

Ein neuer Ansatz für den Phase-Unwrap bei der monokularen phasenmessenden Single-Shot Deflektometrie

Simon Hartel, Hanning Liang, Christian Faber

Hochschule Landshut – University of Applied Sciences

<mailto:simon.hartel@micro-epsilon.de>

Die Phasenmessende Deflektometrie ist ein weit verbreitetes Verfahren für die Vermessung spiegelnder Oberflächen. Es wird ein neuer Ansatz für einen kontextbetrachtenden Single-Shot Phase-Unwrap vorgestellt, der das Problem in einen R^3 -Vektorraum bestehend aus Normalenkandidaten der Messoberfläche verlagert, die aus einer monokularen Lösung des Höhenproblems resultieren.

1 Einführung

Die Phasenmessende Deflektometrie (PMD) [1] ist ein schnelles, hochpräzises und berührungsloses Verfahren für die Vermessung spiegelnder Oberflächen. Durch die Anwendung bei der Kontrolle von beispielsweise Gleitsichtgläsern, Kfz-Karosserieteilen oder Smartphone-Displays ist das Messverfahren für Industrie und Forschung von großer Bedeutung und bereits in vielen Bereichen etabliert.

Für die Messung stellt ein Bildschirm ein Muster mit sinusförmigem Intensitätsverlauf dar, das eine oder mehrere Kameras über das spiegelnde Objekt beobachten. Aus der Verzerrung des Musters wird die Oberfläche des Messobjektes rekonstruiert. Die Messinformation ist dabei in der Phase des beobachteten Musters codiert. Die Durchführung der Phasenmessenden Deflektometrie mittels nur einer Kamera (*monokular*) und einer einzelnen Aufnahme (*SingleShot* [2]) stellt eine komplexe Aufgabe dar. Sie erlaubt beispielsweise jedoch eine einfache Vermessung bewegter Objekte (vgl. Abb. 1).

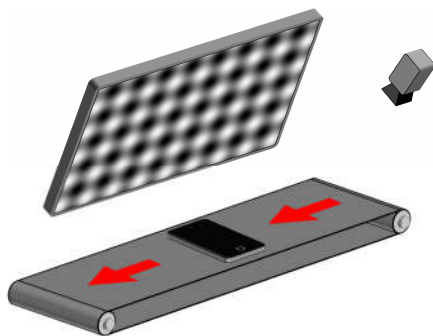


Abb. 1 Monokulare Single-Shot PMD für die Vermessung bewegter Objekte auf einem laufenden Förderband.

2 Phase-Unwrap und Stand der Technik

Aufgrund der Periodizität des verwendeten Musters ist die aus dem Kamerabild ermittelte Phase im Bereich $[0, 2\pi)$ der absoluten Musterphase nicht eindeutig zuordenbar. Die Auflösung dieser aus dem periodischen Sinusmuster resultierenden Mehrdeutigkeit wird als *Phase-Unwrap* bezeichnet.

Für die Gewinnung der absoluten Phase des Musters existieren verschiedene Vorgehensweisen. Gängig ist die Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereiches der Phase durch die Aufnahme von Mustern unterschiedlicher Frequenzen oder durch die Auswertung mehrerer Kameraperspektiven. Diese Verfahren sind für die monokulare Single-Shot PMD prinzipbedingt nicht geeignet. Stattdessen sind kontextbetrachtende Methoden bekannt. Sie beruhen auf einer oft pfadbasierten Erkennung von Sprüngen in der gemessenen Phase und rekonstruieren durch anschließende Integration die absolute Musterphase.

3 Neuer Ansatz

Im Gegensatz zu den bestehenden Verfahren wird ein neuer Ansatz für einen kontextbetrachtenden Phase-Unwrap vorgestellt, der durch das Einbringen von Vorwissen über die Signalentstehung das Problem in einen R^3 -Vektorraum bestehend aus Normalenkandidaten der Messoberfläche verlagert, die aus einer monokularen Lösung des Höhenproblems [3,4] bei unterschiedlichen Annahmen der unbekannteren Streifenordnung resultieren (vgl. Abb. 2).

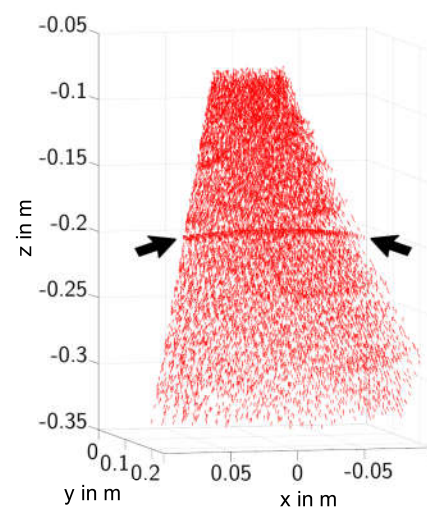


Abb. 2 Im resultierenden Normalenvektorfeld kann an der markierten Position die tatsächliche Messoberfläche bereits mit dem Auge erkannt werden.

Die Extraktion der tatsächlichen Messoberfläche aus diesem Normalenvektorfeld entspricht einem Phase-Unwrap.

4 Extraktion der Objektoberfläche

In Abb. 2 scheinen außer an der Stelle der tatsächlichen Oberfläche des Messobjektes – hier als Beispiel eine Kugel mit einem Radius von 0,5 m in Verbindung mit 60 möglichen Streifenordnungen – die Normalenvektoren „willkürlich verteilt“, wodurch der Mensch die Fläche im Vektorfeld gut lokalisieren kann.

Die als stetig und differenzierbar angenommene Messoberfläche kann deshalb aus dem Vektorfeld durch eine Klassifizierung jedes Normalenvektors anhand seiner lokalen Umgebung im R^3 extrahiert werden:

Damit ein Normalenvektor der tatsächlichen Oberfläche angehören kann, muss lokal an seiner Position eine glatte Fläche eingebettet werden können. Unter Berücksichtigung des Abtasttheorems erfordert dies Normalen mit ähnlicher Ausrichtung in seiner unmittelbaren und in Richtung der Sichtstrahlen un stetigen Umgebung im Vektorfeld. Nach diesem Prinzip kann mithilfe des Parameters der *maximal erwarteten Objektkrümmung* ein Positions- und Neigungskriterium für die Klassifizierung jedes Normalenvektors durch seine Nachbarnormalen definiert und die gesuchte Messoberfläche aus dem Vektorfeld extrahiert werden.

Die tatsächliche Oberfläche wird somit anhand der Variation der diskreten Umgebung jedes Normalenvektors gesucht, weshalb der Algorithmus im Folgenden als *diskrete Variationssuche* bezeichnet wird.

Durch eine iterative Anwendung der diskreten Variationssuche kann der zusätzlich eingeführte Parameter der maximal erwarteten Objektkrümmung effektiv eliminiert werden, so dass für einen erfolgreichen Phase-Unwrap ausschließlich Vorwissen bezüglich Stetigkeit und Differenzierbarkeit der Messoberfläche einzubringen ist.

5 Ergebnis

Als Ergebnis liefert dieser neuartige Ansatz für einen Phase-Unwrap direkt die bei der Phasenmessenden Deflektometrie gesuchten Oberflächennormalen. Aus diesen kann die Rekonstruktion der absoluten Musterphase im Sinne eines klassischen Phase-Unwraps erfolgen.

Die simulative Anwendung der diskreten Variationssuche zeigt, dass das erwartete und angestrebte Verhalten erzielt werden konnte und ein erfolgreicher Phase-Unwrap für einen monokularen Single-Shot-Deflektometrieaufbau über R^3 -Vektorräume durchgeführt werden kann (vgl. Abb. 3).

Aufgrund von Geometrieartefakten der monokularen Lösung des Höhenproblems [3] kann die Musterphase in der Bildmitte nicht vollständig rekonstruiert werden. Dies kann durch eine entsprechende Anordnung des Messaufbaus vermieden werden.

Der Nachweis einer prinzipiellen Machbarkeit des Verfahrens ist dadurch erbracht. Mit der diskreten Variationssuche wurde ein hochgradig parallelisierbarer Algorithmus für einen Phase-Unwrap vorgestellt, der weiterhin durch zusätzliches Vorwissen über das Messobjekt, beispielsweise einer Einschränkung des Suchbereichs im Vektorfeld, beschleunigt werden kann.

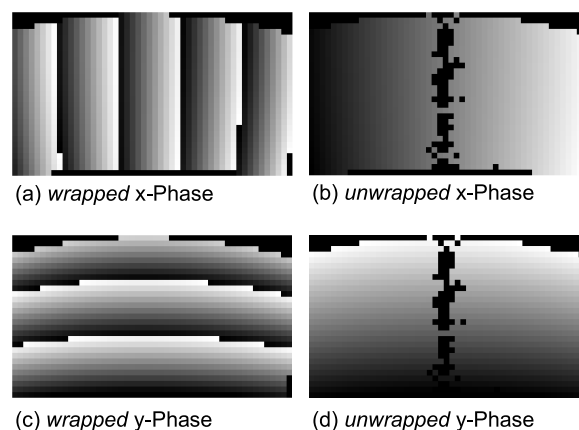


Abb. 3 Erfolgreicher Phase-Unwrap über ein R^3 -Vektorfeld durch eine diskrete Variationssuche.

Das vorgestellte Unwrap-Verfahren muss dabei nicht auf die Phasenmessende Deflektometrie beschränkt sein. Durch Anwendung auf ein allgemeines Phasenbild anhand eines erdachten, virtuellen Deflektometrieaufbaus könnte das Verfahren beispielsweise auch bei der Streifenlichtprojektion, der Interferometrie oder beim „Synthetic Aperture Radar“ (SAR) eingesetzt werden.

Literatur

- [1] G. Häusler: „Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder der Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten“, DE Patent 19944354 (1999)
- [2] Y. Liu, E. Olesch, Z. Yang and G. Häusler, “Fast and accurate deflectometry with crossed fringes”, *Adv. Opt. Techn.* 2014; 3 (4): 441-445
- [3] H. Liang, A. Zimmermann, R. Kickingeder, C. Faber: „Eine neue Methode zur Lösung des Höhenproblems in der Deflektometrie“, *Proceeding DGaO*, B14 (2019)
- [4] S. Savarese, M. Chen, P. Perona: „Local shape from mirror reflections“, *International Journal of Computer Vision* 64, S. 31-67 (2005)