

OPTISCHER 3D-SENSOR FÜR KOORDINATENMESSMASCHINEN

Schneller als taktil

In der Fertigungstechnik werden häufig 3D-Portalmeßmaschinen mit taktilen Sensoren eingesetzt, die präzise Messungen erlauben. Dem steht jedoch ein hoher Zeitaufwand beim Erfassen komplexer Werkstücke entgegen. Mit einem neuartigen optischen Sensor will in-situ, Sauerlach, die Messzeiten bei vergleichbaren Messunsicherheiten deutlich reduzieren.

In der Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, etwa in der Automobilindustrie, gehören heute 3D-Koordinatenmeßmaschinen zur Standardausrüstung. Moderne Portalsysteme mit Luftführungselementen in allen Achsen und Führungsbalken aus Naturstein bieten einen Messbereich in X-, Y- und Z-Richtung von mehreren Metern.

Bei der punktweisen Antastung von Werkstückoberflächen mit taktilen Sensoren erreicht man dreidimensionale Messunsicherheiten von typisch 5 µm. Durch Dreh-Schwenk-Einrichtungen für den Taster sowie unterschiedliche Tastelemente in Verbindung mit automatischen Tasterwechseinrichtungen lässt sich eine hohe Flexibilität auch bei der Vermessung komplexer Werkstücke erreichen.

In Verbindung mit einer softwaremäßigen Analyse der erfassten Punktwolken stehen zahlreiche Auswertemöglichkeiten zur Verfügung. Damit können nahezu alle in der Fertigungsmesstechnik auftretenden geometrischen Parameter wie Winkel, Abstände, Lagebeziehungen und Formmerkmale normgerecht ermittelt werden.

Optische Sensoren statt taktile Antastung

Problematisch bei der taktilen Antastung ist der hohe Zeitbedarf beim Erfassen von Oberflächen mit zahlreichen Details, so beim Vermessen nachgiebiger oder empfindlicher Werkstücke. Alternativ bieten sich optische Sensoren an. In Verbindung mit Meßmaschinen kommen allerdings

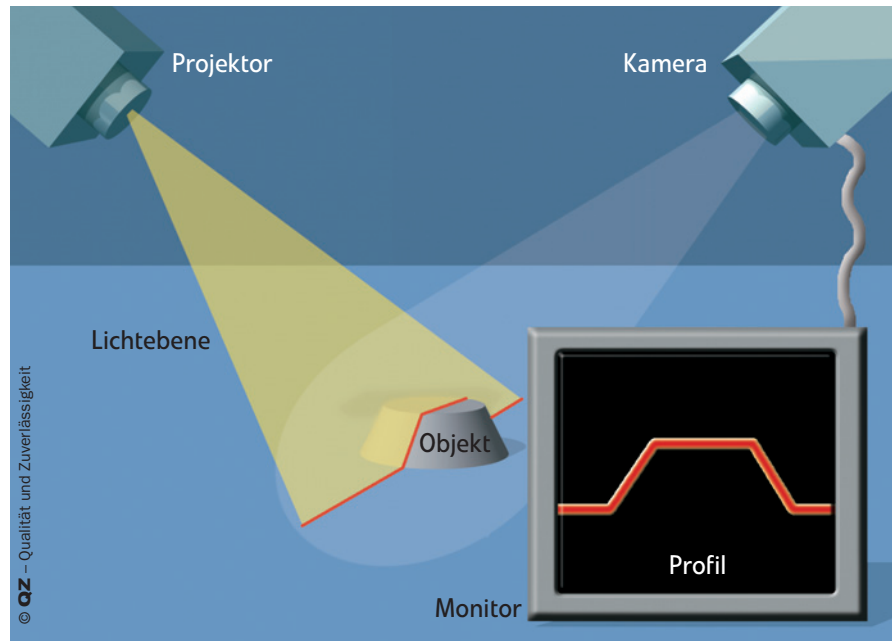


Bild 1. Lichtschnitttechnik: Unter einem definierten Winkel wird eine Laserlinie auf ein Werkstück eingestrahlt. Aus der Form der mit Hilfe einer Kamera aufgenommenen reflektierten Linie kann nach dem Triangulationsprinzip das Werkstück dreidimensional erfasst werden

nur Systeme in Frage, die in Größe und Gewicht mit taktilen Sensoren vergleichbar sind.

Nach dem Stand der Technik wird dabei hauptsächlich das Triangulationsverfahren eingesetzt. Im einfachsten Fall projiziert man mit Hilfe eines Lasers einen Lichtpunkt auf das Werkstück. Das dort diffus reflektierte Laserlicht wird mit einer Kamera aufgenommen. Da die Positionen von Laserprojektor und Kamera exakt bekannt sind, können durch einfache geometrische Analyse die 3D-Koordinaten des Messpunktes auf dem Werkstück ermittelt werden. Damit ist dann – in Analogie zu einem taktilen Sensor – ein punktweises Antasten der Werkstückoberfläche möglich.

Eine Erweiterung bietet die Lichtschnitt-Technik, die durch Projektion einer Laserlinie anstelle eines Punktes die simultane Vermessung eines größeren Bildbereichs erlaubt (Bild 1). Die Lichtschnitt-Technik bietet einen erheblichen Zeitvorteil im Vergleich zur taktilen Antastung, allerdings bei einer erhöhten

Messunsicherheit. Einschränkungen gibt es ferner bei den so messbaren geometrischen Parametern sowie bei spiegelnden oder durchsichtigen Oberflächen.

Geometriemerkmale schnell und flexibel erfassen

Durch Verwendung mehrerer Laserlinien lassen sich genauere Ergebnisse als mit der Lichtschnitt-Technik mit nur einer Laserlinie erzielen. Nach diesem Prinzip der Multilinen-Triangulation entwickelte in-situ, Sauerlach, den neuartigen optischen 3D-Sensor Phoenix, der die Messgenauigkeit und die Messgeschwindigkeit verbessert.

In dem Sensor sind zwei Laserpakete aus jeweils fünf Miniaturlasern integriert und orthogonal zueinander angeordnet. Damit können bis zu zehn gekreuzte Laserlinien auf eine Oberfläche projiziert und mit einer Kamera nach dem Triangulationsprinzip analysiert werden.

Auf diese Weise lässt es sich beim Vermessen linearer Merkmale wie Profile,

Kanten und Spalten ohne aufwendige Drehung des Sensors immer erreichen, dass entweder die Linien von Laserpaket 1 oder die dazu orthogonalen Linien von Laserpaket 2 die zu vermessenden Konturen in einem Winkel zwischen 45° und 90° schneiden. Diese „virtuelle Drehachse“ ermöglicht präzisere Auswertungen und reduziert wegen des Wegfalls der mechanischen Rotation die Messzeiten.

In einem zweiten Schritt wird von den Lasern auf eine homogene, ringförmige LED-Beleuchtung umgeschaltet. In dem so aufgenommenen Graubild können nun durch Blob-Analyse sowie Konturverfolgungs- und Mustererkennungs-Algorithmen komplexere geometrische Merkmale erfasst und mit der zuvor aus der Multilinien-Triangulation ermittelten Fläche in Beziehung gebracht werden.

Phoenix ist damit laut Hersteller nicht nur schneller als taktile Sensoren, er bietet ferner im Vergleich mit bekannten optischen Sensoren eine größere Flexibilität hinsichtlich der erfassbaren Geometriemerkmale. Der Arbeitsabstand des Sensors beträgt 100 mm. Mit 550 g ist Phoenix deutlich schwerer als taktile Sensoren,

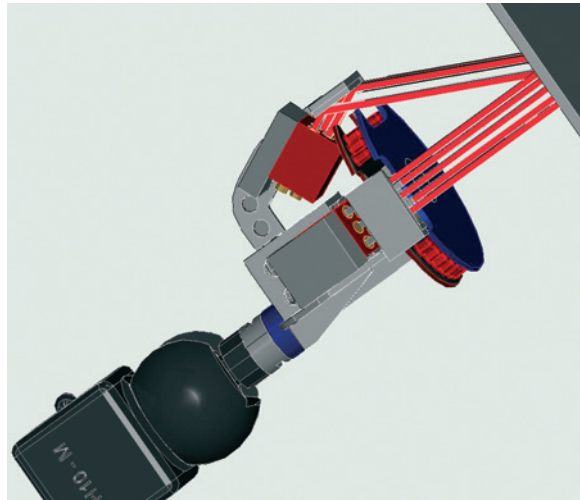


Bild 2. Angekoppelt: Renishaw-Aufnahme an optischen 3D-Sensor. Man erkennt die beiden gekreuzt angeordneten Laserpakete und das Ringlicht

aber dennoch an übliche Adapter (beispielsweise Renishaw PH10) ankoppelbar. Die Messunsicherheit liegt bei ca. $20\ \mu\text{m}$ (Bilder 2 bis 4).

Kurze Aufnahme- und Auswertezeiten

Ein Problem bei dieser im Phoenix-Sensor verwendeten Multilinien-Triangula-

tion ist das korrekte Zuordnen der mit der Kamera aufgenommenen Laserlinien zu den projizierten Linien. Dies gilt insbesondere bei stark gebogenen Werkstücken mit Durchbrüchen und Stufen.

Die Zuordnung gelingt durch sequenzielle, mit der Bildaufnahme synchronisierte Projektion, flexible Belichtungszeiten, Speicherung von Zwischenbildern und darauf zugeschnittene bild- ▷

analytische Methoden. Außerdem können auf diese Weise kurze Aufnahme- und Auswertzeiten von einigen 100 Millisekunden realisiert werden. Die Auswertung erfolgt dabei zeitoptimiert teilweise während der Bewegung des Sensors zur jeweils nächsten Messposition.

Die verwendeten, nur 5 mm durchmessenden Miniaturlaser emittieren im roten Wellenlängenbereich um 630 nm mit einer Leistung von ca. 1 mW. Genau dieser Wellenlängenbereich wird auch im LED-Ringlicht verwendet. Dieses Rotlicht ist wegen seiner kürzeren Wellenlänge und der daraus resultierenden höheren Ortsauflösung dem sonst häufig in der optischen Messtechnik eingesetzten Infrarotlicht (NIR) vorzuziehen.

Außerdem kann so die mit nur geringen Auflagen verbundene Laserschutzklasse 2 zur Anwendung kommen.

Zur Reduktion von Fremdlichteinflüssen werden aus zwei Komponenten bestehende Filter verwendet. Dies ist zum einen ein schmalbandiges Interferenzfilter mit 10 nm Halbwertsbreite und einer maximalen Transmission bei 630 nm sowie außerdem ein Polarisationsfilter zur Unterdrückung störender Reflexe. Dadurch ist eine robuste Arbeitsweise auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen gewährleistet.

Die orthogonale Anordnung der beiden Laserpakete erfordert jedoch weitere Maßnahmen. Laserdioden besitzen eine elliptische Abstrahlcharakteristik, wobei die Polarisationsrichtung von der Orientierung dieser Ellipse abhängt.

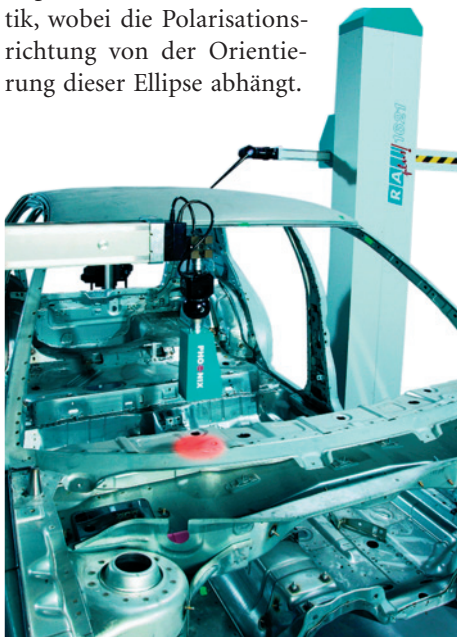


Bild 3. Vermessung einer Automobilkarosserie: Der Sensor ist an die Standard-Aufnahme (Renishaw) einer Messmaschine des Herstellers Wenzel Präzision montiert

Daher ist die Auswahl der Laser und der Zylinderoptiken zum Erzeugen eines Lichtvorhangs nicht trivial.

Damit auch bei der orthogonal gekreuzten Laseranordnung die Polarisationsfilter verwendet werden können, muss bei einem der beiden Laserpakete die Polarisation um 90° gedreht werden. Dies geschieht durch Vorsetzen einer $\lambda/2$ -Scheibe. Ferner ergeben sich abhängig von der Orientierung der Emissionsellipsen Abweichungen von dem erwünschten Gauß-Querschnitt der Profillinien sowie Unterschiede in der Linienbreite und Intensität der beiden Lasergruppen. Dies muss bei der bildanalytischen Auswertung berücksichtigt werden.

Fehlerhafte Messpunkte unterdrücken

An die ermittelte Punktwolke werden zur Modellierung der erfassten Werkstückoberfläche Flächen im Raum angepasst. Damit diese Flächenanpassung robust arbeitet, ist eine Unterdrückung von fehlerhaften Messpunkten, so genannten „Ausreißern“, erforderlich.

Gerade in der Bildverarbeitung kommt es vor, dass einige Datenpunkte aufgrund irgendwelcher Störungen (z. B. durch Reflexe oder lokale Verschmutzung) aus dem Rahmen fallen und bei gleichgewichtiger Analyse das Ergebnis verfälschen würden.

Zur Lösung dieses Problems werden nach dem ersten Anpassen der gewünschten Funktion Ausreißer anhand ihres vergleichsweise großen Abstandes zur angepassten Fläche identifiziert. In einer nachfolgenden Iteration werden die Stützwerte mit zwischen 0 (eliminiert) und 1 (voll berücksichtigt) liegenden Gewichtungsfaktoren multipliziert, die aus der Güte der Anpassung nach Maßgabe einer Gaußverteilung hergeleitet werden.

Dieses Relaxationsverfahren wird dann so oft iteriert, bis eine optimale Lösung erreicht ist. Auf diese Weise können bei einem Bildausschnitt von ca. 32 x 45 mm² einfache Flächen wie Ebenen und Kugeln mit einer Messunsicherheit von ca. 10 µm angepasst werden.

Ist beispielsweise eine Bohrung in einem ebenen Blechteil zu vermessen, wird zunächst mittels Multilinien-Triangulation eine Ebene an die Umgebung der Bohrung angepasst. Im zweiten Schritt wird die Bohrung, die sich im Graubild in

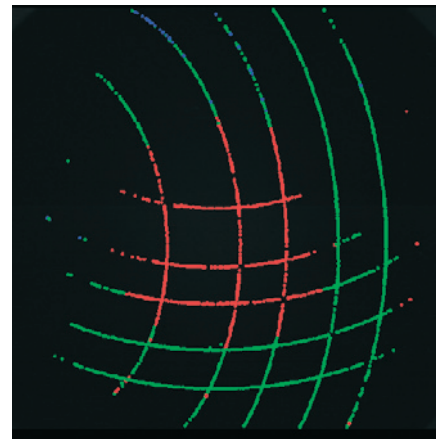


Bild 4. Kalibrierkugel: zehn orthogonal zueinander projizierte Laserlinien. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die Abweichungen von der idealen Oberfläche

der Regel als Ellipse darstellt, lokalisiert und in Konturpunkte aufgelöst. An diese Konturpunkte wird dann durch Approximation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate sowie nachfolgende Relaxation eine Ellipse bzw. ein Kreis angepasst. Aus der Kenntnis der Flächennormale und des Aufpunktes der Ebene können schließlich die tatsächlichen 3D-Koordinaten des Mittelpunktes sowie der Radius des in die Ebene projizierten Kreises errechnet werden.

In analoger Weise wird bei der 3D-Messung komplexerer Muster vorgegangen; dies können beispielsweise Sechskantstanzungen, Langlöcher oder Bolzen in Ebenen, aber auch gekrümmten Oberflächen sein. □

Prof. Dr. Hartmut Ernst

► **in-situ GmbH & Co. KG**
vision & sensor system
T 0 81 04/64 82-30
vision@in-situ.de
www.in-situ.de