

3-D-Koordinatenmessung durch optische Triangulation¹⁾

Von G. Seitz, H. Tiziani und R. Litschel²⁾

Das hier vorgestellte Drei-Koordinaten-Meßgerät arbeitet nach dem Prinzip der optischen Triangulation. Einzelne Punkte einer Oberfläche können gezielt angetastet und vermessen werden. Hierbei wurden Meßunsicherheiten von $\pm 0,1$ mm bei einer maximalen Meßgeschwindigkeit von 25 Punkten/Sekunde erreicht. Bei einem Meßabstand von 420 mm beläuft sich das Antastfeld auf 150×150 mm. Der optische Aufbau ermöglicht einen Abstandsmeßbereich von ca. 350 mm. Das Gerät eignet sich zur räumlichen Vermessung nichtspiegelnder Werkstückoberflächen. Da das Meßkonzept eine freie Vorgabe der Antastpunkte gestattet, sind Toleranz- und Vollständigkeitsprüfungsaufgaben in der Serienfertigung bevorzugte Anwendungen.

Einführung

Im Hinblick auf die Automation ist die dreidimensionale Meßtechnik für die Qualitätssicherung, den Formvergleich sowie zur Robotersteuerung wichtig geworden. Neben taktilen Verfahren werden in jüngster Zeit zunehmend berührungslose optische Verfahren angewendet. Eine Übersicht der optischen 3-D-Meßverfahren gibt Literatur [1]. Für 3-D-Messungen eignen sich besonders die Laufzeitmessung, Zwei-Wellenlängen-Verfahren mit Phasenmessung, Triangulationsverfahren und strukturierte Beleuchtung. Für industrielle Anwendungen sind Triangulationsverfahren mit punkt- oder linienweiser Antastung, besonders wegen ihres einfachen Aufbaus, geeignet.

Abstandsmessung durch optische Triangulation

Bild 1 zeigt eine Standardanordnung zur Abstandsmessung durch optische Triangulation. Ein Lichtstrahl S markiert auf dem Meßobjekt einen Punkt P, der durch die Optik L auf den ortssensitiven photoelektrischen Detektor T (zum Beispiel Photodiodenzeile, Linearposicon) in P' abgebildet wird. Durch die gegen den Antaststrahl geneigte Anordnung der Auswertoptik mit Detektor wird erreicht, daß sich der Abstand H des Antastpunkts in eine definierte Punkt-bildposition umsetzt. Aus der Punkt-bildposition und den Geometriedaten des Aufbaus errechnet sich der Abstand H. Durch entstehende Anordnung von Abbildungsoptik und Detektor kann die Scheimpflugbedingung erfüllt werden.

Zwei- und dreiachsige Objektvermessung

Zweidimensional erweiterbar ist dieses Meßprinzip durch gesteuertes Umlenken des Antaststrahls im Punkt D, zum Beispiel mit Hilfe eines Drehspiegels (Bild 1). Der Antastpunkt P ist dann entlang einer Linie frei wählbar. Die laterale Verschiebung des Antastpunkts ist jedoch mit einer Änderung des Feldwinkels verbunden. Da die Detektordynamik begrenzt ist (Positionsauflösung 1:1000 bis 1:2000) bewirkt eine Systemauslegung auf hohe Feldwin-

kelauflösung einen kleinen Feldwinkelmeßbereich. Ein großer lateraler Antastbereich ist folglich mit einer geringen Abstandsauflösung verbunden und umgekehrt.

Eine dynamische Nachführung des Detektorbildfelds vermeidet diesen Nachteil. Dies erfordert einen zweiten steuerbaren Drehspiegel SM1 im Abbildungsstrahlengang (Bild 2), welcher unabhängig von SM2 positionierbar ist. Die Punkt-bildposition auf dem Detektor ist dann vom Einstellwinkel dieses Drehspiegels und vom Antastpunkt abhängig. Dies ermöglicht, Soll-daten über die Objektgestalt in die Messung zu integrieren. Der Spiegel SM1 ist beispielsweise so steuerbar, daß beim Abasten einer Ebene das Punkt-bild auf der Detektormitte stehen bleibt. Objektpunkte außerhalb dieser Ebene führen zu einem entsprechenden Punkt-bildversatz. Gemessen wird folglich eine Objekthöhe relativ zu dieser Referenzebene. Da SM1 beliebig positionierbar ist, kann die Referenzebene durch eine beliebige Referenzkontur ersetzt werden. Das bietet die Möglichkeit, ein Objekt relativ zu einer Konturvorgabe zu vermessen, was insbesondere bei Toleranzprüfungsaufgaben vorteilhaft ist. In dieser Anordnung kann die Scheimpflugbedingung nur für eine Antastrichtung erfüllt werden; alle anderen Punkte führen zu einem unscharfen Punkt-bild. Die Positionsbestimmung des Punkt-bildes muß folglich möglichst unempfindlich gegen Defokussierung sein.

Das vorgestellte zweiachsige Meßverfahren tastet das Meßobjekt linienförmig ab. Durch Kippen des Aufbaus um eine parallel zur Basis B verlaufende Achse (Bild 2) ist diese Antastlinie lateral verschiebbar, was eine dreidimensionale Vermessung der Objektoberfläche erlaubt. Werden nur Markierungs- und Abbildungsstrahlengang parallel zur Basis B gespiegelt, so ergibt sich der äquivalente Effekt.

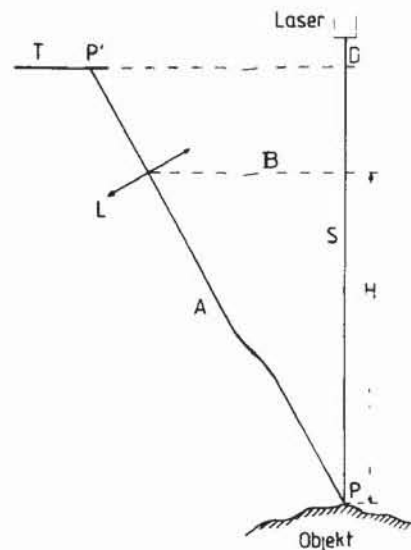


Bild 1: Standardaufbau zur Abstandsmessung durch optische Triangulation

¹⁾ Erstveröffentlichung Zeitschr. „Fertigungstechnik - Laser - Meßtechnik (Feinwerktechnik & Messtechnik) 94 (1986) 7, Carl Hanser Verlag, 8000 München

²⁾ Dipl.-Phys. Günther Seitz, Prof. Dr.H.J. Tiziani und Dipl.-Ing. Reinhold Litschel Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, 7000 Stuttgart

Meßaufbau

Der prinzipielle Aufbau des Drei-Koordinaten-Meßgerätes ist in Bild 3 skizziert. Durch die Linsen L1 und L2 wird ein He-Ne Laserstrahl aufgeweitet und anschließend durch L3 über die Spiegel M2, SM2 und SM3 auf das Objekt fokussiert. Der Spiegel SM2 ist auf einen Galvanometerscanner montiert und somit drehbar, was eine Positionierung des Antastpunktes in x-Richtung erlaubt. Die Positionierung in y-Richtung wird durch den senkrecht zur Achse von SM2 drehbaren, schrittmotorgesteuerten Spiegel SM3 ermöglicht.

Durch die Optik L4 wird der Antastpunkt über den stark mit SM3 gekoppelten Drehspiegel SM4 und den galvanometergesteuerten Spiegel SM1 auf eine Photodiodenzeile abgebildet. Die Bildweite ist konstant, was eine scharfe Abbildung nur dann erwarten läßt, wenn sich der Antastpunkt auf einer torischen Fläche bewegt. Bei einem beliebigen Meßobjekt ist folglich von einer mehr oder minder starken Defokussierung des Punktbilds auszugehen. Der Schwerpunkt dieses Punktbilds ist eine gute Näherung für die Punktbildposition. Da eine rechnerische Schwerpunktbestimmung zu zeitaufwendig ist, wird die Punktbildposition aus den Punktbildflanken ermittelt. Die hierfür verwendete elektronische Schaltung besteht aus zwei im Pixeltakt laufenden Binärzählern, wovon einer durch die ansteigende, der andere durch die abfallende Flanke des Punktbilds bei einem vorgegebenen Schwellwert gestoppt wird. Das arithmetische Mittel beider Zählresultate ergibt unter Annahme eines intensitätsmäßig symmetrischen Punktbilds dessen Schwerpunktkoordinate. Zur Schaffung dieser Voraussetzung ist eine bewegte Mattscheibe vor der Photodiodenzeile angebracht. Diese bewirkt eine Tiefpaßfilterung des Punktbilds, wodurch sich der Einfluß symmetriestörender Speckle, bedingt durch die Verwendung kohärenten Lichts, vermindert, Punktbildasymmetrien, bedingt durch Defokussierung, können durch telezentrischen Strahlengang vermieden werden.

Wie bei dem vorgestellten zweiachsigen Meßkonzept ist die Scheimpflugbedingung auch hier nur für einen Antastpunkt erfüllbar, was aber dank der defokussierungsunempfindlichen Auswertung dennoch zu tolerablen Ergebnissen führt.

Gesteuert wird das Gerät durch einen handelsüblichen Kleinrechner. Die Objektvermessung erfolgt punktweise; ein Meßzyklus beginnt mit der Positionierung der Drehspiegel SM2 und SM3/SM4 auf einen Oberflächenpunkt, während SM1 entsprechend dem ungefähren Objektabstand nachgeführt wird. Nach abgeschlossener Spiegelpositionierung und Ermittlung der Punktbildposition werden die Antastkoordinaten durch den Steuerrechner ermittelt.

Resultate

Bild 4 zeigt die Pseudo-3-D-Darstellung einer Messung, entstanden durch Aufnahme von 200 Punkten pro horizontaler Profillinie bei einem Objektabstand von 420 mm und einer Laserleistung von 2 mW. Die Meßgeschwindigkeit ist durch die Belichtungszeit der Diodenzeile von 40 ms gegeben. Der Abstandsmeßbereich ist dank des verwendeten Meßkonzepts sehr groß. Legt man einen Schwenkbereich beider Galvanometerscanner von ± 10 Grad zugrunde, so liegt der Antastbereich prinzipiell zwischen 120 mm und unendlich. In der Praxis ergeben sich jedoch aus verschiedenen Gründen Einschränkungen: mit zunehmendem Meßabstand sinkt bei konstanter Laserleistung die Intensität des Punktbilds, was durch Verlängerung der Zeilenbelichtungszeit und damit durch eine Reduktion der Meßgeschwindigkeit kompensiert werden muß. Desweiteren können Markierungsstrahl und Punktabbildung nur für einen Meßabstand fokussiert werden; eine hiervon abweichende

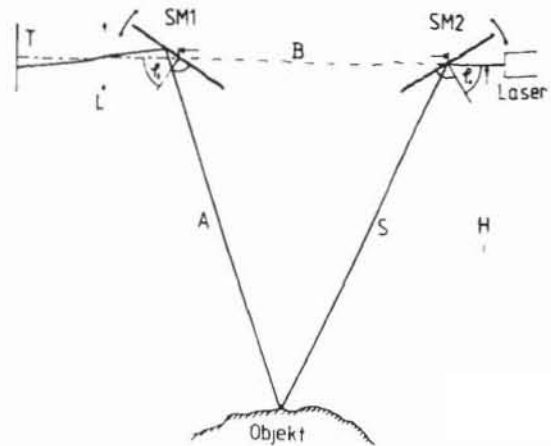


Bild 2: Erweiterter Aufbau zur zweiachsigen Oberflächenvermessung

Antastposition führt folglich zu einem unscharfen Punktbild, von dessen Strahlleistung nur ein Bruchteil von der Photodiodenzeile ausgenutzt wird und damit zur Signalgenerierung beiträgt, was wiederum eine Verlängerung der Belichtungszeit notwendig macht. Ferner bewirkt eine Defokussierung des Markierungsstrahls einen größeren Lichtpunkt auf der Objektoberfläche, wodurch die laterale Auflösung reduziert wird.

Die Meßunsicherheit des Geräts hängt entscheidend von der Positioniergenauigkeit der Galvanometerscanner ab. Wird eine maximale Meßunsicherheit gefordert, so wächst die notwendige Positioniergenauigkeit mit zunehmendem Meßabstand überproportional an.

Bei einem Abstand von 420 mm wurde noch eine Meßunsicherheit von $\pm 0,1$ mm erreicht. Die laterale Meßunsicherheit beträgt bei einer Antastfläche von 150×150 mm ca. $\pm 0,15$ mm. Sind Abstriche an der Genauigkeit zulässig, so

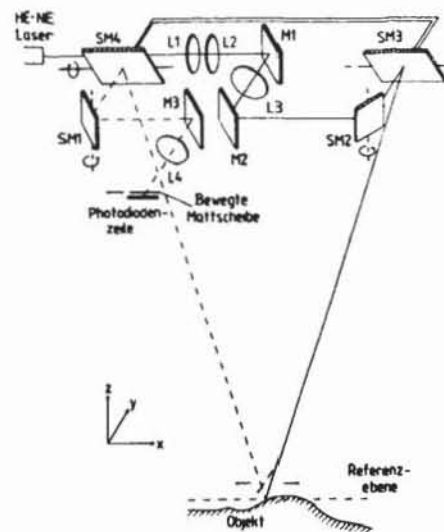


Bild 3: Realisierter Aufbau zur dreiachsigen Oberflächenvermessung

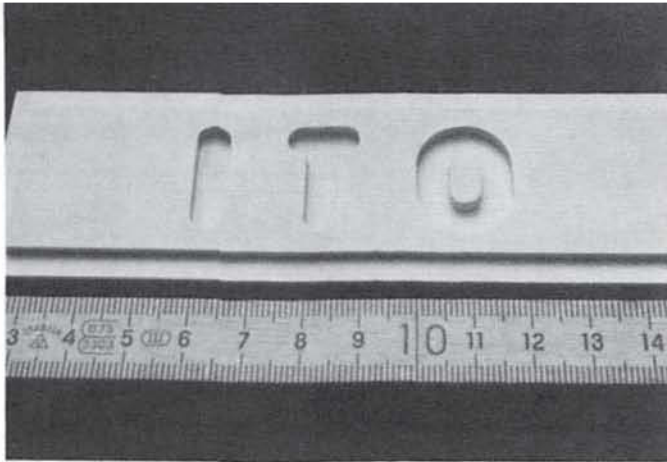


Bild 4: Pseudo-3-D-Darstellung der am Testprofil gemessenen Raumkoordinaten

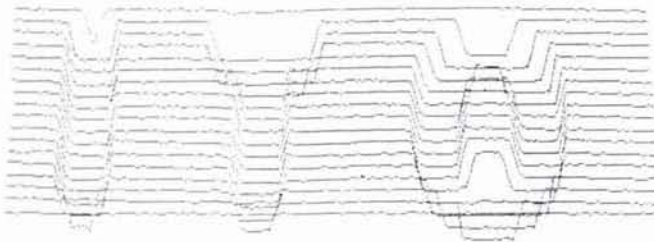


Bild 5: Testprofil aus Bild 4

kann das Gerät bei Verwendung eines leistungsstärkeren Lasers auch für wesentlich größere Meßabstände verwendet werden. Genauigkeitssteigerungen, insbesondere über einen größeren Meßbereich, sind durch geeignetere Fokussierelemente zu erwarten [3]. Die Meßgeschwindigkeit von 40 ms/Antastpunkt ist in erster Linie durch die geringe Laserleistung bedingt. Bei Verwendung eines leistungsstärkeren Lasers ist eine wesentliche Steigerung der Meßrate möglich.

Anwendungen

Wie aus Bild 4 ersichtlich, eignet sich das Gerät zum abscanen von Werkstückoberflächen. Verglichen mit anderen Verfahren [2] ist die hierbei erzielte Meßgeschwindigkeit jedoch sehr gering. Besser geeignet ist das Gerät für Anwendungen, bei denen nur wenige, aber beliebig über das Objekt verteilte Punkte zu vermessen sind, also beispielsweise für Vollständigkeits- und Toleranzprüfaufgaben an Werkstücken. Hierbei liegt der entscheidende Vorteil des Geräts darin, daß die Meßwerterfassung auf interessierende Objektbereiche beschränkbar ist, wodurch sich die anschließende Auswertung erheblich vereinfacht.

Schrifttum

- [1] Strand, T.C.: Optical Three-dimensional Sensing for Machine Vision. *Optical Engineering* 24 (1985) S. 33-40
- [2] Rioux, M.: Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied Optics*, 23 (1984) S. 3837-3844
- [3] Bickel, G.; Häusler, G.; Maul, M.: Triangulation with expanded range of depth. *Optical Engineering* 24 (1985) S. 975-977