

Temporale Phasentfaltung mittels zirkulärer Statistik und lokalen Nachbarschaftsinformationen

David Uhlig, Michael Heizmann

Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
mailto:david.uhlig@kit.edu

Multi-Frequenz-Phasenschiebeverfahren sind in der optischen Messtechnik weit verbreitet, da sie hohe Messgenauigkeiten liefern. Gleichzeitig führen sie jedoch zu Mehrdeutigkeiten, die erst mit Methoden der Phasentfaltung aufgelöst werden können. Wir präsentieren einen probabilistischen Ansatz, bei dem nicht nur die temporale Information zur Phasentfaltung genutzt wird, sondern zusätzlich noch die lokale Pixelnachbarschaft.

1 Einführung

In der phasenmessenden 3D-Messtechnik werden häufig die Pixel eines Mustergenerators mittels einer Musterserie codiert. Hierbei beobachtet eine Kamera die strukturiert beleuchtete Szene und decodiert die Referenzpixel, was zur Rekonstruktion der 3D-Gestalt genutzt werden kann. Bei Phasenschiebeverfahren wird ein Referenzpixel $x \in [0, 1)$ durch eine Sequenz von M sinusförmigen, phasenverschobenen Mustern mit Phase $\varphi(x) = 2\pi f x$ codiert [1]: $g_m(x) = A + B \cos(\varphi(x) + \frac{2\pi m}{M})$. Die Kamera beobachtet die Sequenz, woraus nun die ursprüngliche Phase φ und Phasenunsicherheit σ_φ geschätzt werden kann [2]. Höhere Frequenzen haben dabei eine geringere Unsicherheit zur Folge [2]: $\sigma_\varphi \sim \frac{1}{f}$. Jedoch kann die Phase für $f > 1$ nicht mehr eindeutig rekonstruiert werden, da Werte $\varphi(x) > 2\pi$ auf den Bereich $\varphi \in [0, 2\pi)$ abgebildet werden. Die Phase wird gefaltet und es zeigen sich 2π -Unstetigkeiten, siehe Abb. 1. Um den kontinuierlichen Phasenverlauf zu rekonstruieren, ist daher eine Entfaltung der Phase notwendig.

Temporale Phasentfaltungsmethoden haben den großen Vorteil, dass jedes Kamerapixel individuell entfaltet werden kann und eine absolute Phase erhalten wird. Dies ist insbesondere dann nützlich, wenn nur wenig über die zu untersuchende Oberfläche bekannt ist und örtliche Entfaltungsmethoden zu unzureichenden Ergebnissen führen würden. Multi-Frequenz-Verfahren verwenden mehrere Mustersequenzen mit unterschiedlichen Frequenzen f_i . Abhängig von den gewählten Frequenzen werden die einzelnen Phasen $\varphi_i \in [0, 2\pi)$ dabei unterschiedlich gefaltet (Abb. 1). Zur Entfaltung der Phase existieren verschiedene Ansätze [3]. Hierarchische Methoden vervielfachen die Frequenz nach jeder Messung und korrigieren Phasensprünge durch Information von der letzten Frequenz. Zahlentheoretische Methoden rekonstruieren die Phase mithilfe des chinesischen Restsatzes, sind wegen der zugrunde liegenden Ganzzahlarithmetik aber sehr rauschanfällig. Gemein haben die klassischen Algorithmen jedoch, dass sie nicht die gesamte zur Verfügung stehende

Information nutzen. Sie entfalten i. A. nicht alle Phasen gleichzeitig, beachten oftmals nicht die inhärent periodische Struktur, was zu fehlerhaften Entfaltungen führt, und weitaus bedeutender, die Schätzung der Unsicherheit wird für die Entfaltung komplett vernachlässigt. Damit diese Unzulänglichkeiten umgangen werden, erweitern wir einen probabilistischen Entfaltungsansatz [1], indem wir zusätzlich die lokale Pixelnachbarschaft in der Entfaltung berücksichtigen, was eine robustere Schätzung der Phase ermöglicht.

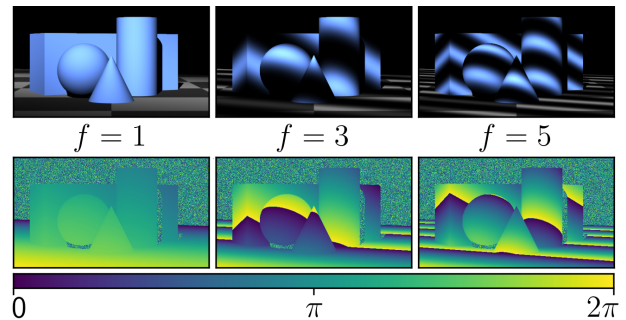


Abb. 1 Oben: Projizierte Sinusmuster. Unten: Für $f > 1$ wird die Phase gefaltet und die Decodierung ist mehrdeutig.

2 Probabilistische Phasentfaltung

In [1] wird erklärt, wie die Wahrscheinlichkeitsdichte der geschätzten Koordinate x in Abhängigkeit der gefalteten Phasenmessungen φ_i , den inversen der Phasenunsicherheiten $\kappa_i = 1/\sigma_{\varphi_i}^2$ und den gegebenen Frequenzen f_i mithilfe einer von-Mises-Dichtefunktion modelliert werden kann: $p(x|\varphi_i, \kappa_i, f_i) = I_0(\kappa_i)^{-1} \exp(\kappa_i \cos(2\pi f_i x - \varphi_i))$. Da jede Phasenmessung dieselbe Koordinate codiert und diese unabhängig voneinander durchgeführt werden, ergibt sich die Verbunddichte von x zu:

$$p_M(x) = \prod_i p(x|\varphi_i, \kappa_i, f_i) = \frac{e^{\sum_i \kappa_i \cos(2\pi f_i x - \varphi_i)}}{\prod_i I_0(\kappa_i)} \quad (1)$$

Maximieren dieser Dichtefunktion liefert die gesuchte Koordinate $\hat{x} = \arg_x \max p_M(x)$, wodurch implizit die optimale Decodierung und damit die simultane Entfaltung aller Phasenmessungen gefunden wird.

3 Nutzung der Nachbarschaftsinformationen

Bei vielen Aufgaben in der phasenmessenden 3D-Messtechnik werden Oberflächen wie Linsen, Parabolspiegel oder auch Karosserieteile aus der Automobilindustrie untersucht. Diese lassen sich größtenteils durch stetige Flächen beschreiben, wobei meist nur wenige Bereiche durch Sprünge und Kanten von dieser Beschreibung abweichen. Diese stückweise Stetigkeit hat zur Folge, dass benachbarte Kamerapixel ähnliche Phasenwerte auf der Oberfläche beobachten können, was im Weiteren dazu führt, dass benachbarte Pixel ähnliche Wahrscheinlichkeitsdichten besitzen. Es ist daher sinnvoll, diese zusätzliche Information in das probabilistische Framework zu integrieren, um Phasenrauschen weiter zu unterdrücken. Wenn benachbarte Pixel nun also nicht mehr unabhängig voneinander betrachtet werden sollen, dann lässt sich dies mittels einer gewichteten Überlagerung der einzelnen Dichten für jeden Bildpunkt (u, v) modellieren:

$$p(x(u, v)) = \sum_{\hat{u}, \hat{v} \in \mathcal{U}(u, v)} p(u, v | \hat{u}, \hat{v}) p_M(x(\hat{u}, \hat{v})), \quad (2)$$

wobei $\mathcal{U}(u, v)$ die Menge relevanter Nachbarschaftspixel darstellt. Da weiter entfernte Pixel einen geringen Einfluss haben und wir die örtliche Modellierung mit minimalem Wissen über lokale Gegebenheiten angehen wollen, modellieren wir die Übergangswahrscheinlichkeiten mithilfe einer Normalverteilung $p(u, v | \hat{u}, \hat{v}) := \frac{1}{2\pi\sigma_N^2} \exp\left(-\frac{(u-\hat{u})^2 + (v-\hat{v})^2}{2\sigma_N^2}\right)$. Anschließend kann wie schon zuvor die optimale Koordinate durch Maximieren der Dichtefunktion aus Glg. (2) gefunden werden: $\hat{x}(u, v) = \arg_x \max p(x(u, v))$.

Es ist dabei aber zu beachten, dass dieser Ansatz nur dann zu aussagekräftigen Ergebnissen führt, wenn die lokale Stetigkeitsannahme nicht verletzt wird. Um sicherzustellen, dass das gegebene Modell nur in stetigen Bereichen angewendet wird, müssen Diskontinuitäten erkannt werden. Hierzu benötigen wir einen einfachen Kantendetektor, der direkt mit den gefalteten Phasenmessungen φ_i arbeitet. Da aber die 2π -Diskontinuitäten, welche in den Messungen enthalten sind, keine Eigenschaft der Oberfläche darstellen, dürfen sie nicht fälschlicherweise erkannt werden (Abb. 1). Der folgende modifizierte Gradientenoperator arbeitet mit jeder einzelnen Phasenschätzung und detektiert Änderungen in der Oberfläche:

$$e_u(u, v) = \sum_i \left(\pi - \left| \left(\frac{\partial^2 \varphi_i(u, v)}{\partial u^2} \bmod 2\pi \right) - \pi \right| \right). \quad (3)$$

Die Anwendung in beide Bildrichtungen u und v ist dabei gegenüber 2π -Diskontinuitäten unempfindlich und liefert schließlich ein Gütemaß für die Erkennung einer Kante: $E(u, v) = e_u(u, v)^2 + e_v(u, v)^2$.

4 Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Kantendetektion für Abb. 1. Man erkennt, dass alle wesentlichen Unstetigkeiten in der Oberfläche erkannt werden können und 2π -Diskontinuitäten ignoriert werden. Dort, wo eine Kante detektiert wurde, muss die Modellierung nach Glg. (1) verwendet werden, wohingegen Überall sonst Glg. (2) genutzt werden kann. Abb. 3 zeigt den Vergleich mit einer hierarchischen [4] und einer zahlentheoretischen Methode [3] für verschieden starkes Phasenrauschen. Das gleichzeitige Nutzen der Phasenunsicherheit mit der Information aller Phasenmessungen und die damit implizite Entfaltung kann die Zuverlässigkeit stark erhöhen und macht die Vorteile der vorgestellten probabilistischen Methode deutlich. Dies führt zu einer höheren Robustheit gegenüber Rauschen als die herkömmlichen Verfahren und damit zu besseren Messergebnissen. Zusätzlich kann durch Modellieren der lokalen Pixelnachbarschaften die Phasenfaltung deutlich verbessert werden.

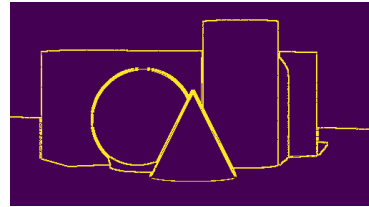


Abb. 2 Ergebnis der Kantendetektion.

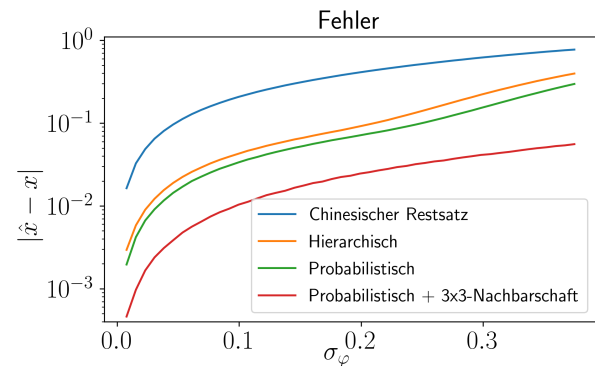


Abb. 3 Vergleich der Schätzfehler bei Phasenrauschen.

Literatur

- [1] D. Uhlig and M. Heizmann, "Temporale Phasenfaltung für Phasenmessende 3D-Messtechnik mittels zirkulärer Statistik," DGAO-Proceedings (A015) (2020).
- [2] M. Fischer, M. Petz, and R. Tutsch, "Model-based noise estimation for fringe projection systems," Sensoren und Messsysteme (2016).
- [3] C. Zuo, L. Huang, M. Zhang, Q. Chen, and A. Asundi, "Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review," Optics and Lasers in Engineering **85**, 84–103 (2016).
- [4] E. Lilienblum and B. Michaelis, "Optical 3D Surface Reconstruction by a Multi-Period Phase Shift Method," Journal of Computers **2**(2) (2007).