

3D-Formerfassung mittels Korrelation projizierter Specklemuster

M. Dekiff¹, G. Bischoff¹, Z. Böröcz¹, D. Dirksen², G. von Bally¹, C. Denz³

¹ Centrum für Biomedizinische Optik und Photonik, Robert-Koch-Str. 45, 48149 Münster

² Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Universitätsklinikum Münster, dirksdi@uni-muenster.de

³ Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

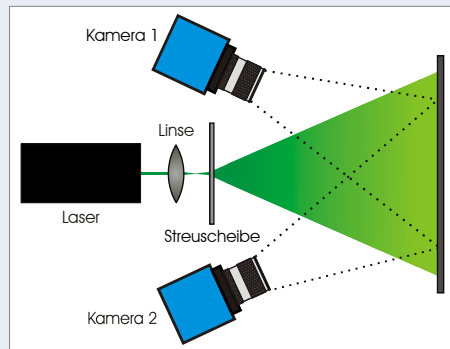
EINLEITUNG

Die 3D-Koordinatenerfassung mittels Streifenprojektions-technik ist aufgrund der Notwendigkeit, eine Sequenz von Bildern aufzuzeichnen, störanfällig gegenüber Bewegungen des Messobjektes. Dagegen reicht bei Verfahren, bei denen die Detektion homologer Bildpunkte durch Auswertung eines projizierten Zufallsmusters geschieht, ein einzelnes Stereobildpaar aus. Dadurch reduziert sich die Messzeit auf die einfache Belichtungszeit.

DAS MESSSYSTEM

Um die Erfassung der dreidimensionalen Form eines Objektes aus einem Stereobildpaar zu ermöglichen, wird bei dem vorgestellten Verfahren mit einem Laser (532 nm Wellenlänge) unter Verwendung einer Streuscheibe ein Specklemuster erzeugt und auf die zu vermessende Oberfläche projiziert.

Die mittels zweier fotogrammetrisch kalibrierter Schwarzweiß-CCD-Videokameras (räumliche Auflösung: 1280 x 960 Pixel; 256 Graustufen) angefertigten Aufnahmen des Musters werden an einen Computer übertragen, mit dem eine automatisierte Identifizierung korrespondierender Bildpunkte in den Aufnahmen erfolgt.



Dazu werden die Stereobilder zunächst von Linsenverzeichnungen befreit, zur Verringerung perspektivischer Verzerrungen und zur Beschränkung des Suchbereichs rektifiziert [1] sowie zwecks Minimierung des Intensitätsrauschens geglättet.

Die eigentliche Korrespondenzanalyse erfolgt in einem zweistufigen Korrelationsverfahren, in dem der Vergleich von Bildstrukturen unter Berücksichtigung perspektivischer Verzerrungen erfolgt:

Um zu einem Punkt im Bild der linken Kamera den korrespondierenden Punkt im Bild der rechten Kamera zu identifizieren, werden die Grauwerte innerhalb eines quadratischen Fensters um den Punkt im Bild der linken Kamera betrachtet. In einem ersten Schritt wird zunächst grob die Verschiebung und Streckung des korrespondierenden Bildbereichs im Bild der rechten Kamera ermittelt. Ausgehend von dem Ergebnis erfolgt im zweiten Schritt iterativ unter Berücksichtigung weiterer Bildtransaktionsparameter [2] eine genauere Bestimmung der Mittelpunktsverschiebung des Fensters und damit der Position des korrespondierenden Bildpunktes.

Anhand der Punktkorrespondenzen wird anschließend fotogrammetrisch die dreidimensionale Form und Lage des Objektes rekonstruiert. Das Ergebnis kann mit einem 3D-Bearbeitungsprogramm quantitativ ausgewertet und aus beliebigen Richtungen betrachtet werden.

EXPERIMENTELLE METHODEN

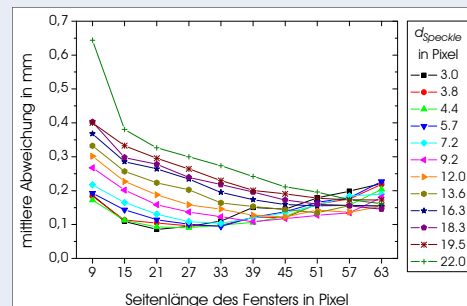
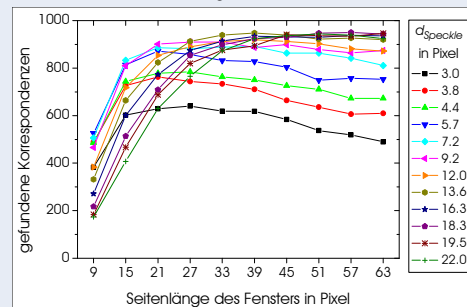
Es wird der Einfluss verschiedener Parameter auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Messsystems untersucht. Dazu wird die Oberfläche einer weiß lackierten Kugel (Radius: 9 cm) bei unterschiedlichen Konfigurationen des Messsystems erfasst und das Ergebnis mit Referenzwerten verglichen. Die Bestimmung der Referenzwerte erfolgt mittels der Streifenprojektions-technik [3]. Zusätzlich wird die Messung einer Kugeloberfläche anhand simulierter Stereobilder untersucht, die auf Basis simulierter Specklemuster erzeugt werden.

ERGEBNISSE

Einfluss der Fenster- und Specklegröße

Es zeigt sich, dass die Messgenauigkeit und die Anzahl gefundener Korrespondenzen stark von der Fenster- und Specklegröße abhängen. Für optimale Messergebnisse müssen diese Parameter auf die Tiefenstruktur des Messobjektes und die auftretenden perspektivischen Verzerrungen abgestimmt werden.

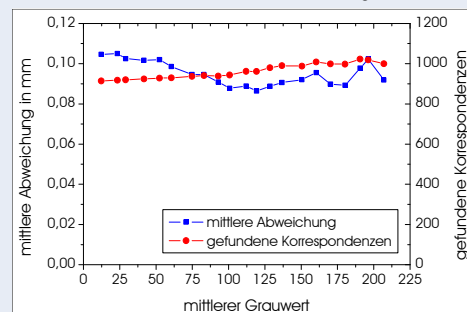
Bei den Messungen (Messfelddiagonale: 300 mm, Triangulationswinkel: 30°) stellen sich Speckles mit mittleren Durchmessern d_{Speckle} von 6 – 7 Pixel in Verbindung mit Fenstern von 27 – 33 Pixel Seitenlänge als sinnvolle Wahl heraus:



Damit sind mittlere Abweichungen von weniger als 0,1 mm möglich, wobei ca. 75 % der Oberflächenpunkte bestimmt werden können, die sich bei gleicher Abtastung (horizontal und vertikal 22 Pixel Punktabstand) mit der Streifenprojektions-technik ergeben.

Einfluss der Intensität des Specklemusters

Die Untersuchungen zeigen einen geringen Einfluss der Intensität des Specklemusters auf die Korrespondenzanalyse. Bei den Messungen (Seitenlänge des Fensters: 33 Pixel, mittlerer Speckledurchmesser: 8 Pixel) werden die besten Ergebnisse erzielt, wenn der mittlere Grauwert des aufgezeichneten Specklemusters zwischen 170 und 180 liegt:



Bemerkenswert ist dabei, dass die Messergebnisse nahezu unabhängig davon sind, ob die Anhebung der Grauwerte durch eine Erhöhung der Laserintensität oder eine nachträgliche Bearbeitung der Bilder erfolgt.

Einfluss des Triangulationswinkels

Bei der Untersuchung verschiedener Triangulationswinkel kann beobachtet werden, dass mit wachsendem Triangulationswinkel die Zahl gefundener Korrespondenzen stark ab-, die Messgenauigkeit aber zunimmt. Als bester Kompromiss ergeben sich Triangulationswinkel zwischen ca. 20° und 30°.

Einfluss des Glättungsfilters

Das Auftreten subjektiver Speckles bei der Aufnahme des projizierten Specklemusters lässt der Glättung der Bilder vor der Korrespondenzanalyse eine große Bedeutung zukommen. Die besten Ergebnisse werden hierbei mit einem Butterworth-Tiefpassfilter zweiter Ordnung erzielt, dessen Grenzfrequenz automatisiert auf Basis der Fouriertransformierten des zu glättenden Bildes ermittelt wird.

Einfluss der Ordnung der Spline-Interpolation

Die Ordnung der zur Interpolation verwendeten Splines zeigt nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens. Aufgrund der mit der Ordnung der Splines stark ansteigenden Rechenzeit ist es jedoch empfehlenswert, maximal Splines vierter Ordnung (kubische Splines) zu verwenden.

Messungen bei Umgebungslicht

Der Vorteil der Verwendung von (Laser-)Specklemustern zeigt sich bei Vorhandensein von Umgebungslicht. Anhand einer Messung bei zusätzlicher Beleuchtung des Messobjektes mit Weißlicht konnte demonstriert werden, dass sich mit Hilfe schmalbandiger Interferenzfilter das projizierte Specklemuster effektiv vom Umgebungslicht trennen lässt und somit auch unter ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen eine zuverlässige 3D-Formerfassung möglich ist.

ANWENDUNGSBEISPIELE

3D-Formerfassung eines Gesichtes



3D-Formerfassung einer Handinnenfläche



FAZIT

Das vorgestellte Verfahren erlaubt bereits im momentanen Entwicklungsstadium die zuverlässige Erfassung der dreidimensionalen Form und Lage eines Objektes auch unter ungünstigen Umgebungslichtverhältnissen.

LITERATUR

- [1] A. Fusiello, E. Trucco, A. Verri: A compact algorithm for rectification of stereo pairs. *Machine Vision and Applications*, 12:16–22, 2000.
- [2] H. Lu, P. D. Cary: Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Experimental Mechanics*, 40(4):393–400, 2000.
- [3] G. Bischoff, Z. Böröcz, C. Proll, J. Kleinheinz, G. von Bally, D. Dirksen: Modular optical topometric sensor for 3D acquisition of human body surfaces and long-term monitoring of variations. *Biomedizinische Technik*, 52(4):284–289, 2007.