

Bildbasierte Abstandsrekonstruktion mittels holographisch vervielfältigter Doppel-Helix-PSF

Simon Hartlieb*, Christian Schober*, Tobias Haist*, Stephan Reichelt*

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

mailto: simon.hartlieb@ito.uni-stuttgart.de

In diesem Artikel wird ein kamerabasierter Sensor vorgestellt, mit dem der Abstand mehrerer Punktlichtquellen mit einer Genauigkeit von $8,5 \mu\text{m}$ in einem Tiefenbereich von 20 mm bestimmt werden kann. Das Abbildungssystem wird um ein diffraktives optisches Element (DOE) erweitert, wodurch eine Doppel-Helix PSF sowie eine Multi-Punkt Replikation erzeugt wird.

1 Einführung

Bei der Abbildung eines 3D Objektpunktes auf einen 2D Kamerasensor gehen die Informationen über den Abstand des Punktes verloren. Um ihn zu rekonstruieren, besteht die Möglichkeit, die defokusbasierte Verschmierung der Punktspreadsprizfunktion (PSF) des Abbildungssystems zu nutzen. Diese Art der Rekonstruktion ist jedoch zunächst für makro- und mesoskopische Skalen nicht sehr vielversprechend, da der Durchmesser der Verschmierung quadratisch vom Abbildungsmaßstab abhängt und somit nicht sehr sensitiv ist. Um die Rekonstruktion zu verbessern, besteht die Möglichkeit, die objektseitige numerische Apertur (NA) zu vergrößern, weshalb die Abstandsrekonstruktion im Mikroskopiebereich häufigen Einsatz findet. Nachteilig hierbei ist, dass dadurch die Schärfentiefe und somit der Messbereich kleiner wird. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurde der Einsatz von DOEs untersucht, um damit die Form der PSF derart zu modifizieren, dass die Genauigkeit der Rekonstruktion verbessert wird. Bekannte Beispiele sind die self-bending PSF [1], tetrapod PSF [2], corkscrew PSF [3] und Doppel-Helix PSF (DH-PSF) [4].

Die folgende Kurzdarstellung beschäftigt sich mit der Fragestellung, inwieweit sich eine Einzelbild-Abstandsmessung mit guter Genauigkeit und gleichzeitig großem Tiefenmessbereich umsetzen lässt, um so einen kostengünstigen 3D Positionsmesssensor zu generieren. Hierfür wird das Abbildungssystem mit einem DOE ausgestattet, welches zwei Aufgaben erfüllt: Rotation und holografische Replikation der PSF durch ein kombiniertes Hologramm bestehend aus Spiralphasenmaske (SPM) und Multi-Punkt (MP) Phasenmaske. Das DOE wird an einem Objektiv mit kleiner NA eingesetzt. Die kleine NA ermöglicht einen großen Messbereich und die MP Replikation soll die Genauigkeit der Tiefenrekonstruktion verbessern.

2 Prinzip und Messergebnisse

Als PSF Modifikation wird die DH-PSF nach Baránek et al. verwendet [4]. Die diskrete SPM des

DOEs moduliert das einfallende Licht so, dass die transversale Komponente des entstehenden Intensitätsprofils aus zwei umeinander rotierten Helixspiralen besteht. In der Bildebene erscheint diese Doppel-Helix als zwei umeinander rotierende Punktbilder (Spots). Aus dem Rotationswinkel kann der Abstand des Objektpunktes rekonstruiert werden. Dem SPM ist ein Hologramm zur Multi-Punkt-Generierung überlagert, wodurch ein Objektpunkt zu einem Cluster an Punkten in der Bildebene repliziert wird. Durch das Mitteln der Schwerpunktpositionen dieser replizierten Punkte kann die laterale Positionsbestimmung verbessert werden. Dieses Prinzip der Mittelung wird nun nicht nur auf die laterale sondern auch auf die axiale Positionsrekonstruktion angewendet, indem die DH-PSF repliziert wird und somit eine Mittelung der Rotationswinkel möglich ist (siehe Abb. 1).

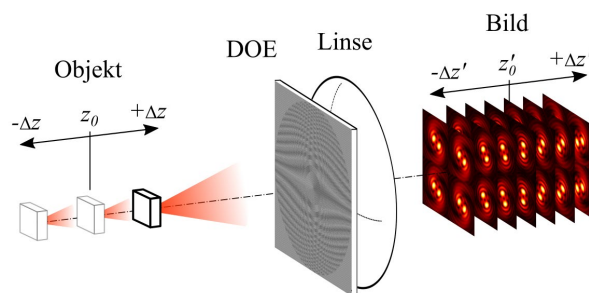


Abb. 1 Schema des Sensors. Das DOE erzeugt zwei, abhängig vom Defokus umeinander rotierende Spots (DH-PSF), welche zu einem Cluster aus vier Replikationen vervielfältigt werden. Bild nach [6].

Der Experimentalaufbau besteht aus einem Objektiv (Edmund Optics D-Series, $f' = 50 \text{ mm}$, $NA = 0,0595$), das mit einem lithografisch gefertigten DOE zur Erzeugung und Multi-Punkt Replikation der DH-PSF ausgestattet ist. Als Objektpunkt wird ein Faserausgang (Fasergekoppelter Laser, $\lambda = 633 \text{ nm}$) verwendet, der an einer Linearstange zur axialen Positionierung befestigt ist. Die Kamera besitzt einen Pixelabstand von $2,45 \mu\text{m}$. Der Abstand zwischen Lichtquelle und DOE beträgt 234 mm und der axiale Tiefenmessbereich 20 mm .

In Simulationen sowie auch in den Messungen wurde festgestellt, dass die beiden umeinander rotierenden Punkte der DH-PSF einen Schweif ausbilden, dessen Größe und Länge abhängig vom Rotationswinkel ist (siehe Abb. 2 (b)). Dadurch wird die Schwerpunktlage der beiden Spots und somit die Berechnung des Rotationswinkels verfälscht. Aus diesem Grund wird die Methode der Bildkorrelation zwischen einem Messbild und einem Referenzbilderstapel zur Abstandsrekonstruktion eingesetzt. Die Referenzbilder werden an 2000 axial äquidistanten Punkten in dem Messbereich von 20 mm aufgenommen. Der Maximalwert jeder einzelnen Korrelation zwischen einem Messbild und den Referenzbildern ist in Abbildung 2 (a) über der Abstandsänderung aufgetragen. Das Maximum dieser Kurve markiert das Messergebnis, in diesem Beispiel für eine Stage-Position von 14,871 mm. Die Peak-Position wurde zu 14,874 mm errechnet, was zu einer Differenz (Fehler) zwischen Stage-Position (Referenz) und Kameramessung von 3 μm führt. In (b) ist das MP-DH-PSF Cluster bestehend aus 25 Replikationen der DH-PSF für eine Defokus-Position $\Delta z = 13,9 \text{ mm}$ ($z = 20 \text{ mm}$) dargestellt.

In Abbildung 3 ist das Messergebnis für eine von drei Messungen mit unterschiedlicher Anzahl an äquidistant über den Messbereich verteilten Punkten aufgetragen. Diese Messung wurde mit 380, die beiden weiteren mit 520 und 660 Messpunkten durchgeführt (siehe [6]). Aufgetragen ist die Differenz zwischen Kameramessung und Stage-Position über der Abstandsänderung. Die mittlere Standardabweichung aller drei Messungen beträgt 8,51 μm und die Messungen besitzen eine gute

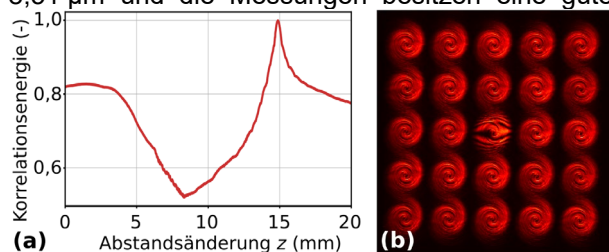


Abb. 2 (a) Korrelationsenergie über Abstandsänderung für ein Messbild an der Position 14,871 mm; (b) MP-DH-PSF Cluster mit 25 Replikationen an der Stelle $z = 20 \text{ mm}$.

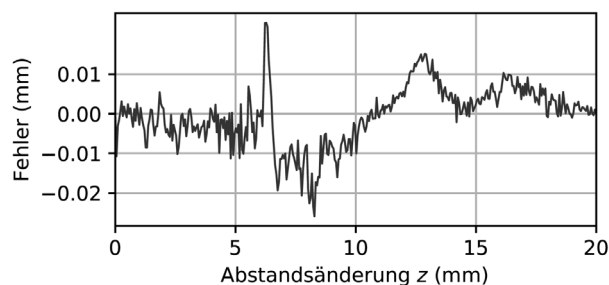


Abb. 3 Messergebnis für eine Messung mit 380 über den Tiefenmessbereich (20 mm) äquidistant verteilten Punkten. Der Fehler bestimmt sich aus der Differenz zwischen Stage-Position und Kameramessung. Bilddaten aus [6].

Wiederholbarkeit.

Um die Verbesserung durch die MP-Methode zu evaluieren, werden die 25 Replikationen einzeln ausgewertet. Hierzu wird das Messbild sowie der Referenzbilderstapel so angepasst, dass je nur ein Bildausschnitt mit einer DH-PSF für die Korrelationsauswertung genutzt wird. Die Auswertung zeigt, dass durch die MP-Replikation die Tiefenrekonstruktion um bis zu einen Faktor 3 verbessert wird. Der Dynamikbereich der vorgestellten Messmethode ergibt sich aus dem Quotient aus Messbereich und Genauigkeit zu $20 \text{ mm} / 8,51 \mu\text{m} = 2350$ und liegt damit deutlich über dem Dynamikbereich vergleichbarer Einzelbild-Messsysteme. Trotz dieses vielversprechenden Ergebnisses gibt es noch weitere Bereiche die untersucht werden müssen, um die vorgestellte Methodik in einem kostengünstigen 3D Kamerasensor anwenden zu können. Diese umfassen unter anderem Off-Axis Messungen, laterale Positionsbestimmung der DH-PSFs und die 3D Kalibrierung.

3 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein Kameramesssystem vorgestellt, mit dem der Abstand einer oder mehrerer Punktlichtquellen mit einer Genauigkeit von 8,51 μm über einen Tiefenmessbereich von 20 mm gemessen werden können. Die PSF des Abbildungssystems wird durch ein DOE so modifiziert, dass ein Cluster aus 25 DH-PSF entsteht, deren Form sich abhängig vom Abstand ändert. Ein Einsatzgebiet für einen solchen 3D Kamerasensor könnte die Verfolgung von Punktlichtquellen, die am Werkzeugmittelpunkt einer Fräsmaschine oder eines 3D-Druckers angebracht sind, sein.

Funding

Deutsche Forschungsgemeinschaft (279064222)

Literatur

- [1] S. Jia et al., "Isotropic 3d super resolution imaging with self-bending point spread function," *Biophysical Journal* **104**(2), 668a (2013)
- [2] Y. Shechtman et al., "Optimal point spread function design for 3d imaging," *Physical Review Letters* **113**(13), 133902 (2014)
- [3] M. D. Lew et al., "Corkscrew point spread function for far-field three-dimensional nanoscale localization of pointlike objects," *Optics Letters* **36**(2), 202–204 (2011)
- [4] M. Baránek and Z. Bouchal, "Optimizing the rotating point spread function by SLM aided spiral phase modulation," *Proceedings of SPIE* **161**(9441), (2014)
- [5] T. Haist et al., "Multi-image position detection," *Optics Express* **22**(12), 14450–14463 (2014)
- [6] S. Hartlieb et al., "Accurate single image depth detection using multiple rotating point spread functions," *Optics Express* **30**, 23035–23049 (2022)