

Charakterisierung der Messgenauigkeit eines auf Laserspeckle-Korrelation basierenden 3D-Messsystems mittels der 3D-Übertragungsfunktion

P. Bessenbrügge^{1*}, M. Wantjer¹,
 M. Dekiff¹, C. Denz²,
 C. Runte¹, D. Dirksen¹

¹ Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde,
 Waldeyerstr. 30, 48149 Münster
 *berssenbruegge@uni-muenster.de
² Institut für Angewandte Physik, Universität Münster



EINLEITUNG

Bei abbildenden Systemen ist die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) ein gängiges Instrument zur Charakterisierung der Auflösung und des Kontrasts. Dieses Konzept wird bei einem 3D-Messsystem, welches auf der Korrelation projizierter Laserspecklemuster basiert, angewendet. Die so erhaltene 3D-Übertragungsfunktion [1] erlaubt es, die Messgenauigkeit des Systems sowie deren Abhängigkeiten zu charakterisieren. Bei der Charakterisierung musterprojizierender Systeme ergibt sich damit ein Vorteil gegenüber konventionellen Methoden, bei denen ein Vergleich mit bekannten Referenzpunkten stattfindet, da deren Identifizierung schwierig und die Fertigung entsprechend präziser Kalibrierkörper aufwendig ist. Der hier verwendete Kalibrierkörper muss lediglich zwei plane Flächen und eine scharfe Kante aufweisen.

Das untersuchte Messsystem detektiert korrespondierende Bildpunkte durch Auswertung eines auf das Objekt projizierten Laserspecklemusters. Da hierfür ein einzelnes (Stereo-)Bild ausreicht, entspricht die Messzeit nur der einfachen Belichtungszeit. Durch die Verwendung monochromatischen Lichts kann das projizierte Muster bei der Aufnahme effektiv mit Filtern vom Umgebungslicht getrennt werden.

DAS TOPOMETRISCHE SYSTEM

Der topometrische Messkopf besteht aus zwei hochauflösenden CCD-Kameras (1280 x 960 Pixel) mit digitaler Schnittstelle (IEEE 1394) sowie einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser, der, aufgeweitet durch eine Linse, durch eine Streuscheibe ein Specklemuster auf das Messobjekt — hier den Testkörper — projiziert. Der Testkörper ist ein geschliffener Stahlquader und ist so positioniert, dass eine Kante nach vorne zeigt und in der Mitte der Kamerabilder liegt. Durch eine Analyse

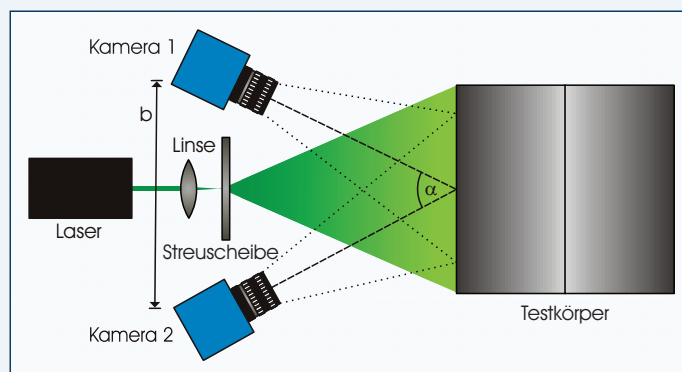


Abb. 1: Das topometrische Messsystem mit dem Testkörper (auf die Kante gestellter Stahlquader) in der Draufsicht. b bezeichnet die Kamerabasis, α den Triangulationswinkel.

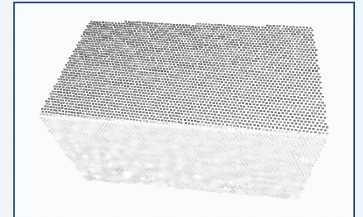
auf Korrelationen der Specklemuster im Bild der linken und rechten Kamera werden korrespondierende Bildpunkte identifiziert [2]. Dies ermöglicht bei gegebener Kalibrierung der Kameras die Rekonstruktion dreidimensionaler Oberflächenkoordinaten.

MESSUNG DER 3D-ÜBERTRAGUNGSFUNKTION

Als Testkörper dient ein Stahl-Quader, der so geschliffen ist, dass er eine möglichst gerade und scharfe Kante besitzt und möglichst ebene angrenzende Seitenflächen. Etwa hundert Kantenprofile werden überlagert, um ein überaufgelöstes Profil zu erhalten. Die Überlagerung erfolgt durch eine Parallelprojektion der gemessenen Punktwolke (Abb. 2) in der Richtung der Kante in eine Ebene senkrecht zur Kante.

Das überaufgelöste Kantenprofil wird nun mit der Winkelhalbierenden des Profils parallel zur Y-Achse ausgerichtet, symmetrisch zuge-

schnitten und periodisch fortgesetzt. Weiterhin wird es äquidistant abgetastet und mit einer Fensterfunktion multipliziert, um es diskret fouriertransformieren zu können. Als synthetisches Eingangssignal dient ein perfektes Kantenprofil. Dieses wird durch Anpassung von Geraden an die Flanken des gemessenen Profils sowie eine anschließende Abtastung und Fensterung gewonnen.



Die 3D-Übertragungsfunktion ist der Quotient der Fouriertransformierten des gemessenen und des perfekten Kantenprofils. Die Raumfrequenz, an der die 3D-Übertragungsfunktion unter den Wert 0,6 abfällt, wird als 3D-Auflösung definiert.

Abb. 2: Die gemessene Punktwolke der Kante des Testkörpers

DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE

Der Triangulationswinkel des Aufbaus beträgt $\alpha = 35^\circ$, die Kamerabasis $b = 47$ cm. Es werden zwei verschiedene Speckle-Größen von 5,0 und 6,4 Pixeln eingestellt. Pro Einstellung werden sieben Messungen vorgenommen, zwischen denen der Testkörper leicht verdreht wird. Beide Messreihen werden jeweils mit Subfenstergrößen von 21 und 33 Pixeln ausgewertet. Für jede Reihe wird der Mittelwert und die Standardabweichung der 3D-Übertragungsfunktion bestimmt und durch eine quadratische B-Spline-Anpassung geglättet.

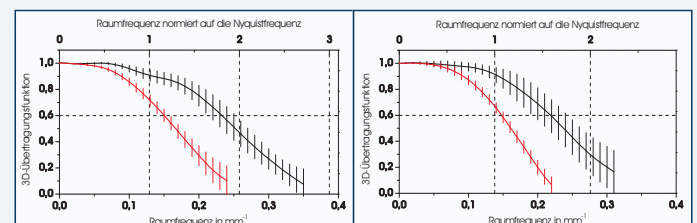


Abb. 3: links: Größe der projizierten Speckle im Kamerabild: 5,0 Pixel, rechts: Specklegröße 6,4 Pixel, schwarz: Korrespondenzanalyse der Stereobilder mit einer Subfenstergröße von 21 Pixeln, rot: Subfenstergröße 33 Pixel

Die eingestellte Größe der Speckle zeigt bei den hier gewählten Einstellungen keinen signifikanten Einfluss auf die 3D-Auflösung. Die Wahl der Subfenstergröße bei der Korrespondenzanalyse beeinflusst die 3D-Auflösung dahingehend, dass durch das größere Subfenster während der Auswertung über einen größeren Bildbereich gemittelt wird. Dadurch sinkt die 3D-Auflösung signifikant.

Die Nyquistfrequenz wurde abgeschätzt als die Hälfte des Kehrwerts des mittleren Abstands nächster Nachbarn in der Punktwolke. Durch die Überlagerung vieler Kantenprofile lässt sich die 3D-Übertragungsfunktion jenseits der Nyquistfrequenz bestimmen. Die ermittelten 3D-Auflösungen liegen in jedem Fall über der Nyquistgrenze. Das bedeutet, dass sich durch eine dichtere Auswertung der Kamerabilder (hier ein 3D-Punkt alle 5 Pixel) die Detailgenauigkeit der 3D-Rekonstruktion noch steigern lässt.

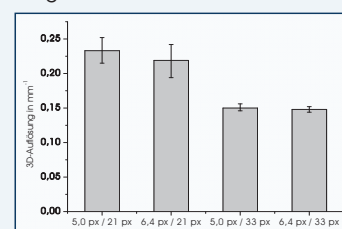


Abb. 4: 3D-Auflösungen, Beschriftung links: Speckle-Größe, rechts: Subfenstergröße

LITERATUR

- [1] Goesele, M.: *New Acquisition Techniques for Real Objects and Light Sources in Computer Graphics*. Doktorarbeit, Max-Planck-Institut für Informatik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2004.
- [2] M. Dekiff, P. Bessenbrügge, B. Kemper, C. Denz, D. Dirksen: *Three-dimensional data acquisition by digital correlation of projected speckle patterns*. Applied Physics B, 99(3), 449-456, 2010.

Diese Arbeiten wurden von der Deutschen Krebshilfe gefördert.