die Modellvorgaben können zum Beispiel vollautomatisch aus einem CAD Modell abgeleitet werden. Ein CAD Modell erlaubt es durch die mathematische Beschreibung der Flächen für jeden beliebigen Punkt exakt die Krümmungseigenschaften zu berechnen. Diese Krümmungseigenschaften werden pro Fläche berechnet und bilden im Parameterraum aufgespannt durch die Mittlere und die Gaußschen Krümmung die Modell-Klassen. In einem Nächste-Nachbarschaft Klassifikations-Verfahren werden die einzelnen Pixel des Distanzbil-

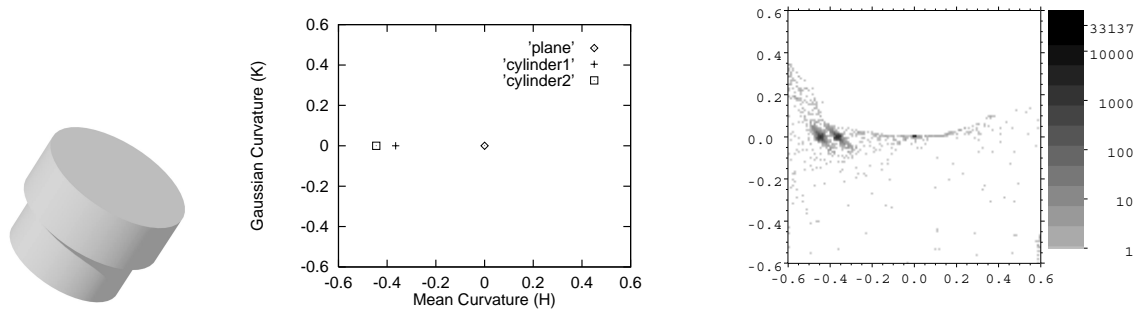


Abb. 5: Ein einfaches Test-Teil “Adapter” mit drei Flächen: Ebene, Zylinder1 und Zylinder2. Die Modell-Klassen abgeleitet aus dem CAD-Modell sind dem Krümmungshistogramm der 3D-Messdaten gegenübergestellt.

des diesen Modell-Klassen zugeordnet. Abbildung 5 zeigt die Gegenüberstellung der aus einem CAD Modell abgeleiteten Modell-Klassen und des Krümmungshistogramms eines Distanzbildes desselben Objekts. Deutlich sind die zu den Klassen korrespondierenden Zentren des Histogramms zu erkennen.

3.4 Merkmalszuordnung und Objekterkennung

Durch die modellgestützte Segmentierung wurde bereits ein erster Zusammenhang zwischen einem Modell des Objekts und seinen 3D-Messdaten hergestellt. Im oben angeführten Beispiel ergibt sich hieraus bereits eine eindeutige Zuordnung. Bei komplexeren Objekten jedoch kann es zu Mehrdeutigkeiten kommen. Diese Mehrdeutigkeiten können nur in einem Suchprozess aufgelöst werden, der zusätzliche geometrische Bedingungen einfließen lässt um die richtigen Zuordnungen herzustellen. Ein solches System zur Objekterkennung wurde in ähnlicher Weise bereits mit Erfolg implementiert (BÖHM ET AL. 1999).

Die Zuordnung von Flächen der Messdaten zu Flächen eines CAD Modells ist ein wichtiger Schritt in einem automatisierten Messablauf und erlaubt die direkte Ableitung von Messergebnissen und den Vergleich zu Sollwerten. So kann zum Beispiel die Ebenheit einer Fläche bestimmt werden, oder der Radius eines Zylinders mit dem Sollwert aus dem CAD Datensatz verglichen werden.

4 Zusammenfassung

Es wurden die weiterentwickelten Verfahren zur Streifenprojektion aufgezeigt, die eine zuverlässige und hochgenaue dichte Erfassung von Oberflächen ermöglichen. Ausgehend von den rasterförmigen Distanzdaten können Algorithmen zur automatischen Distanzdaten-Interpretation eingesetzt werden. Ziel ist die vollautomatische Messung und Ableitung von quantitativen Messergebnissen.

5 Literaturverzeichnis

- ALTSCHULER ET AL. (1979): M. Altschuler, B.R. Altschuler und J. Taboada. Measuring surfaces spacecoded by a laser-projected dot matrix. In *Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Assembly*, Band 182. SPIE, 1979.
- BESL (1988): P.J. Besl. *Surfaces in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, 1988.
- BÖHM ET AL. (1999): J. Böhm, C. Brenner, J. Gühring und D. Fritsch. CAD-basierte Objekterkennung für ein multisensorielles Meßsystem. *Mustererkennung 1999*, Seite 62–69, 1999.
- BÖHM ET AL. (2000): J. Böhm, C. Brenner, J. Gühring und D. Fritsch. Automated Extraction of Features from CAD Models for 3D Object Recognition. In *ISPRS Congress 2000*, Amsterdam, Netherlands, 2000, Band 33.
- BÖHM ET AL. (2001): J. Böhm, J. Gühring und C. Brenner. Implementation and calibration of a multi sensor measuring system. In Sabry El-Hakim und Armin Grün (Hrsg.), *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, Band 4309 der Reihe *Proceedings of SPIE*, Seite 154–161. SPIE, 2001.
- BRENNER ET AL. (1999): C. Brenner, J. Böhm und J. Gühring. Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector. *Proc. SPIE Videometrics VI* **3641**, 164–172, January 1999.
- DO CARMO (1976): M. do Carmo. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice-Hall, 1976.
- GÜHRING ET AL. (2000): J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm und D. Fritsch. Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector. In *ISPRS Congress 2000*, Amsterdam, Netherlands, 2000, Band 33.