

Schnelle 3D-Vermessung mit Multisensorsystemen auf Lichtschnittbasis

Dipl.-Ing. Bernhard Minge

Leiter 3D-Systeme

VITRONIC GmbH

Hasengartenstr. 14a

65189 Wiesbaden

Tel.: 0611/71520

Fax.:0611/715233

1. Einleitung

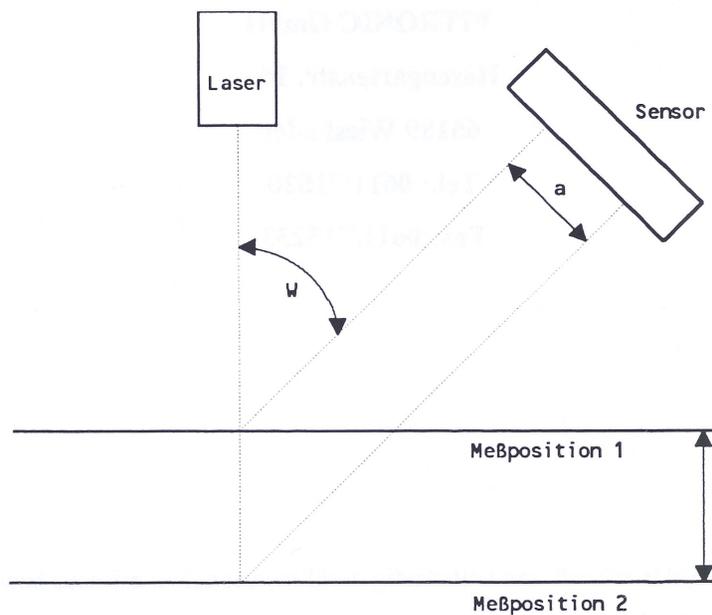
Menschen und/oder andere Objekte schnell und vollständig dreidimensional zu erfassen bzw. zu vermessen, ist häufig eine Aufgabe die bei der 3D-Meßtechnik gestellt wird. Mit Multisensorsystemen kann diese Aufgabe in Lichtschnitttechnik gelöst werden. In wenigen Sekunden werden Menschen und andere Objekte dreidimensional vermessen.

2. Meßprinzipien

Zur Erzeugung von dreidimensionalen Meßdaten sind in der Technik eine Reihe von Verfahren eingeführt. Am weitesten verbreitet sind *mechanische 3D-Koordinatenmeßmaschinen*. Hier führt eine Präzisionsmechanik einen Meßtaster an das Objekt. Sobald der Taster das zu vermessende Objekt berührt, wird die Koordinatenstellung der Meßmaschinenarme abgefragt, woraus sich die Koordinate des Berührungspunktes bestimmen läßt. Eine Variante hiervon ist die Ausführung mittels optischem Taster (Lasertriangulation), mit dem berührungslos gearbeitet werden kann.

Diese, mit sehr hoher Präzision arbeitenden Systeme benötigen allerdings eine lange Gesamtmeßzeit und ein nicht bewegtes Meßobjekt.

Bei der *Photogrammetrie* werden Bilder aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln erzeugt. Die Tiefeninformation wird dabei über zusätzlich aufgebrachte Paßmarken oder eindeutig identifizierbaren Kanten und Ecken gewonnen. Andere optische Verfahren, die auf der Erzeugung spezieller Lichtmuster (Streifenprojektion etc.) beruhen (*Phasenshiftverfahren*, *codierter Lichtansatz*), sind sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit (Reflexion) abhängig und benötigen für eine Messung mehrere in zeitlicher Folge aufgenommene Bilder, zwischen denen keine Bewegung des Objektes zulässig ist. Daher sind alle bisher genannten Verfahren zur Vermessung von bewegten Objekten nicht so gut geeignet.



- W = Beobachtungswinkel
- b = Höhendifferenz
- $a = f(b, W, \text{Sensorauflösung})$

Bild 1 : Entfernungs- und Höhenmessung mit Lasersensor

Grundlage des hier angewandten Meßprinzips ist daher das *Lichtschnittverfahren* zur dreidimensionalen Profilvermessung, das besonders bei bewegten Prozessen geeignet ist

3. Lichtschnittverfahren

Bei diesem Verfahren wird als Lichtquelle üblicherweise eine Laserlichtquelle mit vorgesetzter Zylinderlinse eingesetzt. Unter einem definierten Winkel zur Lichtquelle ist eine Videokamera angeordnet, in deren Bildfeld sich die auf dem Objekt abbildende Lichtlinie befindet. Entsprechend der Objekthöhen an der Linienposition erscheint die Lichtlinie im Kamerabildfeld verschoben und gekrümmt. Dabei bestimmt der Winkel zwischen Kamera und Lichtquelle (Lichtschnittwinkel) die Verstärkung der Verschiebung und Krümmung in Höhenrichtung. Es gilt, je größer der Winkel, desto größer die Verstärkung. Da der Winkel bekannt ist, kann die Objektform anhand der Lichtlinie durch einfaches Vermessen ermittelt und ein Profilschnitt des Objektes bestimmt werden. Jeder einzelne Lichtschnittsensor besteht somit aus einer Linienlichtquelle (Diodenlaser mit vorgeschalteter Zylinderoptik) und einer CCD-Matrix-Kamera ggf. mit einem auf den Linienlaser angepaßten Bandpaßfilter.

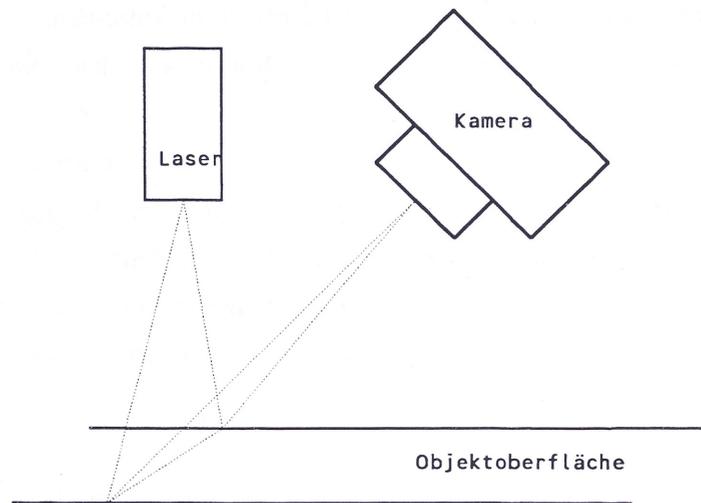


Bild 2: Meßaufbau Lichtschnitt

Wird nun der Sensor, bestehend aus der Lichtlinie und der aufnehmenden Kamera über das Objekt gefahren und werden gleichzeitig Profilschnitte erzeugt, die anschließend entsprechend dem Schnittabstand aneinandergereiht werden, entsteht ein 3D-Abbild der dem Sensor zugewandten Außenkontur des Objektes. Die so gewonnenen Meßdaten kodieren die Raumkoordinaten x,y,z der Auftreff-Linie des Laserlichts auf den Objekten. Der minimal mögliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Profilschnitten bei gegebener Fahrgeschwindigkeit des Sensors wird erreicht, wenn die Höhenprofile im Takt der Bildaufnahme (Videoechtzeit) aufgenommen werden. Dies ist bei den der europäischen Fernsehnorm genügenden CCD-Kameras ein 20 ms-Takt. Somit können pro Sekunden 50 Profilschnitte erzeugt werden.

Um ein 360°-Objekt vollständig aufnehmen zu können, reicht selbstverständlich ein Sensor nicht aus, da er nur die Teile des Objektes erfassen kann, die ihm zugewandt sind. Es müssen deshalb mehrere Sensoren miteinander kombiniert werden, die das Objekt aus unterschiedlichen Raumrichtungen anvisieren. Je nach geforderter Meßauflösung und Objektgröße kann es zusätzlich nötig sein, den Meßbereich in mehrere Kamerabildfelder zu unterteilen. All diese Sensoren müssen für eine erfolgreiche Messung aufeinander eingemessen werden, um die Meßwerte zusammenfügen zu können.

4. Auswertehard- und Software

An die Auswerteeinheit müssen zur Erzeugung unterschiedlicher Meßvolumen und Auflösungen nahezu beliebig viele der oben beschriebenen Sensoren parallel angeschlossen und betrieben werden können (Multisensor-System). Um dieses zu erreichen, werden leistungsstarke Prozessoren zur Datenverarbeitung zusammen mit eigens für dieses System entwickelten Echtzeit-Bildrechnerbausteinen verwendet. Diese Bildrechnerbausteine ermöglichen es, die Bilddaten nahezu beliebig vieler Sensoren parallel und synchron in Video-Echtzeit aufzunehmen und auszuwerten. Als Ergebnis liefern sie die 3D-Rohdaten für jeden Sensor, die dann im Arbeitsspeicher des Rechners zwischengespeichert und von den Prozessoren weiterverarbeitet werden. Bei der Weiterverarbeitung werden die 3D-Rohdaten der einzelnen Sensoren aus der Maßeinheit "Pixel" in metrische Maße transformiert und einer mathematischen Regressionsanalyse objektabhängiger Ordnung zur Erzeugung eines stetigen, geglätteten Signalverlaufs unterzogen. Im Anschluß werden alle Meßdaten der Schnittebenen zu einem 3D-Modell des Objektes verrechnet, wobei applikationsabhängig eine zusätzliche Glättung oder ein Bewegungsausgleich, durchgeführt werden kann. Die so gewonnene Punktwolke kann dann in CAD-oder Fräsdateien sowie in unterschiedliche 3D-Darstellungen überführt werden.

Die verschiedenen Scannergrößen unterscheiden sich dabei im prinzipiellen Aufbau und der Funktionsweise nicht voneinander, sondern stellen lediglich eine Variante bezüglich der Auflösung oder des Meßvolumens dar.

5. Mechanischer Aufbau

Voraussetzung für die vollständige 360°-Erfassung der Meßobjekte ist eine in einer Richtung verfahrbare 360°-Sensoranordnung.

Grundsätzlich sind drei Fahrtrichtungen vorstellbar. Dies sind lineare Verfahreinheiten, die sich vertikal, horizontal oder rotatorisch bewegen lassen. Die Drehtellersysteme haben dabei die geringsten Kosten, aber bei Relativbewegung zwischen Sensoren und Meßobjekt in einer anderen als die Vorschubrichtung, jedoch auch den größten Meßfehler. Da

die Bewegung zu Fehlmessungen innerhalb jeder einzelnen Meße Ebene führt, ist im Extremfall das Ergebnis unbrauchbar. Deshalb wurde für eine Vielzahl von Scannern ein Linearvorschub gewählt, bei dem evtl. Bewegungen den geringsten Einfluß haben und vor allem detektiert und aus den Meßdaten herausgerechnet werden können.

Um ein große Meßvolumen zu erfassen, sind konsequenterweise entsprechend große Verfahrwege der Sensoren und damit stabile und große Mechaniken nötig. Die erforderliche Antriebsregelung wird dabei durch einen Synchronlauf sichergestellt.

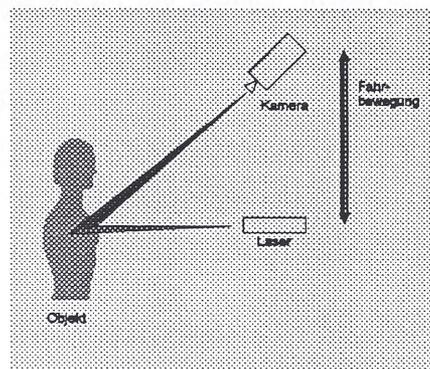
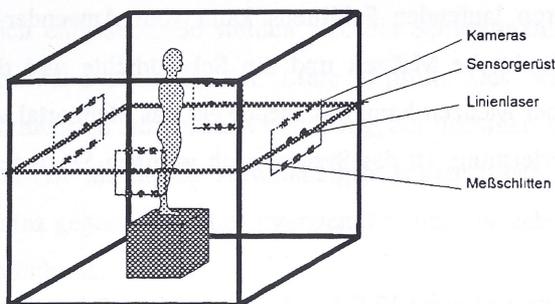


Bild 3: Scanneraufbau

Die Linienlaser sind auf in allen Freiheitsgraden justierbaren Sensorplattformen auf den Sensorgerüsten montiert. Sie werden beim Justieren der Anlage exakt waagrecht ausgerichtet, so daß die Schnittebenen plan liegen. Die gewählte Anordnung der waagrecht ausgerichteten Laserlinie und der dazu im Winkel stehenden Kameras garantieren "Ortstreue". Unabhängig von der Tiefe wird immer an der gleichen Bezugsposition in Vorschubrichtung gemessen. Ebenso wie die Laser sind auch die zugehörigen Kameras auf Justageelementen montiert.

Um die für die Meßauflösung erforderliche Linienqualität sicherzustellen, kann der jeweiligen Meßbereich mit unterschiedlichen Linienlasern in Beleuchtungsbereiche eingeteilt werden. Damit die geforderte Auflösung bei einem gegebenen Meßbereich erreicht wird, werden außerdem mehrere Kameras zur Aufteilung des Meßbereichs verwendet. Sie befinden sich oberhalb der Laser und spannen einen festgelegten Lichtschnittwinkel auf. Sind Hinterschnitte zu erwarten, werden weitere Kameras unterhalb der Laser angeordnet, die einen vergleichbaren Meßbereich abdecken. Selbstverständlich kann jede Kamera nur jene Objektbereiche vermessen, die in ihrem Bildfeld nicht verdeckt sind. Würden die unteren Kameras weggelassen, wären alle von den oberen Kameras abgewandten Bereiche nicht meßbar.

6. Meßablauf

Mit Beginn des Meßvorganges werden die Laserlichtquellen eingeschaltet. Während des Meßvorgangs fährt der Verfahrschlitten in Nenngeschwindigkeit nahezu vibrationsfrei in eine vom Benutzer vorgegebene Richtung. Ein Drehwinkelgeber liefert der Auswerteeinheit Taktsignale zur Berechnung der Sensorposition für jede individuelle Schnittmessung.

Die Kameras liefern während des Meßvorganges kontinuierlich Bildsignale, die schritthaltend wie beschrieben ausgewertet werden. Die Fahrgeschwindigkeit des synchron laufenden Schlittens kann vom Anwender für jede Messung individuell eingestellt werden. Sie beeinflusst direkt die Meßzeit und die Schnittdichte und damit die Systemauflösung in der Bewegungsrichtung. Nach Ablauf der Meßzeit kann das Meßobjekt das Meßportal verlassen, je nach gewünschter Datenmenge und eingesetzter Rechnerleistung, ist das System nach wenigen Sekunden für die nächste Messung bereit.

So gilt z.B. bei einem realisierten Ganzkörperscanner, daß während eines 17 Sekunden dauernden Meßvorganges eines 1,7 m großen Objektes 850 '360° -Schnitte' mit einem vertikalen Schnittabstand von 2 mm vermessen werden. Jeder Schnitt besteht aus fast 7000 Einzelmessungen, so daß in diesen 17 Sekunden ca. 6 Mio. 3D- Meßpunkte generiert werden, die zu einem 3D-Model von typischerweise 0,7-1 Mio. 3D-Konturpunkten zusammengefaßt werden. Die 6 Mio. 3D-Meßpunkte werden aus einem Rohdatensatz von 4,5 Mrd. Bildpunkten (4,5 GByte) generiert. Diese Datenmenge führt den Rechenaufwand vor Augen, der vom System in Video-Echtzeit bewältigt werden muß. Die 3D-Daten können nun ggf. nachbearbeitet werden (Schließen von Lücken an Hinterschneidungen oder Löchern; Manuelle Veränderungen einzelner Meßpunkte etc.).

7. Sensorjustage und -kalibrierung

Nach dem mechanischen Aufbau der Anlage müssen die Sensoren bei der Erstinbetriebnahme eingemessen werden. So kann es z.B. notwendig sein, 8 Linienlaser und 24 Kameras mechanisch exakt in allen Freiheitsgraden aufeinander einzujustieren. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem lediglich die Lichtlinien optisch mit einer elektronischen Justagehilfe aufeinander eingestellt und die Kameras grob auf ihren Meßbereich ausgerichtet werden müssen. Die Kamera-Bildfelder dürfen nach diesem groben Ausrichten zueinander in allen Achsen verschoben und gekippt sein; Es ist keine weitere Feinjustage nötig. Selbst unterschiedliche Brennweiten der Kameraobjektive sind zulässig. Das restliche Einrichten bzw. Einmessen geht anschließend vollautomatisch vonstatten.

8. Einsatzbereiche von Lichtschnittscannern

Zur Rohlingsgenerierung wird das Objekt im Scanner innerhalb von wenigen Sekunden dreidimensional vermessen. Die Meßdaten werden nach Sichtung und ggf. Aufbereitung mit der Möglichkeit interaktiver Änderungen der 3D-Daten in ein für CNC-Fräsmaschinen geeignetes Datenformat gewandelt. Auf der Fräsmaschine wird nun ein Modell gefräst, das wiederum als Ausgangsmaterial für einen Rohling dienen kann.

Neben dieser Anwendung werden 3D-Vermessungssysteme wie VIRO-3D in vielen industriellen Applikationen erfolgreich eingesetzt. So werden z.B. die Schweißnähte, Sicherheitsteile von Gurtschlußstraffern etc. mit diesem schnellen 3D-System in der Linie geprüft. Des weiteren wird es zur hochgenauen 3D-Vermessung von Aluminiumbarren zur genauen Befräsung, der flächigen Vermessung von Streugut zur Regelung von Streumühlen etc. eingesetzt. In all diesen Anwendungen waren neben der hohen Meßauflösung die extreme Schnelligkeit und Störtoleranz gegen Umfeldbedingungen die ausschlaggebenden Kriterien für den Einsatz von Multisensorsystemen auf Lichtschnittbasis.

Nicht beliebig lange stillhaltende Objekte (z.B. Menschen) schnell und vollständig dreidimensional erfassen bzw. vermessen. An Anwendungsmöglichkeiten für ein solches System gibt es keinen Mangel. In der Medizin könnten in der Orthopädie Verlaufskontrollen bei Rückgratverkrümmungen schnell und mit hoher Präzision durchgeführt werden. Die Meßdaten für maßgeschneiderte orthopädische Schuhe könnten ebenso einfach und genau ermittelt werden, wie für Stützkorsetts oder für medizinische Maßverbände von Brandopfern, bei denen diese Daten zusätzlich noch schonend, da berührungslos gewonnen würden. Die plastische Chirurgie wäre ein weiteres der vielen Anwendungsfelder in der Medizin. Maßkonfektion aus der Fabrik: In Verbindung mit automatischer Schnittgenerierung ist die Herstellung von Maßkonfektion nach automatischer 3D-Erfassung der Außenkontur des Kunden möglich. Für Bewegungsstudien, z.B. in der Medizin oder im Leistungssport, bieten sich Einsatzfälle, sofern die 3D-Erfassung schnell genug möglich ist. Plastische Darstellung eines 3D-Ganzkörper- Scans

Auch Kunst und Fotografie erhielten mit solchen Systemen völlig neue Impulse: Skulpturen und Büsten, die automatisch hergestellt werden können, und 3D-Fotografien würden neue Möglichkeiten der Portraitierungen schaffen. Im Film werden bereits jetzt Schauspieler mit viel Aufwand in "virtuellen Welten" nachgebildet und animiert. Hier können Datenbanken von Schauspielern geschaffen werden, wodurch der Übergang zwischen Realität und Animation wird noch fließender wird.