

# Das Beste aus zwei Welten: Fusion von Phasenmessender Deflektometrie und Shape from Specular Flow

Hanning Liang, Christian Faber

Hochschule Landshut – University of Applied Sciences

[mailto: hanning.liang@haw-landshut.de](mailto:hanning.liang@haw-landshut.de)

Die Vermessung optisch blanker Oberflächen, wie z.B. von Kfz-Karosserieteilen, Rollenblech oder Mobiltelefon-Displays, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Für diese Aufgabenstellung existieren zwei Standardmessverfahren: *Phasenmessende Deflektometrie* (PMD) [1] und *Shape from Specular Flow* (SFSF) [2]. In diesem Beitrag werden die beiden Verfahren technisch verglichen. Eine mögliche Zusammenführung beider Verfahren wird vorgeschlagen, welche besonders für die Vermessung großer 360°-Objekte geeignet ist.

## 1 Einführung

PMD [1] und SFSF [2] sind etablierte Verfahren zur Vermessung spiegelnder Oberflächen, die in den Bereichen „optische Messtechnik“ und „Computer Vision“ jeweils getrennt eingeführt und optimiert wurden. Während PMD die Oberflächenneigung als Primärmessgröße vermisst und über aufwendige Kalibrierstrategien auf hohe Genauigkeiten abzielt, fokussiert SFSF mehr auf die lokale Krümmung und auf einfache, preiswerte Lösungen. Beide Verfahren finden seit Jahren Einsatz im industriellen Umfeld, wurden aber bisher weitgehend unabhängig voneinander entwickelt. Im Folgenden wird der Unterschied der Verfahren aufgezeigt und eine Zusammenführung vorgeschlagen.

## 2 Messprinzip beider Verfahren

Bei PMD wird die Lichtablenkung an der Oberfläche als Informationsträger verwendet. Dafür wird ein bekanntes sinusförmiges Muster auf einem kalibrierten Bildschirm angezeigt (Abb. 1, links), dessen Reflexion von einer Kamera erfasst wird.

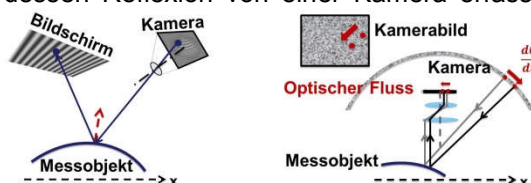


Abb. 1 Prinzipskizze von PMD (links) & SFSF (rechts).

Um die Korrespondenz zwischen Kamerapixeln und den entsprechend beobachteten Schirmpunkten zu ermitteln, werden etablierte Phasenschiebverfahren verwendet. Die lokale Neigung wird im Anschluss durch Strahlverfolgung gefunden.

Bei SFSF wird der „optische Fluss“ (OF) als Messsignal verwendet. Das Objekt wird von einer Kamera mit langer Brennweite in großem Abstand (näherungsweise telezentrisch) beobachtet (Abb. 1, rechts). Die beobachtete „Umgebung“ liegt im

Fernfeld. Die Kamera und das Objekt werden gleichzeitig um die gemeinsame Achse mit einer kontrollierten Winkelgeschwindigkeit gedreht. Auf diese Weise wird ein OF auf dem Kamerachip erzeugt, aus welchem die Oberfläche bestimmt wird.

Bei SFSF sind alle Sichtstrahlen parallel zur Achse. Mit der Umgebung im Fernfeld hat lediglich die Winkeländerung der Umgebungspunkte für den OF Bedeutung. Mittels dieser einfachen Geometrie werden die Krümmung bzw. Neigung, der OF und die bekannte Winkeländerung in Zusammenhang gebracht, welcher durch ein System von gekoppelten nichtlinearen PDGL („SFSF-Gleichungen“ [2]) dargestellt wird. Inzwischen wurde das Verfahren weiter entwickelt, so dass es auch für entozentrische Abbildungsoptiken geeignet ist [3]. Die Umgebung wird allerdings nach wie vor im Fernfeld angesetzt, was einen großen Bauraum erfordert.

## 3 Technischer Vergleich

Während bei der PMD ein kalibrierter Bildschirm mit bekanntem Muster im Nahfeld notwendig ist, wird bei SFSF eine unbekannte Umgebung im Fernfeld verwendet. Dies erfordert fast keine Kalibrierung, stattdessen aber einen großen Bauraum. Ein weiterer Unterschied liegt in der Abbildungsoptik: Während bei der „klassischen“ PMD entozentrische Optiken Einsatz finden, werden beim „klassischen“ SFSF telezentrische Optiken verwendet, wodurch das verfügbare Messfeld stark begrenzt und das Verfahren sehr kostenintensiv wird (eine Ausnahme bildet [3]).

Wegen der unbekanntenen Beleuchtungsrichtung bei PMD kann die Neigung durch Strahlverfolgung ohne eine bekannte Höhe nicht eindeutig ausgewertet werden. Die Höhe „mischt“ als unerwünschte Störgröße in die Auswertung mit hinein [4]. Ohne die Verwendung von Zusatzinformationen kann man die Oberfläche nicht eindeutig vermessen (sog. „Regularisierungsproblem“; siehe [4]).

Beim SFSF Verfahren hängt der OF vornehmlich von der lokalen Oberflächenkrümmung als Primärmessgröße ab. Allerdings fließen auch hier weitere Störgrößen mit ein: Um das in Abs. 2 dargestellte nichtlineare PDGL-System spezifisch zu lösen, sind Anfangswerte in Form bekannter Objektpunkte mit bekannter Neigung erforderlich. Dafür wird der Objekttrand verwendet [2], an dem die Neigung senkrecht zur Beobachtungsrichtung angenommen wird. Dies begrenzt wiederum das Messfeld.

Der Hauptnachteil der PMD ist die zeitliche Sequenz der Bildaufnahme. Für die Vermessung großer Objekte ist somit ein Stop & Go Prozess erforderlich. Bei SFSF wirken sich hauptsächlich die kostenintensive telezentrische Optik, das durch die Objektberandung eingeschränkte Messfeld und der aufgrund der Umgebung im Fernfeld erforderliche große Bauraum nachteilig aus.

#### 4 Zusammenführung

Als eine erste Brücke zwischen PMD und SFSF kann das Verfahren der „*richtungscodierten Deflektometrie*“ (RCD) [5] dienen, da dessen Grundaufbau mit telezentrischer Optik und unendlich weit entferntem Muster dem SFSF sehr ähnlich ist. Ein sinusförmiges Muster wird auf eine Mattscheibe projiziert (Abb. 2, links). Ein Spezialobjektiv im Abstand der Brennweite bildet das Muster nach Unendlich ab („Fernfeld-Anforderung“ von SFSF). Dadurch wird jede Phase auf der Mattscheibe eindeutig in eine Beleuchtungsrichtung abgebildet (Richtungscodierung). Mit einer telezentrischen Beobachtung (ähnlich dem Standard-SFSF-Verfahren) werden die reflektierten Streifenmuster aufgenommen (Abb. 2, rechts). Diese definiert eine konstante Sichtrichtung für das gesamte Messfeld. Dadurch wird das Objekt eindeutig ausgewertet (kein „Hineinmischen“ von Höheninformation).

Im hier vorgeschlagenen Fusionansatz wird der RCD-Aufbau weiter verwendet. Zur Auswertung wird aber nicht an jeder Position eine Phasenschiebung durchgeführt, sondern das System wird rund um das Objekt *gedreht* (Abb. 3). Hierdurch wird (wie beim SFSF) ein OF mit bekannter Winkeländerung erzeugt. Durch diesen werden die Neigung und die Krümmung ausgewertet:

$$\frac{\frac{d\theta}{dt}}{\frac{1}{r} \cdot \sqrt{f_x^2 + 1}} = \frac{x \cdot (1 - \cos(\frac{d\theta}{dt})) - h \cdot \sin(\frac{d\theta}{dt}) + \frac{dx}{dt}}{\cos(\frac{d\theta}{dt}) - \sin(\frac{d\theta}{dt}) f_x} \quad (1)$$

wobei  $\frac{d\theta}{dt}$  die bekannte Winkelgeschwindigkeit,  $\frac{dx}{dt}$

der OF,  $f$  die Objektfläche,  $r = f_{xx}(1 + f_x^2)^{\frac{3}{2}}$  der Krümmungsradius und  $f_x, f_{xx}$  die partielle Ableitung in erster und zweiter Ordnung ist.

Man hat zwar noch das Anfangswertproblem – dieses löst man nun aber durch eine normale RCD- Auswertung an der ersten Messposition.

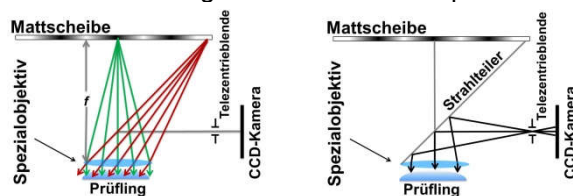


Abb. 2 Prinzipskizze des RCD Verfahrens [5].

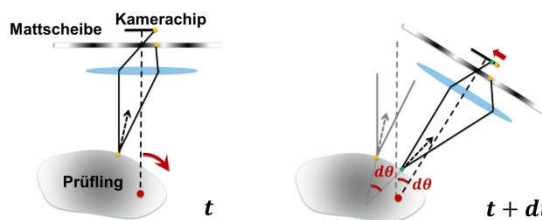


Abb. 3 Prinzipskizze des vorgeschlagenen Ansatzes.

Die Objektgröße ist dadurch nicht mehr vom Sichtfeld begrenzt. Der Hauptvorteil des Ansatzes ist, dass bei der Vermessung großer Objekte kein Stop & Go-Prozess mehr erforderlich ist. Anders als bei SFSF, bei dem sich das Messsystem *mit* dem Objekt bewegt (wodurch die Rückseite des Objekts nicht messbar ist), bewegt sich der Sensor hier *unabhängig* vom Objekt. Damit wird eine 360° Vermessung großer Objekte möglich.

#### 5 Offene Fragen

Der vorgeschlagene Ansatz hat zwei Nachteile: Zum einen wird nach wie vor eine messfeldbeschränkende und kostenintensive telezentrische Abbildungsoptik benötigt. Andererseits ist die Auswertung wieder von der Objekthöhe (Abstand des Objektpunkts vom Drehzentrum;  $h$  in Formel (1)) abhängig. Diese Nachteile sollen in zukünftigen Entwicklungen beseitigt werden.

#### Literatur

- [1] G. Häusler: „Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten“, Patent DE 19944354 (1999)
- [2] Y. Adato et al.: „Shape from specular flow“, in: IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, **32**(11), 2054-2070 (2010)
- [3] A. Pak: „Vorrichtung und Verfahren zum optischen Vermessen von Gegenständen mittels spiegelndem Fluss und Stereo-Regularisierung“, Patent DE 10 2014 224 273 B4 (2014)
- [4] M. C. Knauer, G. Häusler, R. Lampalzer: „Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Form und der lokalen Oberflächennormalen spiegelnder Oberflächen“, Patent DE 102004020419 B3 (2004)
- [5] R. Seßner, G. Häusler: „Richtungscodierte Deflektometrie“, Proc. DGaO 115, A16 (2004)