



Foto: Isra Vision

OPTISCHE INLINE-ERFASSUNG DER FORM UND LAGE VON BAUTEILEN

Zwei- oder dreidimensional?

Klaus Donner, Passau

Die Form- und Lage von Bauteilen in der Fertigungslinie lässt sich mit 2D- oder 3D-Messtechnik berührungslos erfassen. Für welches Verfahren man sich entscheidet, hängt von vielen Faktoren ab. Neben den physikalischen Eigenschaften der Oberfläche sind Sensorik und Beleuchtungstechnik besonders zu beachten.

Die Missverständnisse und Irrtümer zum Thema Form- und Lageerfassung beginnen bereits bei der Planung. So meint man bei oberflächlichem Hinsehen, dass für den eigenen Produktionsprozess etwa nur Oberflächenmängel (Kratzer, Rost oder Ähnliches), nur das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein gewisser Geometriemerkmale (Löcher, Kerben usw.) oder nur ei-

ne Typerkennung wichtig seien. Auch das Lesen von Aufschriften oder Codes habe nichts mit Form- und Lageerkennung zu tun. Das allerdings ist ein Irrtum.

Selbstverständlich ist in vielen Fällen ein Oberflächenmangel in gewissen Regionen des Bauteils wesentlich gravierender zu beurteilen als anderswo. Das Vorhandensein einer Bohrung kann nur erkannt werden, wenn man weiß, wo sie

hingehört. Ein Bauteiltyp wird sich meist durch seine Geometrie auszeichnen, und eine Aufschrift kann nur gefunden und gelesen werden, wenn man bauteilgeometrieabhängig weiß, wo man sie zu suchen hat und wie man ihre Zeilenstruktur oder Ausrichtung erfasst.

Auch der Begriff Bauteil bedarf der Erläuterung. Ein textiles Gewebe, das sich verformen, dehnen und kontrahieren



Foto: Edmund Optics

Bild 1. Telezentrisches Objektiv: Ermöglicht präzise Messung, da sich die Größe der Gegenstände mit dem Abstand der Objektiv nicht ändert

kann, wird selten als Bauteil bezeichnet. Dennoch sind auch dort durchaus anspruchsvolle Messprozesse nötig. Die Starrheit des Messobjekts scheint eine geradezu unabdingbare Voraussetzung für einen wohldefinierten Messprozess zu sein, ist aber keineswegs notwendig. Probleme der Flächenrückführung CAD-spezifischer Bauteile zur Erfassung der realen Einbaugeometrie gehören ebenso in diesen Kontext wie die vorwegnehmende Korrektur von Schrumpfprozessen, Schweißverzügen oder Bauteiltorsionen.

Natürlich kann man eine Formvermessung dazu verwenden, um solche fertigungs- oder umweltbedingten Verformungen nachträglich zu ermitteln und daraus prozesstechnische Konsequenzen zu ziehen. Es ist jedoch auch möglich, die prinzipiell möglichen Deformationen von vornherein in den Messprozess und die Messdatenverarbeitung mit einzubeziehen und daraus wesentlich flexiblere und fertigungstechnisch rückkoppelbare Messergebnisse zu erhalten.

Schließlich gibt es viele nichtoptische, berührungslose Verfahren des dimensionellen Messens. Hierzu gehören etwa kapazitive und induktive Methoden der Abstands- und Dickenmessung, Ultraschallmessungen sowie tomografische Messverfahren. Sie können wichtiges Vor- und Ergänzungswissen für eine Ganzform- erfassung liefern, in Einzelfällen aufgrund der Starrheit des Messobjekts auch für eine Lagebestimmung ausreichen, stehen jedoch nicht im Fokus dieses Beitrags. Stattdessen liegt hier der Schwerpunkt auf

den optischen Erfassungsmethoden der Gesamtform und -lage.

Physikalische Eigenschaften der Oberfläche beachten

Form- und Lagevermessungen in industriellen Fertigungsprozessen lassen sich grob – je nach Frage – in Verfahren der 2D- und 3D-Messtechnik untergliedern. Will man nur die Projektionsgeometrie in eine ausgezeichnete Ebene ermitteln, spricht man von 2D-Messtechnik. Das muss nicht unbedingt heißen, dass das Bauteil flach ist. 3D-Messtechnik erfasst die räumliche Geometrie der Bauteile in allen drei Dimensionen, wobei man meist – etwa aus Sichtbarkeitsgründen – nur Teilansichten gewinnt und auswertet. Die komplette Ganzform- erfassung aus allen Perspektiven ist ein Sonderfall, der insbesondere bei wechselnden Bauteil- ausformungen zu einer sehr anspruchsvollen Messtechnik führt.

Die Planung eines Messsystems zur Form- oder Lage- erfassung darf sich jedoch keinesfalls auf die 2D-versus-3D-Frage beschränken. Von entscheidender Bedeutung sind immer auch die physikalischen Eigenschaften der Oberflächen. Beim Einsatz optischer Messsysteme sind dies vorrangig die Reflektanz- Eigenschaften der beobachteten Grenzflächen. Die 3D- Vermessung einer Lackfläche oder einer verchromten Zierleiste erfordert eben ganz andere Messverfahren als die Form- erfassung eines Ziegels. Bei Bauteilen mit gemischten Reflektanzverhältnissen der Oberflächen führt dies zu durchaus aufwendigen Messsystemen.

Prinzipiell lassen sich alle 3D-Messverfahren auch im Zweidimensionalen umsetzen und nutzen. Die Besonderheiten

der 2D- Vermessung sind größtenteils durch die einsetzbare Sensorik und Beleuchtungstechnik bedingt. So ist die Beleuchtung in Transmission (Durchlicht) typisch für 2D-Messsysteme. Sie hat den Vorteil, dass sie lästige Reflexionseigenschaften der Oberflächen weitgehend unterdrückt und zu relativ einfachen Konturextraktionsverfahren in der Bildauswertung führt.

Allerdings sollte auch hier – speziell bei höhenauftragenden Bauteilen – auf höchstmögliche Parallelität des Lichtstrahlgangs geachtet werden. Im Idealfall führt dies zu reinen Schattenwurfprojektionen durch Laserparallellicht. Das optische Sensorsystem ist dabei eine Zeilenkamera, sodass diese Art von Schattenwurfsensorik scannend in Kombination mit einem Weggeber einsetzbar ist. Die Länge der Schattenwurf- linie beschränkt allerdings auch die Einsetzbarkeit in der Praxis. Für größere Bauteile wird eine Phalanx von Parallellicht- Laserlinien teuer, und die Justierung und Kalibrierung solcher Systeme ist aufwendig. Der Vorteil ist die hohe Variabilität in der Tiefe, das heißt der Schärfenbereich der optischen Erfassung ist groß.

Das ist zugleich eines der Probleme vieler anderer 2D-Messsysteme. Telezentrische Objektive mit großer Objektivöffnung haben ihren Preis, und der Schärfenbereich ist meist eng (Bild 1). Deshalb beschränken sich solche Anwendungen eher auf Bauteile, deren Höhenvariabilität nicht zu hoch ist. Andererseits ist zum Beispiel die Taumelkreisvermessung von Pins elektronischer Baugruppen durch ihre relativ gute Höhenlageeingrenzung eher als 2D-Messung zu sehen (telezentrische Optik, fokussiert auf Pin-Spitzen).

Die Robustheit von Messsystemen ►



Foto: Hamamatsu Photonics Deutschland

Bild 2. Time-Delay-Integration-(TDI)- Kamera: Erfasst besonders schnell bewegte Objekte, die mit hoher Auflösung aufgezeichnet werden müssen. Auch bei geringen Lichtverhältnissen einsetzbar

men und die Begrenzung der Bauräume führen oft zu Problemen beim Einsatz empfindlicher optischer Komponenten. Messtechnisch konfektionierte Contact-Image-Sensoren sind im zweidimensionalen Nahbereichseinsatz den Zeilenkameras überlegen: Die eingesetzten Gradientenoptiken sind telezentrisch bei günstigem Preis (allerdings mit kleinem Schärfentiefebereich). Darüber hinaus lassen sich Contact-Image-Sensoren auf große Längen konfektionieren. Sie benötigen eine spezielle Ausleselektronik für den enormen Datendurchsatz. Typische Einsatzgebiete sind die schnelle Inline-Vermessung von Papierbahnen, Blechen oder Flachglas.

Ein nicht zu unterschätzendes Problem der scannenden 2D- und 3D-Erfassung von Bauteilen liegt in der Kopplung mit weggebender Sensorik. Oft werden die Schlupfprobleme zwischen Bauteil und Fördersystem übersehen, die zu Messungenauigkeiten in Transportrichtung führen können. Auch die exakte Synchronisation von Zeilenbelichtung und Drehgebertakt (Triggerung) erweist sich im Detail oft als problematisch. Schließlich wird die Bewegungsunschärfe des akquirierten Bildmaterials eine Rolle spielen. Insbesondere bei Auflichtapplikationen und hoher Fördergeschwindigkeit wird man zu sehr kurzen Belichtungszeiten tendieren, was wiederum sehr starke Lichtquellen oder aufwendige Beleuchtungsoptiken erfordert. In solchen Fällen kann die TDI-Technik (Zeilenkameras mit zeitintegrierender Bildakquisition) Abhilfe schaffen (Bild 2).

Es gibt bei der Planung von optischen Messsystemen einige gängige Irrtümer und unzulässige, gedankliche Verkürzungen, die nicht unerwähnt bleiben sollten: Da ist zunächst die Entscheidung zu simple Formel $\text{Pixelzahl} = \text{Auflösung}$. Die reale Auflösung optischer Sensorik bedarf immer einer Überprüfung am vorgesehenen Messproblem. Das kann und sollte durch eine kleine Machbarkeitsstudie vorweg möglich sein.

Man bedenke auch, dass das gelegentlich etwas ausufernde „Bildverarbeiterlatein“ von Subpixelauflösung und Ähnlichem mit Sachverstand zu beurteilen ist. Selbstverständlich kann man bei hoher Zuverlässigkeit gewisser geometrischer Nebenbedingungen (etwa der Geradheit von Konturen, des Abstands zwischen kreisförmigen Ausschnitten usw.) wesentlich höhere Messgenauigkeiten erzielen,

als dies die Pixelgröße vermuten lässt.

Ein bisschen Interpolation oder unzureichend fundierte Approximation macht jedoch noch keine erhöhte Messgenauigkeit. Andererseits sind auch die Argumente der Nichtmachbarkeit auf Grund der Beugungsbegrenzung von Optiken mit Vorsicht zu genießen: Es gibt sehr wohl, wenn auch selten wirklich realisiert, beugungsberücksichtigende Bildauswertung.

Drei Messprinzipien auf optischer Basis möglich

Diese Argumente gelten erst recht für die optische 3D-Messtechnik. Da wellenoptische Verfahren hier nicht behandelt werden, bleiben im Wesentlichen drei Messprinzipien übrig, die für die 3D-Rekonstruktion und Vermessung auf optischer Basis in Frage kommen: Lichtlaufzeitmessungen, Raumpunktrekonstruktion aus zwei oder mehreren Sichtstrahlen (manchmal Triangulationsprinzip genannt) und modellbasierte Stereorekonstruktion.

Das Prinzip der Lichtlaufzeitmessung (oft durch Phasenvergleich relativiert) kommt in verschiedenen Detailausführungen in 3D-Kameras zum Einsatz. Die anfängliche Euphorie über die breite praktische Einsetzbarkeit solcher Systeme ist schnell einer gewissen Ernüchterung gewichen. Beim gegenwärtigen Stand der technischen Entwicklung ist der Einsatz dieser 3D-Kameras in industriellen Fertigungslinien immer noch problematisch, weil die laterale Auflösung in Verbindung mit der notwendigen Tiefenmessgenauigkeit bei verfügbaren Marktprodukten meist nicht ausreicht.

Die Kombination mit klassischer Industriekameratechnik zur Erhöhung der lateralen Auflösung ist eher als Spezialgebiet für Multisensorsysteme zu sehen und im Moment noch nicht robust einsetzbar. Deshalb soll diese vielleicht in Zukunft durchaus wichtige Technologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht weiter behandelt werden.

Die heute am häufigsten eingesetzte, vollflächige 3D-Messmethode ist sicher die der Laserlinienauswertung (Laserschnitt, Lasertriangulation auf Linienbasis). Eine Laserlinie wird auf die zu



Foto: Baumer Optronic

Bild 3. Matrixkamera mit Auflösungen bis 5 Megapixel: Beobachtet aus geeignetem Sichtwinkel die Laserlinie, die auf eine zu vermessende Oberfläche projiziert wird

vermessende Oberfläche projiziert und durch (mindestens) eine Matrixkamera aus einem geeigneten Sichtwinkel beobachtet (Bild 3). Durch eine gute Kalibrierung des Systems lassen sich die Sichtbeziehungsweise Beleuchtungsstrahlverläufe im Raum aus den Kamerabildern ermitteln und hierdurch die Tiefeninformation gewinnen.

Es gibt neben offensichtlichen Vorteilen dieser Messmethode auch einige Nachteile, die bedacht werden sollten. Zunächst benötigt ein solches System natürlich zusätzlich eine Verfahrenseinheit des Sensorsystems oder des Bauteils. Dabei muss die Position des Messsystems in Bezug auf das Bauteil stets sehr genau bekannt sein. Die Arbeitsabstände können keineswegs immer so frei verändert werden, wie man sich das als Anwender wünschen würde, wodurch die Verfahrensvarianten des Lasersystems erheblich erschwert werden.

Bei größeren Abweichungen der Flächennormale des Bauteils am Beobachtungsschnitt im Verhältnis zum einfallenden Laserstrahl treten zunehmend Ungenauigkeiten und Messprobleme auf. Schließlich ist bei reflektierenden Oberflächen je nach Regelbarkeit der Linienintensität mit erheblichen Problemen zu rechnen.

Unabhängig davon bedenke man, dass eine große Messpunktwolke, die üblicherweise durch ein solches System zur Verfügung gestellt wird, noch keine aussagekräftige 3D-Form- und Lagevermessung ist. Vielmehr beginnt jetzt erst die eigentliche algorithmische Passung auf die CAD-Geometrie, um lokalisierte Messaussagen machen zu können.

Nahe verwandt zur Laserlinienprojektion, wenn auch nicht mehr nur in verfahrenen Einzellinien, sondern als Flächenverfahren, sind Streifenprojektionsmethoden. Die phasenschiebende Streifenprojektion ist heute ein Standardverfahren zur 3D-Vermessung flächiger Bauteile, wobei das Phasenschiebprinzip zur Ortskodierung verwendet wird. Solange der Messfleck nicht geändert wird, benötigt man keine Verfahrung. Die restlichen Probleme der Lasertriangulation übertragen sich weitgehend auf die Streifenprojektionsverfahren.

Die klassische Stereorekonstruktion mit zwei oder mehr Kameras spielt in Konkurrenz zu diesen Messverfahren eher eine untergeordnete Rolle, weil die Theorie die sichere Zuordnung von in der jeweiligen Perspektive gesehenen Punkten voraussetzt, was oft schwierig ist. Inzwischen erleben solche Systeme mit ganz neuartigen Zuordnungsprinzipien und unter Ausnutzung der verfügbaren CAD-Information etwa in modellbasierten Stereosystemen eine Renaissance, die sich inzwischen auch in zeilenkamerabasierten, scannenden Stereomessmethoden nieder-

schlägt. Hier eröffnet sich ein neues und durchaus zukunftssträchtiges Messprinzip mit erheblichem Anwendungspotenzial.

Die Vermessung reflektierender Oberflächen fällt immer noch aus dem Rahmen der klassischen optischen 3D-Mess-technik heraus. Im Moment konkurrieren hier deflektometrische und konfokale Messmethoden zur Vermessung. Noch werden die meist notwendigen Messzeiten im Fertigungstakt bei vollflächiger Auswertung nicht erreicht, sodass solche Systeme gegenwärtig vorrangig offline oder bei niedrigem Fertigungstakt eingesetzt werden.

Bei der Planung einer Form- und Lagevermessung in der Fertigungslinie gibt es jedoch außer sensorischen Grundentscheidungen auch eine häufig unzureichend bedachte Problematik: die komfortable Beantwortung der Fragen, die man als Qualitätsverantwortlicher stellt. Sie betreffen immer Bezüge zwischen der CAD-Geometrie (Soll-Geometrie) und der Ist-Geometrie des Bauteils.

Gewünscht ist eine freie Eingabe von Messanforderungen, die man auf einer benutzerfreundlichen CAD-nahen Dar-

stellung spezifizieren kann. Diese Messanforderungen werden von Bauteiltyp zu Bauteiltyp möglicherweise völlig verschieden sein. Das Messsystem sollte sich dann selbst um die hierfür notwendige optimale Organisation der Messdatenauswertung ohne notwendige interaktive Eingriffe kümmern, und alle gewünschten Messresultate ins firmenspezifische CAQ-System eintragen. Das ist möglich und sollte bei den entsprechenden Applikationen auch eingefordert werden. □

Autor

Prof. Dr. Klaus Donner, geb. 1945, leitet den Lehrstuhl für Mathematik an der Universität Passau.

Kontakt

Prof. Dr. Klaus Donner
T 0851 509-3100
donner@forwiss.uni-passau.de

www.qm-infocenter.de

Diesen Beitrag finden Sie online unter der Dokumentennummer: **QZ110003**