

Forschungsergebnisse

Photonik, Mikroelektronik, Informationstechnik: Intelligente optische Sensorik

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Adaptive chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie

Adaptive chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie

Im Forschungsprojekt AdaScope wurde eine Messstrategie für die optische Oberflächenprofilometrie realisiert. Untersucht wurde ein adaptives konfokales Mikroskop mit drei Messstufen: einer Vormessstufe zur Begrenzung des axialen Messbereichs, einer Hauptmessstufe und einer Nachmessstufe zur Verfeinerung. Zudem kann ein Referenzarm hinzugeschaltet werden, wodurch spektrale Interferometrie zur Verfügung steht.

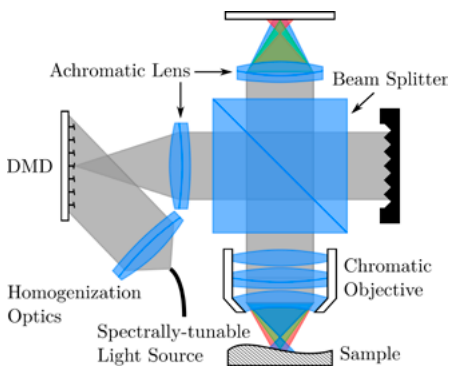


Abbildung 1: Darstellung des Messsystems mit einer programmierbaren Lichtquelle und einem chromatischen Objektiv. Die programmierbare Lichtquelle erlaubt sowohl das Spektrum des Lichtes vorzugeben, sowie auch den Ort von Punktlichtquellen zu variieren. Ermöglicht wird dies durch den Einsatz eines Mikrospiegellarays (DMD).

Im Projekt AdaScope wurde eine programmierbare Lichtquelle mit einem chromatisch konfokalen Mikroskop kombiniert. In dieser Kombination kann der Fokuspunkt lateral und axial per Software eingestellt werden. Zudem besteht die Freiheit, dass mehrere Fokuspunkte gleichzeitig gemessen werden können. Als wesentliche Forschungsfrage wurde untersucht, ob diese Flexibilität es erlaubt, schnellere Messungen durchzuführen. Nach dem Stand der Technik werden bei konfokalen Messungen alle Positionen lateral sowie axial mit einer vergleichsweise hohen Auflösung abgetastet. Im Projekt AdaScope wurde hingegen

versucht, nur wenige solcher Abtastvorgänge durchzuführen.

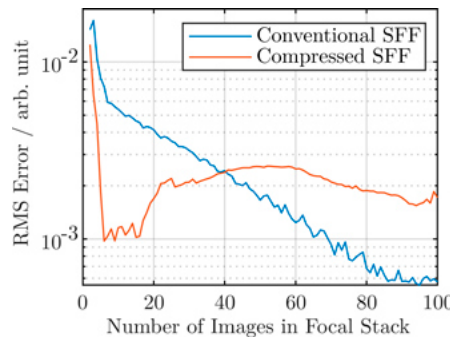


Abbildung 2: Abhängigkeit der Schätzgüte einer 3D Oberflächenmessung von der Anzahl der axialen Abtastungen. Die Anzahl Abtastungen entspricht der Anzahl der aufgenommenen Bilder.

Für die erste Vormessphase wird eine Compressive Shape-from-Focus-Methode genutzt, bei der die axiale Abtastung nicht durch Einzelmessungen erfolgt. Stattdessen stellt jede Abtastung eine gewichtete Linearkombination aller Fokusebenen entlang der optischen Achse dar. Im Vergleich zur herkömmlichen Shape from Focus-Methode ist die Bildaufnahme siebenmal schneller, da weniger Messungen durchgeführt werden müssen. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Abtastungen und der erzielbaren 3D Messunsicherheit ist in Abbildung 2 dargestellt.

Für die Hauptmessstufe wurden im Rahmen von AdaScope zwei neuartige Methoden entwickelt. Zum einen ein iteratives Messverfahren, basierend auf herkömmlichem konfokalem Abtasten. Neuartig ist die iterative dichtere Anordnung der lateralen Messpunkte. Dabei wird ausgenutzt, dass das laterale Übersprechen benachbarter konfokaler Messungen auch vom axialen Messbereich abhängt. Somit wird nach jeder Abtastung der axiale Messbereich lokal eingeschränkt und die lateralen Messpunkte können dadurch deutlich enger platziert werden.

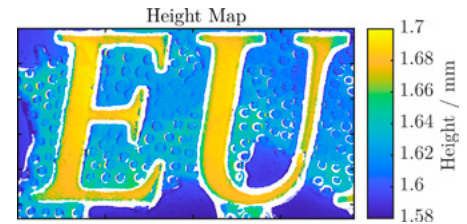


Abbildung 3: Höhengschätzung von einer Zwei-Euro-Münze mittels geneigter Fokusebene.

Eine weitere Möglichkeit für die Hauptmessstufe ist das direkte konfokale Scannen basierend auf einem geneigten Beleuchtungsfeld. Sowohl theoretisch als auch experimentell wurde gezeigt, dass das konfokale Signal auch bei einer Hellfeldbeleuchtung realisiert werden kann. Dazu muss die Beleuchtungsebene entsprechend der numerischen Apertur des Systems um einen bestimmten Winkel geneigt werden. Auf diese Weise ist es möglich, konfokale Messungen durchzuführen, ohne dass die Messpunkte zur Vermeidung von lateralem Übersprechen separiert werden müssen. Dies führt zu einer deutlich verbesserten Messgeschwindigkeit bei moderat reduzierter Empfindlichkeit (Siehe Abbildung 3). Das Messverfahren wurde zum Patent angemeldet.

Als dritter Messschritt wurde im Forschungsprojekt AdaScope eine Verfeinerung der konfokalen Messung entwickelt. Basierend auf einer physikalischen Modellierung wurden mittels Bayesian Experimental Design optimale axiale Abtastpunkte berechnet. Dazu muss ein Optimierungsfunktional ausgewertet werden, welches hochdimensionale Integrale beinhaltet. Die numerische Lösung dieser Integrale ist sehr rechenaufwendig und nicht in Echtzeit möglich. Zur Beschleunigung dieser Berechnung wurde eine Approximation mittels Neuronaler Netze entwickelt, wodurch eine um den Faktor 600 verkürzte Rechenzeit erzielt wurde.

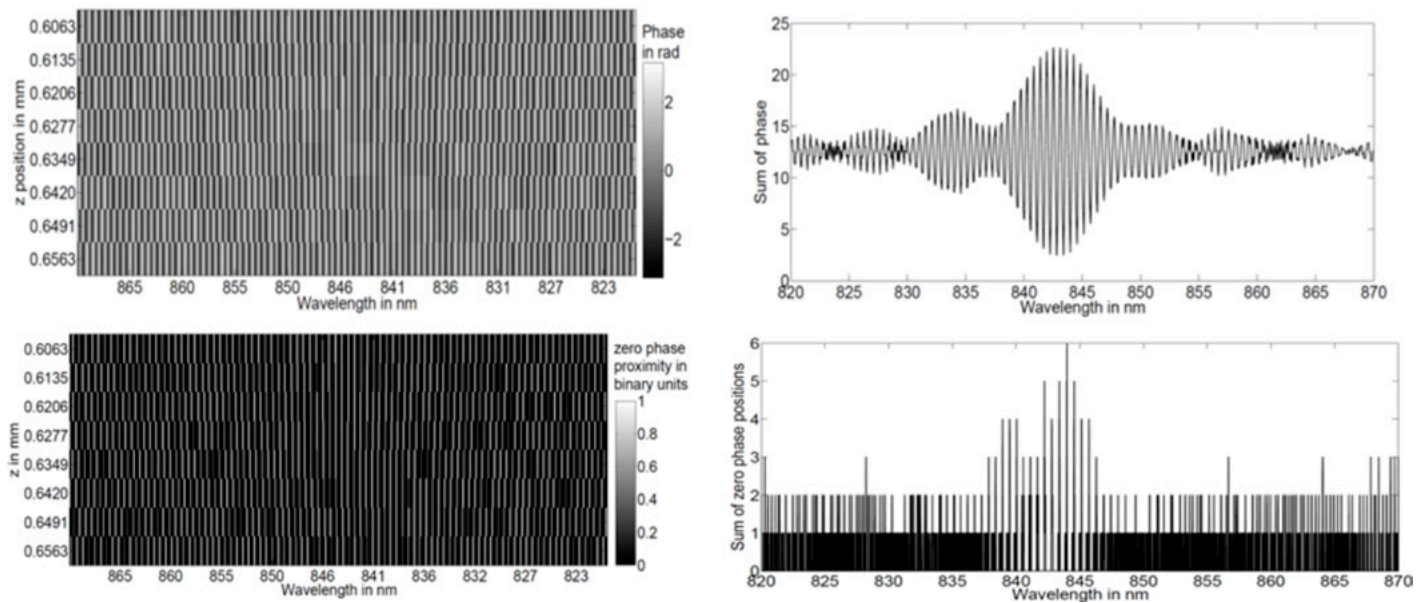


Abb. 4 Phase-equality-Verfahren. Oben links: Rücktransformation einzelner Pixel des Peaks im Fourierraum, oben rechts ihre Summe. Der Ort (ausgedrückt als Fokuswellenlänge) der kleinsten Summe ist der Messwert („Summed Phase Approach“). Unten links: Wie oben links, jedoch mit niedrigem Schwellwert > 0 binarisiert. Unten rechts ergibt sich der Messwert nun als der Ort, an dem die meisten Nullen auftreten („Zero Phase Approach“).

Mit einem zusätzlichen Referenzarm kann das adaptive Mikroskop im CC-SI-Modus (Chromatic Confocal Spectral Interferometry) betrieben werden. Die konfokale, chromatische, spektrale Interferometrie stellt bereits als Punktsensor sehr hohe Herausforderungen an den messtechnischen Auf-

bau. Aufgrund der hohen Sensitivität muss ein enormer Aufwand betrieben werden, um ein artefaktfreies Signal experimentell zu realisieren. Zudem beinhaltet das physikalische Messmodell komplexe nichtlineare Effekte, woraus sich hohe Anforderungen an die Signalverarbeitung ergeben. Im Rahmen von AdaScope wurde das physikalische Verständnis der spektral interferometrischen Messung signifikant verbessert und erstmals die flächige Messung demonstriert. Kernergebnis dieser Forschungsarbeiten sind neuartige Auswerteverfahren, welche eine robuste Auswertung ermöglichen (Siehe Abbildung 4).

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer
 Karlsruher Institut für Technologie
 – KIT
 Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)
 c/o Technologiefabrik
 Haid-und-Neu-Str. 7
 76131 Karlsruhe

Tel. +49 721 6091-211
 juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de
 www.kit.edu

Dr. Tobias Haist
 Universität Stuttgart
 Institut für Technische Optik (ITO)
 Pfaffenwaldring 9
 70569 Stuttgart

Tel. +49 711 685-66069
 Fax +49 711 685-66586
 haist@ito.uni-stuttgart.de
 www.ito.uni-stuttgart.de