

Skalenübergreifende Streifenprojektion mittels Adaption der Triangulationsbasis

Peter Shobowale, Markus Kästner, Eduard Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover
<mailto:peter.shobowale@imr.uni-hannover.de>

Im Folgenden wird ein geplantes Forschungsvorhaben diskutiert, welches ein Streifenprojektionssystem mit variabler Triangulationsbasis und ein Lasertrackingsystem kombiniert, um Oberflächen skalen-, lage- und ortsadaptiert rekonstruieren zu können.

1 Einleitung

Im Bereich der optisch-dimensionellen Oberflächenrekonstruktion sind triangulationsbasierte Verfahren wie die Streifenprojektionsmesstechnik weit verbreitet. Der prinzipielle Aufbau besteht aus einem Projektor und einer Kamera, die beide auf ein Messobjekt ausgerichtet werden. Durch die Kamera wird hierbei unter einem Winkel projiziertes, strukturiertes Licht in Form von Streifenmustern erfasst. Die aus der Oberflächengeometrie des Messobjekts resultierende Verformung des Musters erlaubt die Rekonstruktion hochdichter Punktwolken.

Die endliche Auflösung sowohl des Projektors als auch der Kamera führt zu einem Zielkonflikt zwischen lateraler und axialer Sensitivität des Systems. Dies betrifft insbesondere Situationen, in denen die zu erfassenden Merkmale eine feine Struktur aufweisen, jedoch räumlich weit voneinander entfernt sind. In der Konsequenz besteht die Möglichkeit, entweder einen größeren Bildbereich mit geringerer räumlicher Auflösung oder einen kleineren Bildbereich mit hoher räumlicher Auflösung abzutasten. Im ersten Fall ist eine Erfassung der Feinstruktur nicht möglich, während im zweiten Fall eine 3D-Rekonstruktion der Oberfläche aus mehreren Einzelmessungen erforderlich ist. Dies geht jedoch mit einem zusätzlichen Zeit- bzw. Messaufwand einher und erfordert die präzise Bestimmung der Transformationen zwischen den Messungen.

Im Folgenden wird ein Messsystem diskutiert, welches sich den zuvor genannten Problemen mit einem flexibel gestalteten Grundaufbau und einer kontinuierlichen Absolutreferenzierung nähert, um beide Herausforderungen zu bewältigen.

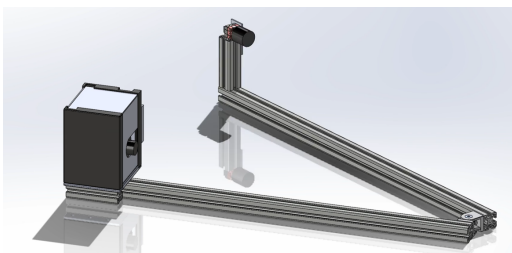


Abbildung 1 Versuchsaufbau

2 Konzept

Den Kern des Aufbaus bildet ein Streifenprojektionssystem, bei welchem die Kamera und der Projektor über ein mechanisches Gelenk verbunden sind (Abb. 1). Hierüber können der Triangulationswinkel und der Arbeitsabstand manuell variiert werden, um sowohl Einfluss auf das Messvolumen, als auch die axiale und laterale Auflösung zu nehmen. Die Lage und Orientierung von Projektor und Kamera wird über jeweils drei starr mit den Gehäusen verbundene Retroreflektoren durch die Lasertrackingeinheiten eines Absolute Multiline (Hexagon AICON ETALON GmbH, Braunschweig) absolutinterferometrisch erfasst. Aufgrund dieser Erfassung kann sowohl die aktuelle Sensorkonfiguration (Triangulationswinkel und Arbeitsabstand) bestimmt werden, als auch Messungen an unterschiedlichen Orten direkt zueinander referenziert werden.

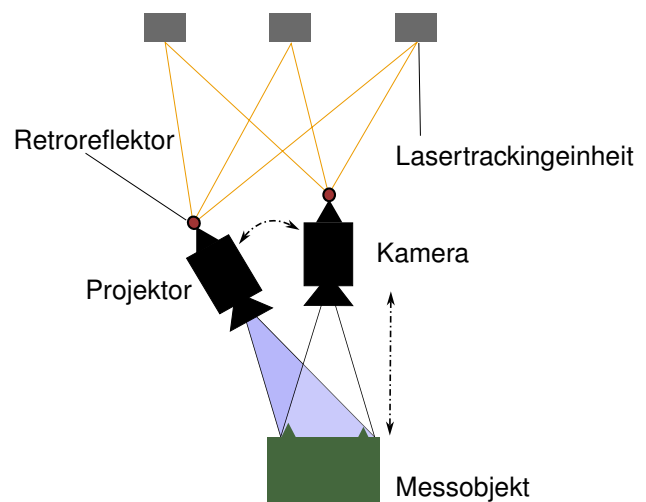


Abbildung 2 Posenbestimmung durch das Absolute Multiline

3 Herausforderungen

Das adaptive Triangulationssystem lässt sich grundsätzlich mit einem verzeichnungsbehafteten Lochkameramodell beschreiben und kann entsprechend initial kalibriert werden [1]. Unter der Voraussetzung konstanter Verzeichnungsparameter wäre die Änderung des Triangulationswinkels als Änderung der extrinsischen Kameraparameter modellierbar und keine erneute Kalibrierung notwendig. Diese Annahme gilt jedoch nur, sofern sich der Arbeitsabstand nicht verändert, da eine größere Änderung den Schärfentiefebereich sowohl der Kamera als auch des Projektors verlassen könnte und durch unscharfe Abbildung einen Abfall der optimalen Streifenfrequenz bedingt und demnach mit einem Verlust der räumlichen Sensitivität einhergeht. Eine Anpassung auf größere Arbeitsabstände könnte gegebenenfalls durch eine Refokussierung realisiert werden, was jedoch eine Modifikation der intrinsischen Kamera- bzw. Projektorparameter zur Folge hätte. In Vorarbeiten wurde gezeigt, dass eine fluidoptische Kamerafokussierung ein schnelles Ansprechen bei hoher Reproduzierbarkeit ermöglicht und die intrinsischen und extrinsischen Parameter gut approximierbar sind (vgl. [2]).

Bei der Auswahl der optimalen Pose für eine Messsituation sind jedoch neben der Schärfentiefe weitere geometrische Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Die Antastunsicherheit ist dabei nicht konstant über das Messvolumen verteilt, sondern ist von der konkreten Lage und Orientierung des Messobjektes zum verwendeten Streifenprojektionssystem abhängig. Erschwerend kommen die Wechselwirkung zwischen der Intensität, Frequenz und Richtung des verwendeten Streifenmusters [3] hinzu. Eine projektorseitige Unschärfe kann so beispielsweise bei niederfrequenten Streifenmustern Diskretisierungsartefakte mindern, führt jedoch bei hochfrequenten Streifenmustern zu einer Dämpfung der Intensität. Aus der hohen Anzahl an räumlichen Freiheitsgraden folgt dadurch ein Mehrdeutigkeitsproblem, da prinzipiell mehrere Sensorkonfigurationen ein Merkmal erfassen können. Hierbei weisen diese jedoch unterschiedliche Sensitivitäten und Unsicherheiten auf.

4 Messposenplanung

Die teilweise ambivalenten Wechselwirkungen und Mehrdeutigkeiten erfordern eine modellhafte Messposenplanung. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieses Problems könnte in der Anwendung heuristischer Verfahren zur Auswahl geeigneter Messpositionen bestehen, wie sie von Weickmann [4] beschrieben wurden. In diesem Zusammenhang wird die Antastunsicherheit in unterschiedliche Anteile, darunter mehrere systematische sowie einen richtungsabhängigen, aufgespalten. Der richtungsabhängige Anteil beschreibt die zuvor empirisch ermit-

telte Unsicherheit in Abhängigkeit des Winkels zwischen dem Oberflächennormalenvektor des Messobjektes und dem Kamerahauptsichtstrahl für eine feste Konfiguration des Streifenprojektionssystems (feste Streifenfrequenz, Triangulationswinkel, Arbeitsabstand und Streifenprojektionsmuster). Die Abschätzung der Unsicherheit in Abhängigkeit der Messpose erfolgt hierbei über die Betrachtung der Referenzgeometrie bzw. für jedes entsprechende Dreieck eines Sollmeshes als Kombination aller Unsicherheitsanteile. Dieser Ansatz weist eine hohe Effizienz auf, allerdings ist die Generalisierbarkeit des richtungsabhängigen Anteils für abweichende Sensorkonfigurationen nicht zu erwarten. Die zusätzliche empirische Ermittlung dieser Unsicherheiten hingegen ist für jede mögliche Kombination aus Arbeitsabstand, Oberflächen- und Triangulationswinkel nicht praktikabel.

Als Alternative kann eine virtuelle Simulation der Oberflächenrekonstruktion zur Ableitung optimaler Systemparameter herangezogen werden. Vorarbeiten haben gezeigt, dass mit aktuellen Raytracing-Frameworks eine direkte Simulation des Strahlengangs vom Projektor zur Kamera realisierbar ist. In Abhängigkeit von der Komplexität der Simulation besteht die Möglichkeit, neben der tatsächlichen Konfiguration aus Streifenmuster, Triangulationswinkel und Arbeitsabstand weitere daraus resultierende physikalische Wechselwirkungen [3] zu simulieren. Dies umfasst beispielsweise Unschärfe oder das aus Reflexionen resultierende Störlicht. Der Rechenaufwand macht es hier jedoch erforderlich, den Zielkonflikt zwischen notwendiger und erforderlicher Modellierungstiefe zu lösen. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Konfigurationen wäre die Exhaustionsmethode bei voller Simulationstiefe nicht effizient genug. Eine Kombination mit einem heuristischen Ansatz oder Methoden des maschinellen Lernens könnten hier zielführender sein. Auf der Grundlage eines größeren Vorauswahlschritts könnten so beispielsweise nur die vielversprechendsten Posen durch ein darauffolgendes Raytracing untersucht werden.

Literatur

- [1] S. Feng, C. Zuo, L. Zhang, T. Tao, Y. Hu, W. Yin, J. Qian, and Q. Chen, "Calibration of fringe projection profilometry: A comparative review," *Optics and lasers in engineering* **143**, 106622 (2021).
- [2] L. Hinz, M. Kästner, and E. Reithmeier, "Adaptive camera calibration for a focus adjustable liquid lens in fiber optic endoscopy," in *Nonlinear Optics and Applications XII*, vol. 11770, pp. 96–110 (SPIE, 2021).
- [3] P. Middendorf, *Model-based Measurement Strategies for In-situ 3D Inspection of Complex Geometries* (TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2023).
- [4] J. Weickmann, *Assistenzsystem für die prüfung von blechbauteilen mit mehrkomponenten-streifenprojektionssystemen unter anwendung der "virtuellen rückdeformation"* (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Germany), 2010).