

Geschwindigkeitsoptimierung eines hochauflösenden, maschinenintegrierbaren 3D-Sensors auf Basis Streifenprojektion

Andreas Breitbarth^{*,**}, Ingo Schmidt^{*}, Peter Kühmstedt^{*}, Gunther Notni^{*}

^{*} Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF), Jena

^{**} Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Optik (IAP)

mailto:andreas.breitbarth@iof.fraunhofer.de

Die automatische Inspektion industrieller Zwischenerzeugnisse erfordert zunehmend hohe Ortsauflösungen bei gleichzeitig gestiegenen Anforderungen an die Messgeschwindigkeit. Zum Erreichen dieser Ziele wurde ein 3D-Hochgeschwindigkeitssensor basierend auf Streifenlichtprojektion entwickelt.

1 Einleitung

Die Technik des dreidimensionalen Vermessens hat sich in den vergangenen Jahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Möglichkeiten der Geschwindigkeit stark weiterentwickelt. Für die Inspektion industrieller Zwischenerzeugnisse ist oft eine Genauigkeit im einstelligen Mikrometer-Bereich essentiell. Zusätzlich zu dieser Forderung ist für die effektive Vermessung größerer Messobjekte, bei denen ein Einzelscan bei Weitem nicht ausreichend ist, eine kontinuierliche Durchführung von Einzelscans mit kurzer Zykluszeit zwischen diesen erwünscht.

2 Korrespondenzsuche mit Epipolargeometrie

Für die 3D-Rekonstruktion oder das 3D-Vermessen beliebiger Objekte ist die Korrespondenzfindung zwischen Punkten der zeitgleichen Kameraaufnahmen grundlegend. Bildpunkte werden dabei als korrespondierend bezeichnet, wenn sie Abbildung ein und desselben 3D-Weltpunktes sind. Das Suchproblem, welches sich grundsätzlich auf die gesamte 2D-Bildebene erstreckt, lässt sich durch aktive Projektion von Mustern auf kleinere Bereiche einschränken. Für die Projektion und spätere hochgenaue Auswertung haben sich Streifenmuster in Form von $(1 + \cos)$ -Mustern als sehr robust und präzise herausgestellt [1].

Bisher wurde für eine eindeutige Zuordnung von Punkten zwischen Kamerabildern des gleichen Aufnahmezeitpunktes eine Sequenz aus mehreren zueinander phasenverschobenen Streifenmustern projiziert. Diese Projektion wurde für die zweidimensionale Zuordnung in zwei, um jeweils 90° gedrehten Richtungen durchgeführt. Zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten zwischen den einzelnen $(1 + \cos)$ -Perioden ist die Projektion eines zusätzlichen Musters notwendig, z.B. einer Gray Code-Sequenz. Diese hohe Anzahl an Mustern pro Gesamtsequenz zur Erstellung eines 3D-Abbildes benötigt bei einer Auflösung von 5 Megapixel pro Kamera knapp eine Sekunde für die Bildaufnahme und mehr als zehn Sekunden Verarbeitungszeit.

Zur Beibehaltung der hohen Genauigkeit und großen Robustheit der beschriebenen komplexen Mustersequenz, aber trotzdem signifikanter Reduktion der Aufnahme- und Verarbeitungszeit, wurde die Annahme genutzt, dass die Systemanordnung des 3D-Sensors bekannt und fest ist. Dies ermöglicht die Verwendung der sogenannten Epipolargeometrie, wobei der Bereich möglicher Punktcorrespondenzen von der gesamten 2D-Bildebene auf eine Gerade, die sogenannte Epipolarlinie eingeschränkt wird.

Durch Anwendung der Epipolargeometrie ergeben sich damit folgende Beschleunigungen:

- Die Berechnungskomplexität für die Korrespondenzsuche reduziert sich von $O(n^4)$ auf $O(n^3)$, mit n als Bildkantenlänge.
- Die Epipolarlinienlage lassen sich komplett offline vor den eigentlichen 3D-Messungen bestimmen.
- Die zweite Projektionsrichtung kann entfallen, womit sich die Anzahl projizierter Muster halbiert.

3 Höhenbeschränkung der Messobjekte

Im Allgemeinen kann man bei vielen Messobjekten im Leiterplattenbereich davon ausgehen, dass sie einer Höhenbeschränkung unterliegen, d.h. ihre räumliche Ausdehnung in der z -Koordinate ist signifikant eingeschränkt. Diese Tatsache lässt sich zusätzlich nutzen, um die Epipolarlinien innerhalb der Bildebene auf kurze Segmente einzuschränken. Dabei geben die ins Kamerabild projizierten Maximallagen des jeweiligen Messobjektes die Endpunkte der Epipolarlinienssegmente an, die für praktische Anwendungen um einen Puffer von mehreren Pixeln erweitert werden. Das Durchsuchen dieser Segmente nach Korrespondenzpunkten erfolgt auf Grundlage binärer Suchalgorithmen, bei denen die Segmentlänge stetig halbiert wird. Auch hier ergibt sich ein großer Beschleunigungsfaktor gegenüber linearer Suche.

Beschränken sich die Epipolaresegmente, wie in unserem Fall von Leiterplatten, maximal auf die Projektionsbreite einer $(1 + \cos)$ -Periode, existieren keine Mehrdeutigkeiten in der Periodenzuordnung mehr und die Notwendigkeit des zusätzlich projizierten Gray Codes entfällt [2]. Insgesamt beschränkt sich die Anzahl projizierter Muster während einer Sequenz für ein 3D-Bild damit auf die Länge einer $(1 + \cos)$ -Sequenz in einer Projektionsrichtung, in unserem konkreten Fall auf sechs Muster mit jeweiligem Phasenversatz von 60° .

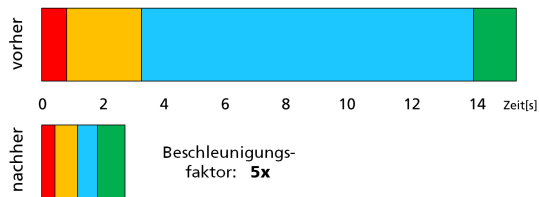


Abb. 1 Zeitspanne einer Einzelmessung vor (oben) und nach (unten) der Optimierung der Algorithmen. Aufteilung: Bildaufnahme (rot), Phasenbestimmung (gelb), Koordinatenberechnung (hellblau), Datenspeicherung (grün).

4 Betriebszyklus und Parallelität

Wie in Abb. 1 zu sehen, konnte die Gesamtzeit von Projektion, Aufnahme und 3D-Berechnung für ein 3D-Bild von ca. 15 Sekunden auf weniger als drei Sekunden reduziert werden (18%). Insbesondere die Bestimmung der 3D-Koordinaten konnte durch die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Algorithmen deutlich beschleunigt werden.

Im Praxiseinsatz lässt sich ein Messobjekt mit der angestrebten Genauigkeit im einstelligen Mikrometer-Bereich zumeist nicht mittels eines Einzelscans vollständig vermessen. Es ist also eine Vielzahl von Einzelmessungen notwendig, die zusammengesetzt die gesamte Objektrekonstruktion ergeben. Da die Einzelmessungen voneinander unabhängig sind, ist eine aufeinander folgende Bearbeitung in der Praxis nicht effizient. Gefordert ist eine zeitliche Parallelisierung, so dass bereits die nächste Datenaufnahme erfolgen kann, während sich vorherige Scans noch in der Berechnung befinden.

In der praktischen Umsetzung wurde ein 8-Kern-Rechner verwendet, der mit zwei Quad-Core-Recheneinheiten inkl. Hyperthreading bestückt war. Damit ergeben sich 16 logische Recheneinheiten, wobei 15 Prozessoren für die Parallelisierung der Messreihe genutzt wurden, die 16-te CPU behandelt ausschließlich die Systemlast und garantiert damit die zeitlich exakte Projektion und Bildaufnahme.

Eine Messreihe aus 30 in dieser Art parallelisierten Einzelmessungen inkl. jeweiligem Versatz des Messobjektes benötigt damit eine Gesamtzeit von 19 Sekunden vom Beginn der ersten Bild-

aufnahme bis zum Abschluss der Berechnung des letzten Einzelscans. Für einen Dauerbetrieb wesentlich relevanter ist die Länge eines Zyklus, d.h. die Zeitspanne zwischen dem Beginn zweier Einzelmessungen. Wie Abbildung 2 zu entnehmen ist, konnte eine Zykluszeit von 0,56 Sekunden erzielt werden, was bei einem Einzelmessfeld von $40\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ einer Messgeschwindigkeit von circa 35 cm/s bzw. 8,9 Mio. Pixeln pro Sekunde entspricht. Dieser Dauermessbetrieb integriert in einer Messmaschine mit Sensorkopfbewegung befindet sich in der industriellen Erprobung.

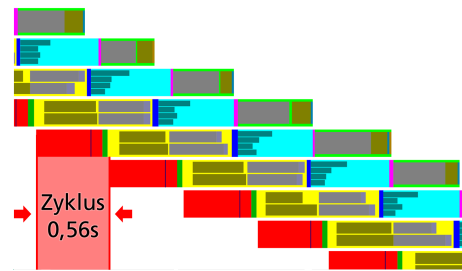


Abb. 2 Ausschnitt der Verschränkungsrampe von Einzelaufnahmen mit einer für den Dauerbetrieb geeigneten Zykluszeit von 0,56 Sekunden.

5 Zusammenfassung

Zur Verkürzung der Bildaufnahmezeit konnte die Anzahl zu projizierender und anschließend zu verarbeitender Muster bei leicht reduzierter Genauigkeit signifikant verkleinert werden. Entscheidend dafür sind die Nutzung der Epipolargeometrie und eine Einschränkung in der Höhenausdehnung des Messobjektes. Zur Beschleunigung der Datenauswertung wurde weiterhin das Auffinden von Punktkorrespondenzen deutlich beschleunigt. Hierzu wird der auf Epipolarlinien eingeschränkte Suchraum weiter auf kurze Segmente von Epipolarlinien reduziert und ein binärer Suchalgorithmus angewendet. Abschließend ist die gesamte Datenberechnung von der Phasenaufnahme bis zur 3D-Ausgabe der Punktwolke auf 15 Prozessoren parallelisiert worden. Damit können im kontinuierlichen Messmodus bis zu 8,9 Mio. Messpunkte pro Sekunde erzielt werden. Die Messgenauigkeit auf der Prüfoberfläche liegt dabei bei $5 - 8\ \mu\text{m}$.

- [1] W. Schreiber and G. Notni, "Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique," *Optical Engineering* **39**, 159–169 (2000).
- [2] C. Bräuer-Burchardt, C. Munkelt, M. Heinze, P. Kühmstedt, and G. Notni, "Fringe Code reduction for 3D Measurement Systems Using Epipolar Geometry," in *Proceedings PCVIA*, vol. XXXVIII of Part 3A, pp. 192–197 (2010).