

Hologramm-Interferometrie zur Deformationsbestimmung stereoskopisch vermessener Objekte

Holger Babovsky, Bastian Harendt, Marcus Große, Armin Kießling, Richard Kowarschik

Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Fröbelstieg 1, 07743 Jena, Germany

mailto:holger.babovsky@uni-jena.de

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches eine Verknüpfung zwischen der stereophotogrammetrisch bestimmten dreidimensionalen Oberfläche und Deformationen ermöglicht. Die Deformationen werden mittels interferometrischer Methoden bestimmt. Dazu nutzen wir stereophotogrammetrische Aufnahmen mit zwei Kameras, welche mit Mitteln der digitalen Holographie durchgeführt werden. Um eine Zuordnung zwischen den beiden Kameras zu erhalten, werden statistische Specklemuster benutzt.

1 Einleitung

Stereophotogrammetrie ist eine weit verbreitete Technik zur digitalen Formvermessung von Objekten. Eine solche Erfassung wird sowohl im industriellen Bereich als auch im Multimediasektor (zum Beispiel bei Spielkonsolen der aktuellen Generation) genutzt. Die vermessenen Objekte können dabei - abhängig von ihrer Größe - auf wenige Mikrometer genau bestimmt werden. Deformationsmessungen hingegen können Objektveränderungen deutlich im Submikrometerbereich erfassen. Ein Nachteil solcher Verfahren ist allerdings die aufwendige Erfassung größerer Veränderungen. Ziel dieser Arbeit ist eine Kombination beider Verfahren unter Verwendung der digitalen Holographie.

2 Grundlagen

Das Grundprinzip der stereophotogrammetrischen Vermessung von Objekten aus digitalen Hologrammen wurde bereits in [1, 2] vorgestellt. Das dort beschriebene Verfahren setzt die Verwendung eines Liquid Crystal on Silicon Displays (LCoS) voraus. Da es allerdings auch möglich ist, für die Stereophotogrammetrie Speckles als statistische Muster einzusetzen [3], wird im Rahmen dieser Arbeit folgender Versuchsaufbau genutzt:

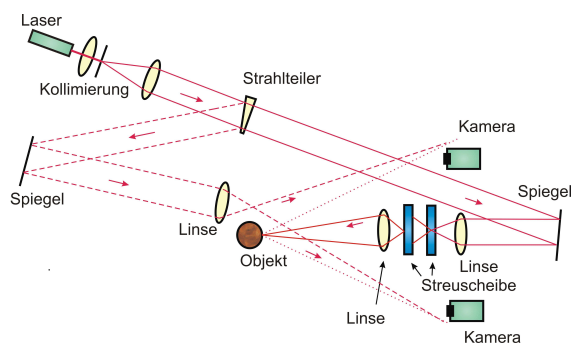


Abbildung 1 Experimenteller Aufbau

Die Aufnahme des Hologramms erfolgt durch kohärente Überlagerung zweier Wellen, der Referenz- (gestrichelte Linie), und der Objektwelle (gepunktete Linie) auf zwei CCD-Chips (Marlin, AVT), die 1024x1024 Pixels und einen Pixelabstand von $\Delta x = 4,65 \mu\text{m}$ besitzen. Um sicherzustellen, dass die Überlagerung kohärent geschieht, wird als Lichtquelle ein 130 mW Laser bei $\lambda = 532 \text{ nm}$ verwendet und die Weglängen der beiden Wellen abgeglichen. Dabei wird die Referenzwelle mit einer Mikrolinse so fokussiert, dass ihr Fokus in der Objektebene liegt. Die sich dahinter ausbreitende Welle, welche in Näherung eine sphärische Wellenfront besitzt, wird anschließend von beiden CCDs erfasst. Die Verwendung einer sphärischen Referenzwelle bietet im Vergleich zu einer ebenen Wellenfront einige Vorteile. So sind die beiden Kameras nahezu frei im Raum positionierbar. Außerdem kann bei der Rekonstruktion des Bildes eine, im Vergleich zur Fresneltransformation, einfacher durchzuführende Fast-Fourier-Transformation (FFT) genutzt werden. Die Rekonstruktionsebene enthält hierbei immer den Ursprung der sphärischen Welle.

Da in der Stereophotogrammetrie zur Zuordnung der von beiden Kameras erfassten Bilder auf das Objekt projizierte Muster benötigt werden, muss eine Modulation der Beleuchtungswelle (durchgezogene Linie) realisiert werden. Dazu wird die Beleuchtungswelle mittels einer Linse auf eine Streuscheibe fokussiert. Dadurch wird ein Specklemuster erzeugt, welches auf der zweiten Streuscheibe sichtbar ist. Von der zweiten Streuscheibe wird das Muster mit einer weiteren Linse auf das Objekt abgebildet. Durch Bewegung der ersten Streuscheibe wird das Muster verändert. Die zweite Streuscheibe dient der Reduzierung der von beiden Kameras erfassten subjektiven Speckles auf dem Objekt in den rekonstruierten Bildern. Da sich die subjektiven Speckles an beiden Kamerapositionen statistisch voneinander unterscheiden, erschweren sie die Aus-

wertung mit dem verwendeten 8-Punkt-Algorithmus massiv. Die Größe eines Speckles beträgt in den rekonstruierten Bildern hierbei immer exakt ein Pixel. Um eine Reduzierung zu ermöglichen werden mit Hilfe der zweiten Streuscheibe verschiedene Phasenverteilungen auf dem Objekt erzeugt. Dies variiert die subjektiven Speckles. Bei der Rekonstruktion der Hologramme kann nun durch eine Mittelung mehrerer Aufnahmen bei verschiedenen Phasenlagen eine Reduzierung der subjektiven Speckles erreicht werden [4]. Die für die Rekonstruktion notwendige Zuordnung der beiden Kameras erfolgt über die äußeren Parameter. Die Kamerakonstante ergibt sich bei rekonstruierten Hologrammen zu $c = \frac{N\Delta x}{\lambda} = 8947$. N ist dabei die Anzahl der verwendeten Pixel pro Reihe oder Spalte. Der Hauptpunkt liegt im Ursprung der Referenzwelle. Zur Erstellung einer 3D-Punktwolke wurden 105 Strukturen mit jeweils 100 Bildern zur Specklemittelung aufgenommen.

3 Ergebnisse

Als erstes wurde eine komplexe, circa 4 cm hohe Szene vermessen (siehe Abb. 2 (a)). Die Szene besteht aus mehreren verschiedenfarbigen Kunststoffobjekten sowie aus einer Metallschraube.

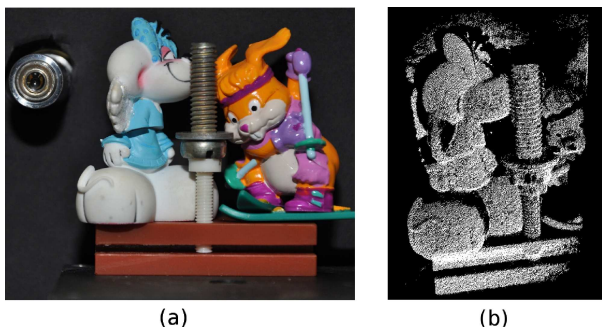


Abbildung 2 Szene aus mehreren Objekten: (a) Fotografie; (b) rekonstruierte 3D-Punktwolke

Die rekonstruierte Punktwolke ist in Abb. 2 (b) dargestellt. Sie beinhaltet etwa 140.000 Punkte im Raum. Dabei zeigte sich das Messsystem den verschiedenen Farben, Formen und Materialien gegenüber als ausgesprochen robust.

In einem zweiten Schritt wurde anschließend ein Tischtennisball (tt-Ball) vermessen und mit einer idealen Sphäre gefittet. Dabei ergab sich eine globale Standardabweichung von $\text{RMSD} = 138 \mu\text{m}$. Um Deformationen interferometrisch nachweisen zu können, wurde der tt-Ball erwärmt und sein Abkühlen beobachtet. Um die dabei störenden, auf das Objekt projizierten Specklemuster zu eliminieren, wurde die Linse vor der Streuscheibe so verschoben, dass die Streuscheibe deutlich außerhalb ihres Fokus liegt. Durch Differenzbildung zweier Aufnahmen sind anschließend Interferenzstreifen erkennbar. Abb. 3 zeigt die Interferenzstreifen

zwischen zwei Zuständen im Phasenbild, welche auf die 3D-Punktwolke aufgebracht wurden.



Abbildung 3 3D-Punktwolke eines tt-Balles, welche mit Phasenwerten gemappt wurde, einschließlich der durch die Deformation erzeugten Interferenzstreifen

4 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein stereophotogrammetrisches holographisches Messsystem vorgestellt, welches ein Specklemuster als strukturierte Beleuchtung verwendet. Das System erwies sich als geeignet zur Vermessung von komplexen Objekten verschiedener Form, Farbe und Materialien. Außerdem war es möglich, die durch das System erzeugte Punktwolke mit einer hochgenauen interferometrischen Messung zu kombinieren, um damit kleine Deformationen des Objektes auf seiner 3D-Oberfläche zuordnen zu können.

Literatur

- [1] M. Grosse, J. Buehl, H. Babovsky, A. Kiessling and R. Kowarschik, "3D shape measurement of macroscopic objects in digital off-axis holography using structured illumination" in *Opt. Lett.* **35**, 1233 (2010).
- [2] H. Babovsky, J. Bühl, M. Große, A. Kießling and R. Kowarschik, "3D-Rekonstruktion makroskopischer Objekte mittels digitaler Hologramme und strukturierter Beleuchtung" in *Proc. DGaO B32*.
- [3] M. Schaffer, M. Grosse and R. Kowarschik, "High-speed pattern projection for three-dimensional shape measurement using laser speckles" in *Appl. Opt.* **49**, 3622 (2010).
- [4] S. Hertwig, H. Babovsky, A. Kiessling, and R. Kowarschik, "Reduction of speckles in digital holographic interferometry," in "Fringe 2009," W. Osten and M. Kujawinska, eds. (Springer, 2009), 184.