Deformationsbestimmung mittels bildfeld-holographischer Stereophotogrammetrie

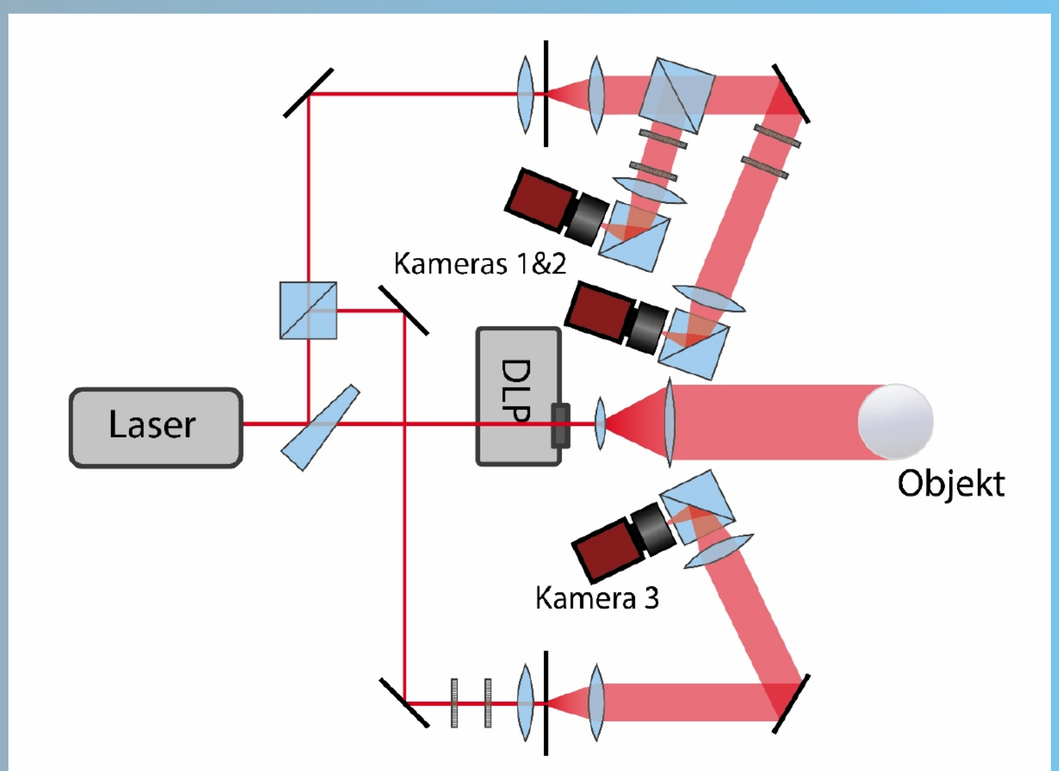
H. Babovsky, M. Hanemann, A. Kiessling, R. Kowarschik
holger.babovsky@uni-jena.de

Institut für Angewandte Optik
Friedrich-Schiller-Universität Jena

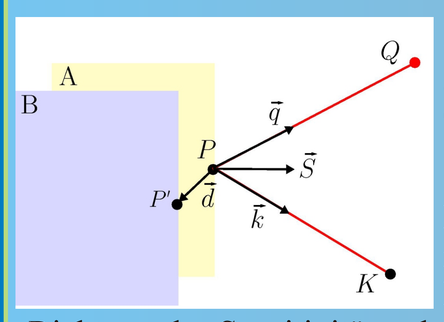
seit 1558

Mit Hilfe der digitalen Holographie ist es möglich, sowohl die Amplituden als auch die Phaseninformationen eines optischen Wellenfeldes am Ort des Detektors zu bestimmen, woraus durch Rückpropagation unter anderem Ansichten von Objekten gezeigt werden können. Dies wurde in vorherigen Arbeiten dazu genutzt, um mittels der rekonstruierten Abbildungen verschiedener Ansichten und Kameras stereophotogrammetrisch dreidimensionale Punktwolken von Objekten zu erstellen [1, 2].
Dieses Konzept wurde bereits dazu genutzt, um mit vier Kameras unter Verwendung digitaler Fourier-Holographie Deformationen von Objekten zu bestimmen [3]. Allerdings besitzt das genannte Verfahren einige Nachteile. So ist es nötig, auf Grund der durch eine kohärente Beleuchtung erzeugten Speckles in den rekonstruierten Bildern aufwendige Speckleredukti onstechniken einzusetzen. Diese erhöhen sowohl die Stabilitätsanforderungen an das System als auch die Aufnahmedauer signifikant. Weiterhin erzeugen die Speckles eine, verglichen zur konventionellen Stereophotogrammetrie, erhöhte Messunsicherheit.
Um diese Probleme zu minimieren, wird im Folgenden ein Verfahren vorgestellt, welches mit einer Kombination aus inkohärenter Stereophotogrammetrie mit statistischen, bandbegrenzten Mustern und der Bildfeldholographie arbeitet. Da sich weder die Position der Kamera noch der Aufbau ändert, ist es hiermit möglich Deformationsvektoren zu bestimmen und auf der stereophotogrammetrisch erzeugten Punktwolke aufzubringen.

Aufbau



Bestimmung der Deformationsvektoren



Deformationsvektoren $\vec{d}$ eines Objektes können mit Hilfe gemessener Phasendifferenzen $\Delta\varphi$ bestimmt werden, falls der zugehörige Sensitivitätsvektor $\vec{S}$ bekannt ist.

$$\Delta\varphi = \vec{S} \cdot \vec{d}$$

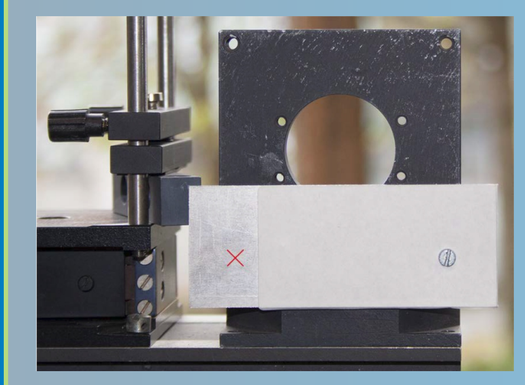
Für Phasenänderungen größer als 2 π, ist es weiterhin nötig, ein Phaseunwrapping durchzuführen.
Dabei wird gibt die Phasendifferenz die Deformation in Richtung des Sensitivitätsvektors an. Der Sensitivitätsvektor ist durch folgenden Zusammenhang gegeben:

$$\vec{\mathbf{S}} = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{\mathbf{q}} + \vec{\mathbf{k}}\right)$$

λ kennzeichnet dabei die Wellenlänge, während $\vec{\mathbf{q}}$ und $\vec{\mathbf{k}}$ die Richtungen vom jeweiligen Objektpunkt zur Lichtquelle Q und zur Kamera K beschreiben.
Somit ist der Deformationsvektor $\vec{d}$ durch

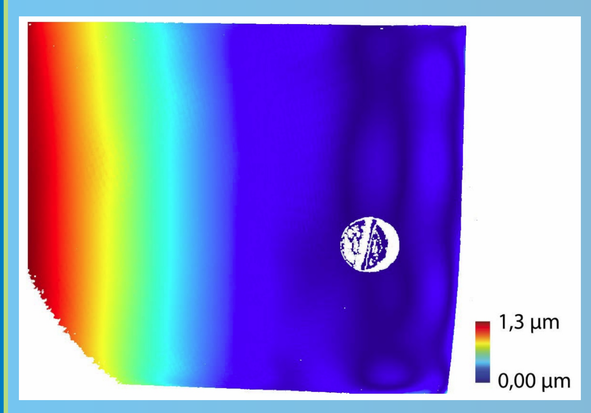
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{\mathbf{q}} + \vec{\mathbf{k}}\right)\vec{\mathbf{d}}$$

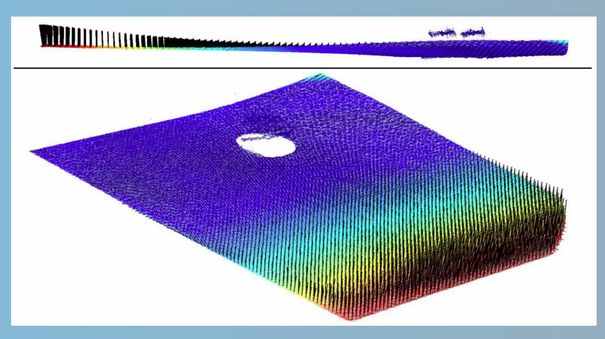
bestimmbar. Da der Sensitivitätsvektor offensichtlich an jedem Punkt des Objektes unterschiedlich ist, werden zur Bestimmung des Deformationsvektors weitere Informationen benötigt. So kann beispielsweise $\vec{\mathbf{q}}$ durch Verwendung einer ebenen Beleuchtungswelle als konstant angenommen werden. Weiterhin kann $\vec{\mathbf{k}}$ durch eine stereophotogrammetrische Objektvermessung bestimmt werden, sodass der Deformationsvektor unter Verwendung dreier, in linear unabhängigen Beobachtungsrichtungen positionierten, Kameras berechnet werden kann.



Technisch funktioniert das System wie folgt: Zunächst wird ein statistisches bandbegrenztes Muster mittels eines DLP-Projektors auf das Objekt abgebildet und von den drei Kameras (Guppy Pro; Δx = 2,2 µm) erfasst. Durch Veränderung der Muster ist es möglich, die 3D Oberfläche des Objektes stereophotogrammetrisch zu bestimmen.
Im Anschluss daran wird das Objekt mit Hilfe eines He-Ne-Lasers ausgeleuchtet und das Objekt bildfeldholographisch mit allen drei Kameras aufgezeichnet. Nach Deformation des Objektes, einer mit Papier beklebten Aluminiumplatte, können nach Aufnahme weiterer Bildfeldhologramme die Phasendifferenzen bestimmt und daraus die Deformationsvektoren berechnet werden.

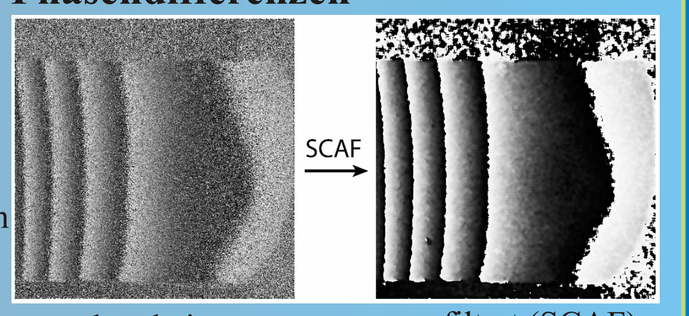
Rekonstruierte Deformationsvektoren



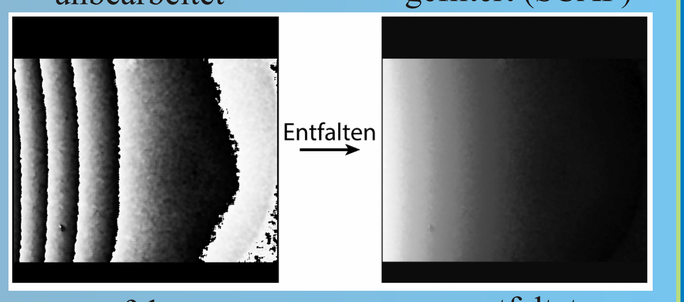


Zunächst ist es allerdings nötig, die Phasendifferenzbilder zu filtern, da sie von einem starken Speckle rauschen überzogen sind. Dazu werden die Bilder zunächst mit dem “sine/cosine average filter” [4] bearbeitet, welcher in der Lage ist, das Rauschen unter Beibehaltung von Phasensprüngen signifikant zu reduzieren.
In einem weiteren Schritt muss nun das gefilterte Bild entfaltet werden, da es Phasensprünge bei 2 π aufweist. Dafür wird ein Programm benötigt, welches unempfindlich gegenüber dem reduzierten, aber immer noch vorhandenen Speckle rauschen ist. In diesem Experiment kommt der “Miguel 2D unwrapper” [5] zum Einsatz. Allerdings zeigte sich, dass auf diese Art und Weise entfaltete Aufnahmen Störungen enthalten, welche sich zwischen den ursprünglichen Phasensprüngen befinden. Um fehlerhafte Deformationsvektorbestimmungen zu vermeiden, wurden die Bilder mittels eines Polynomfits geglättet. Die daraus schlussendlich resutlierenden Deformationsvektoren sind im Kasten links neben diesem dargestellt.

Phasendifferenzen



unbearbeitet — gefiltert (SCAF)



gefaltet — entfaltet

Zusammenfassung

Ausgehend von einem stereophotogrammetrisch holographischen Verfahren mit linsenloser Fourierholographie, wurde eine Methode entwickelt, welche es mit Hilfe dreier Kameras ermöglicht, Deformationsvektoren von verschiedenen Zuständen eines Objektes zu bestimmen. Dabei ermöglichte die Verwendung der Bildfeldholographie eine 3D Formerfassung mittels konventioneller Stereophotogrammetrie, was sowohl die Aufnahmedauer, als auch die Rekonstruktion auf eine Gesamtdauer von wenigen Sekunden reduzieren konnte. Weiterhin konnte auf diese Art und Weise eine speckle freie 3D-Punktwolke des Objektes erzeugt werden, was die Unsicherheiten bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit verglichen zu den rein holographischen Kombinationsverfahren signifikant reduzieren konnte.

1 - M. Grosse, J. Buehl, H. Babovsky, A. Kiessling, R. Kowarschik: *3D shape measurement of macroscopic objects in digital off-axis holography using structured illumination*, Optics Letters, Vol. 35 Issue 8, pp.1233-1235 (2010)
2 - H. Babovsky, M. Grosse, J. Buehl, A. Kiessling, R. Kowarschik: *Stereophotogrammetric 3D shape measurement by holographic methods using structured speckle illumination combined with interferometry*, Optics Letters Vol. 36, No. 23 pp. 4512-4514 (2011)
3 - R. Schwede, H. Babovsky, A. Kiessling, R. Kowarschik: *Measurement of 3D deformation vectors with digital holography and stereophotogrammetry*, Optics Letters Vol. 37, Issue 11, pp. 1943-1945 (2012)
4 - Q. Kemao, L. Hoai Nam, L. Feng, S. Soon: *Comparative analysis on some filters for wrapped phase maps,* Applied Optics, Vol. 46 No. 30 pp. 7412-7418 (2007)
5 - M. Herraez,D. Burton,M. Lalor, M. Gdeisat: *Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path,* Optical Society of America Vol. 11 No. 1 pp. 107-117 (1994)

DGaO-Proceedings 2013 - http://www.dgao-proceedings.de - ISSN: 1614-8436 - urn:nbn:de:0287-2013-P025-4