

Analyse und Kompensation von Phasenfehlern in der Streifenprojektionstechnik

Christian Bräuer-Burchardt, Peter Kühmstedt, Stefan Heist, Gunther Notni

Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena

<mailto:christian.braeuer-burchardt@iof.fraunhofer.de>

Es wird ein Verfahren zur Analyse und Korrektur von Phasenfehlern in mittels Streifenprojektionstechnik generierten zweidimensionalen Bilddaten vorgestellt, dessen Anwendung eine Verbesserung der Genauigkeit von 3D Messdaten mit gestörten Phasen bewirkt. Dabei kommt ein allgemeines Fehlermodell zur Anwendung, welches auch lokal unterschiedlich gestörte Phasen beschreibt.

1 Einleitung

Phasenfehler sind eine der Ursachen unzureichender Messgenauigkeit von berührungslos messenden 3D Oberflächensensoren auf Grundlage der Streifenprojektionstechnik. Neben zufälligen Phasenfehlern, die sich durch geeignete Filteroperatoren reduzieren lassen, treten häufig systematische Phasenfehler auf, die sich bei exakter Kenntnis vollständig kompensieren lassen. Problematisch kann jedoch die Schätzung des fehlerfreien Messwertes sein. Am effektivsten ist es, systematische Phasenfehler durch die Behebung meist technischer Fehler gar nicht erst entstehen zu lassen. Dies ist jedoch nicht immer möglich.

Aus der Literatur ist eine Reihe von Arbeiten bezüglich Phasenfehleranalyse und -korrektur bekannt. In [1] wird eine umfangreiche Analyse von Phasenfehlern durchgeführt, und Kompensationsansätze werden gegeben. Zhang und Huang [2] schlagen eine Methode zur Korrektur der Projektor-Gamma-Funktion durch LUTs vor, während de Groot und Deck [3] eine polynomiale Approximation zur Korrektur von Phasenschiebefehlern beschreiben.

2 Ursachen von Phasenfehlern

Phasenfehler können entweder systematischer Natur sein oder zufällig auftreten. Ist die Ursache systematischer Fehler bekannt, können diese bereits durch Vermeidung der Fehlerquelle oder a-priori kompensiert werden. Zufällige Fehler können meist nur durch Mittelung oder Filterung verringert werden.

Ist die Ursache systematischer Phasenfehler jedoch unbekannt, ergibt sich entsprechend den Anforderungen an die Messtechnik die Notwendigkeit der Phasenfehlerkorrektur.

Die Größenordnung systematischer Phasenfehler, die durch Diskretisierungseinflüsse entstehen, können analytisch abgeschätzt werden und z.B. durch Erhöhung des Dynamikbereiches (Rundungsfehler) oder andere Maßnahmen wie Korrek-

turfunktionen (Phasenshift-Fehler) geeignet reduziert werden [1]. Das Hauptziel des Korrekturverfahrens liegt in der Kompensation systematischer unbekannter Phasenfehler.

3 Analyse und -Korrektur

Treten bei einem Messsystem systematische Messfehler auf, die auf Phasenfehler zurückzuführen sind, ist zunächst eine experimentelle Fehleranalyse durchzuführen. Dazu werden gestörte Phasenmesswerte erzeugt, für die eine Schätzung der korrekten Werte möglich ist. Dies kann z.B. durch Projektion auf eine ebene Fläche erfolgen.

Die gestörten Phasenwerte werden durch Messwertaufnahme und zeitliche Mittelung über einen geeigneten Zeitraum hinweg bestimmt. Zur Analyse des Ortseinflusses sollte die Messwertaufnahme orts aufgelöst und gut verteilt über das gesamte Messvolumen hinweg erfolgen.

Bei Verwendung einer ebenen Fläche verhält sich die gemessene Sollphase annähernd linear. Die niederfrequentesten Abweichungen werden als tatsächlicher Phasenverlauf interpretiert, während hochfrequente Abweichungen als Phasenfehler angesehen werden müssen.

Hieraus leitet sich der folgende Algorithmus A1 zur Gewinnung einer Phasenfehler-Korrektur ab:

- Definition des Analysevolumens (AV)
- Definition von Referenzebenen im AV und Analyse-Stützstellen (ASS)
- Schätzung der korrekten Phasenwerte an den ASS (Mittelwertbildung und Filterung)
- Schätzung der Phasenfehler-Funktion durch Differenzbildung und Mittelung
- Analyse der Ortsabhängigkeit
- Falls vorhanden → Finden einer Funktion, die die Ortsabhängigkeit beschreibt, sonst Mittelung über gesamtes AV

Im Ergebnis der Anwendung von A1 liegen entweder eine oder mehrere ortsabhängige Fehlerfunktionskurven vor. Das weitere Vorgehen legt eine heuristische Vorgehensweise nahe. Liegt eine

Ortsabhängigkeit vor (die geeignet statistisch nachgewiesen werden muss), empfiehlt es sich, eine funktionale Beschreibung für den Phasenfehler zu finden, um die Ortsabhängigkeit ggf. durch lineare Koeffizienten beschreiben zu können.

Ein allgemeiner Ansatz einer solchen Funktion ist z.B. eine trigonometrische Summenfunktion

$$\Delta\varphi(\varphi) = \sum_{i=1}^n (k_i \sin(a_i \varphi + \alpha_i) + c) \quad (1)$$

wobei die a_i und k_i Skalierfaktoren und die α_i Phasenshifts sind, und c eine Konstante ist. Die Koeffizienten a_i , k_i , und c und können durch Lösung eines Optimierungsproblems geschätzt werden.

4 Beispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele für systematische Phasenfehler und Kompensationsfunktionen gegeben. Das erste Beispiel beschreibt einen lokal unabhängig auftretenden, jedoch in Abhängigkeit von der Streifennummer alternierenden Phasenfehler, der bei Verwendung eines Sechs-Bild-Algorithmus (korrespondierend 60°-Phasenshift) auftrat. Die Ursache konnte nicht endgültig geklärt werden, vermutet wird jedoch ein schwacher Diskretisierungseinfluss, der durch die Kennlinienkorrektur nicht vollständig ausgeglichen werden konnte. Die zwei unterschiedlichen Fehlerkurven sind in Abb. 1 dargestellt.

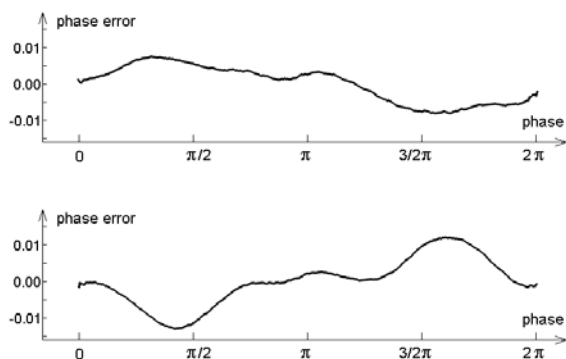


Abb. 1 Beispiel eines Zwei-Perioden-Phasenfehlers bei Verwendung einer 60°-phasenverschobenen Sechs-Bild-Sequenz. Das obere Profil zeigt den Fehler der ungeraden und das untere Profil den der geraden Perioden.

Das zweite Fehlerbeispiel stammt von einem 3D-Sensor, dessen Phasenerzeugung über einen Freiformspiegel und räumlich versetzt angeordnete Lichtquellen realisiert wird, wobei der lokale Sitz der Lichtquellen den Phasenshift erzeugt (siehe [4]). Die Ursache des Fehlers liegt in der prinzipbedingt hohen Abweichung vom angenommenen 90°-Phasenshift, die lokal unterschiedlich auftritt. Zur Illustration siehe Abb. 2. Alternativ ließe sich der Fehler bereits bei der Phasenberechnung durch einen anderen Algorithmus korrigieren.

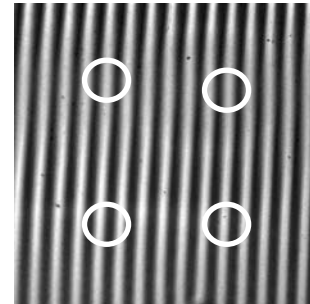
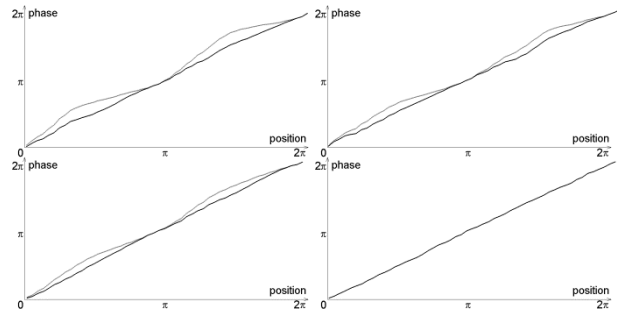


Abb. 2 Originale (grau) und korrigierte (schwarz) Phasenkurven (oben) einer gemessenen Ebene in vier Regionen (Kreise) des Messvolumens (unten).

Es konnte eine Fehlerfunktion der Form (1) mit $i=1$ gefunden werden, wobei als k lokal abhängige Koeffizienten gefunden wurden, die sich in Abhängigkeit von der Periodennummer pp und der y-Bildkoordinate als lineare Funktion

$$k = a \cdot y + b \cdot pp + c \quad (2)$$

ergeben. Die Parameter a , b und c lassen sich durch lineare Optimierung bestimmen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bei Auftreten von Phasenfehlern bewirkt die Anwendung des Verfahrens zu ihrer Korrektur eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit von 3D Messdaten. Zukünftige Arbeiten werden auf die Anwendung des Verfahrens auf eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren gerichtet sein.

Literatur

- [1] G.H. Notni and G. Notni, „Digital Fringe Projection in 3D Shape measurement - an Error Analysis“ in Proc SPIE 5144 (2003)
- [2] S. Zhang and P. Huang, „Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method“ in Opt Eng 46(6), 063601-1-9 (2007)
- [3] P.J. de Groot and L.L. Deck, „New algorithms and error analysis for sinusoidal phase shifting interferometry“ in Proc SPIE, 7063, 70630K, 1-14 (2008)
- [4] C. Bräuer-Burchardt, S. Heist, P. Kühmstedt, G. Notni, and S. Zwick, „Calibration of a free-form mirror for optical 3D measurements using a generalized camera model“ in Proc ISPA, 193-198 (2013)