

Iterative Phasenrekonstruktion mit einem diffraktiven Element

Xiyuan Liu, Karl-Heinz Brenner

Lehrstuhl für Optoelektronik, ziti, Universität Heidelberg

<mailto:xiyuan.liu@ziti.uni-heidelberg.de>

Mit einem diffraktiven Element wurde der Einsatzbereich der klassischen iterativen Phasenrekonstruktion auf nicht-raue Phasenverteilungen erweitert. Das diffraktive Element verbessert nicht nur die Konvergenz der Iteration, es bietet auch Vorteile, die weder bei einem refraktiven Element noch bei einem unregulären Diffuser zu finden sind.

1 Einführung

Die Phasenrekonstruktion von Lichtsignalen hat eine Vielzahl von Anwendungen in der Messtechnik oder der Mikroskopie. Je nach Verwendung einer Referenzwelle lassen sich die Methoden in interferometrische und nicht-interferometrische Verfahren aufteilen. Dieses Verfahren basiert auf der iterativen Phasenrekonstruktion [1-4] aus mehreren Ebenen und ist damit eine nicht-interferometrische Methode.

2 Iterative Phasenrekonstruktion

Abbildung 1 illustriert, dass zunächst Intensitäten in mehreren Ebenen aufgenommen werden. Mit „Angular-Spectrum-Propagation“ werden die gemessenen Intensitäten mit einer geschätzten Phase von der ersten Ebene auf die benachbarte Ebene ausgebreitet. Die neu berechneten Intensitäten werden dann durch die gemessenen Werte ersetzt.

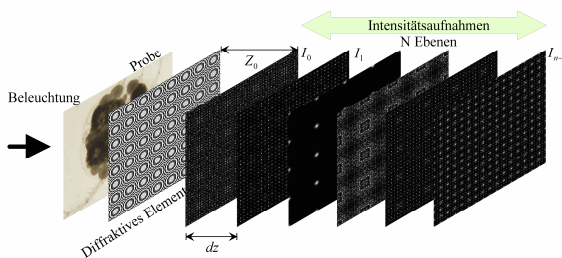


Abb. 1 Iterative Phasenrekonstruktion mit einem zusätzlichen diffraktiven Element

Eine Iteration beginnt und endet mit der ersten Ebene. Nach wenigen Iterationen wird die unbekannte Phase rekonstruiert. Die herkömmliche Phasenrekonstruktion ohne ein zusätzliches Element ist nur verlässlich für raue Phasenverteilungen. Für glatte Phasen hat das konventionelle Verfahren Konvergenzprobleme, es konvergiert entweder langsam oder führt zu falschen Werten. Zur Lösung des Problems führen wir ein zusätzliches diffraktives Mikrolinsenarray (DOE) zwischen Probe und erster Ebene der Intensitätsaufnahme

ein. Damit ist die Phasenrekonstruktion sowohl für glatte als auch für raue Phasen einsetzbar. Für die Toleranzanalyse werden drei Parameter – Z_0 , dz und N – variiert (siehe Abb. 1).

Das Rekonstruktionsergebnis ist eine Kombination von Probe und DOE. Um die Probe aus der Kombination zu extrahieren, benötigt das Verfahren einen weiteren Schritt: die Rekonstruktion des DOE. Durch Division der rekonstruierten Verteilung durch die komplexe DOE-Amplitude wird dieses eliminiert. Dabei ist wichtig, dass die Position des Elements zwischen den Messungen fixiert bleibt.

Als diffraktives Element verwenden wir ein binäres Mikrolinsenarray [5-7]. Die Besonderheit des Mikrolinsenarrays liegt daran, dass der Linsen-Pitch, die numerische Apertur (NA) und die Fokallänge nicht mehr starr miteinander verbunden sind. Der Benutzer kann die drei Parameter frei voneinander spezifizieren. Somit kann eine Überlappung der Linsen realisiert werden. Der Überlappfaktor ist definiert durch

$$\frac{NA_{design}}{NA_{cell}} \quad (1)$$

Ohne Überlappung tauchen unbekannte konstante Phasenverschiebungen innerhalb einzelner Mikrolinsen auf, die prinzipiell auch durch numerisches „stitching“ beseitigt werden können. Mit Überlappung lässt sich das „stitching“ vermeiden. Der linke Teil von Abb. 2 zeigt ein binäres Mikrolinsenarray mit einem Überlappfaktor von ca. dreifach.

Die Konvergenz der Iteration hängt von der Zahl der Ebenen ab. Mit mehr als 10 Ebenen konvergiert das Verfahren bereits nach 3 Iterationen. Die optimale Anzahl der Ebenen liegt zwischen 7 und 20. Die numerischen Simulationen bestätigen, dass das Verfahren insensitiv gegen Überbelichtung ist. Für den Parameter dz liegt der optimale Bereich bei einem DOE mit 10 mm Brennweite bei Werten größer als $350\mu\text{m}$. Wegen der Quantisierung bei der Aufnahme sollten die Intensitätsebenen nicht zu nah am Fokus liegen, da ansonsten

der dynamische Bereich für eine 8-bit Bitmapkodierung nicht ausreichend ist.

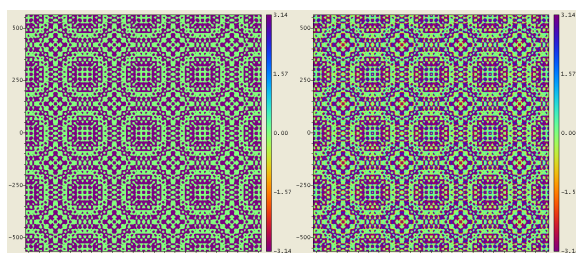


Abb. 2 Simulierte Rekonstruktion des DOE-Elements. Links: originale Phase; rechts: rekonstruierte Phase. Der Phasenfehler beträgt 0,398 rad (RMS).

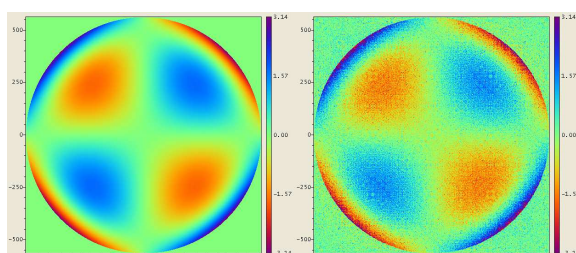


Abb. 3 Simulierte Rekonstruktion des Standard Zernike-Polynoms Z13 als Probe. Links: originale Phase; rechts: rekonstruierte Phase. Der Phasenfehler beträgt 0,435 rad (RMS).

Abbildungen 2 und 3 zeigen numerisch simulierte Rekonstruktionen des verwendeten diffraktiven Mikrolinsenarrays und eines Standard-Zernike-Polynoms Z13 als Probe. Die rms-Phasenfehler betragen jeweilig ein Fünftel bzw. Viertel der Wellenlänge.

3 Vergleich mit Diffuser

Die Phasenrekonstruktion mit einem unregulären Diffuser statt einem regulären diffraktiven Mikrolinsenarray wurde auch von anderen Autoren vorgeschlagen [8,9]. Die Qualität der Rekonstruktion hängt von der Größe der einzelnen Strukturelemente auf dem Diffuser ab. Die Unsicherheit des Verfahrens mit dem Diffuser besteht darin, dass sich bei der Rekonstruktion Phasenanomalien bilden, welche die Konvergenz beeinträchtigen.

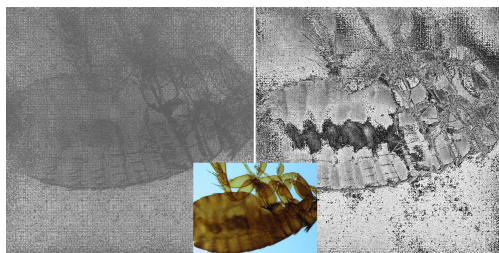


Abb. 4 Experimentelle Rekonstruktion eines Hundeflohpräparats. Links: Amplitude; Rechts: Phase; Farbig: Mikroskopaufnahme.

4 Experimentelle Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die erste experimentelle Rekonstruktion eines Hundeflohpräparats aus zehn Intensitätsebenen nach vier Iterationen. Das farbige Bild in der Mitte ist das Mikroskopbild, das linke Bild die rekonstruierte Amplitude und das rechte die Phase. Als Lichtquelle haben wir statt eines Lasers eine LED verwendet.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein neues Verfahren für die Phasenrekonstruktion vorgestellt. Durch Kombination der traditionellen iterativen Phasenrekonstruktion mit einem diffraktiven Phaselement liefert das Verfahren für eine breite Klasse von Lichtverteilungen eine vollständige Rekonstruktion von Amplitude und Phase. Es bietet daher eine echte Alternative zur Holografie. Die rekonstruierten Objekte können auch numerisch refokussiert werden. Im Gegensatz zur Off-Axis-Holografie hat das Verfahren die volle räumliche Bandbreite. Eine Referenzwelle wird nicht benötigt. Da eine LED als Lichtquelle ausreicht, tritt auch kein kohärentes Speckle-Rauschen auf.

Literatur

- [1] R. W. Gerchberg, W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik* **35**, 237-246 (1972)
- [2] J. R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison," *Appl. Opt.* **21**, 2758-2769 (1982)
- [3] G. Pedrini, W. Osten, Y. Zhang, "Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes," *Opt. Lett.* **30**, 833-835 (2005)
- [4] P. Almero, G. Pedrini, W. Osten, "Complete wavefront reconstruction using sequential intensity measurements of a volume speckle field," *Appl. Opt.* **45**, 8596-8605 (2006)
- [5] K.-H. Brenner, R. Buschlinger, "Parallel image scanning with binary phase grating," *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Publ.* **6**, 11024 (2011)
- [6] B. Hulsken, D. Vossen, S. Stallinga, "High NA diffractive array illuminators and application in a multi-spot scanning microscope," *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Publ.* **7**, 12026 (2012)
- [7] X. Liu, T. Stenau, K.-H. Brenner, "Diffractive micro lens arrays with overlapping apertures," 11th Euro-American Workshop on Information Optics, Quebec, Canada (2012)
- [8] P. F. Almero, S. G. Hanson, "Random phase plate for wavefront sensing via phase retrieval and a volume speckle field," *Appl. Opt.* **47**, 2979-2987 (2008)
- [9] P. F. Almero, S. G. Hanson, "Object wave reconstruction by speckle illumination and phase retrieval," *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Publ.* **4**, 09002 (2009)