

# Nicht für die Schule, sondern für das Leben ....

Grundlagen der optischen Messtechnik: Triangulation



Triangulation ist ein trigonometrisches Verfahren zur Vermessung des Abstands eines Punktes von einem Referenzpunkt durch Anvisieren unter zwei verschiedenen Blickwinkeln. In der optischen Messtechnik versteht man unter einem Triangulationssensor einen Abstandstaster, der einen Laserstrahl unter einem definierten Einfallswinkel auf die Oberfläche eines Objekts projiziert und den Spot unter einem anderen Winkel auf eine Detektorzeile abbildet [1]. In Kombination mit einem Scanner oder einer Verschiebeeinheit kann man die gesamte Oberfläche eines Objekts abrastern und als Punktwolke im dreidimensionalen Raum darstellen. Der Artikel erläutert die Grundzüge des Verfahrens und einige grundlegende Konstruktionsprinzipien.

Jeder von uns hat das Grundprinzip der Triangulation schon in jungen Jahren in der Schule gelernt, verpackt in mehr oder weniger interessanten Fragestellungen, und ist später gelegentlich wieder darüber gestolpert. Wenn man wie in Abbildung 1 die Entfernung zwischen einem Punkt B und einem Objekt C nicht direkt messen kann, visiert man es von zwei verschiedenen Standpunkten A und B aus an, misst die Winkel, unter denen es in Bezug auf eine Referenzrichtung erscheint, und bestimmt den Abstand  $b$  zwischen den beiden Standpunkten, die Basisbreite. Mit ein wenig Trigonometrie kann man nun alle Stücke des Dreiecks ausrechnen, also auch den Abstand zwischen B und C. Wer sich schon einmal mit Stereo-Vision befasst hat, erkennt schnell, dass diese Kon-

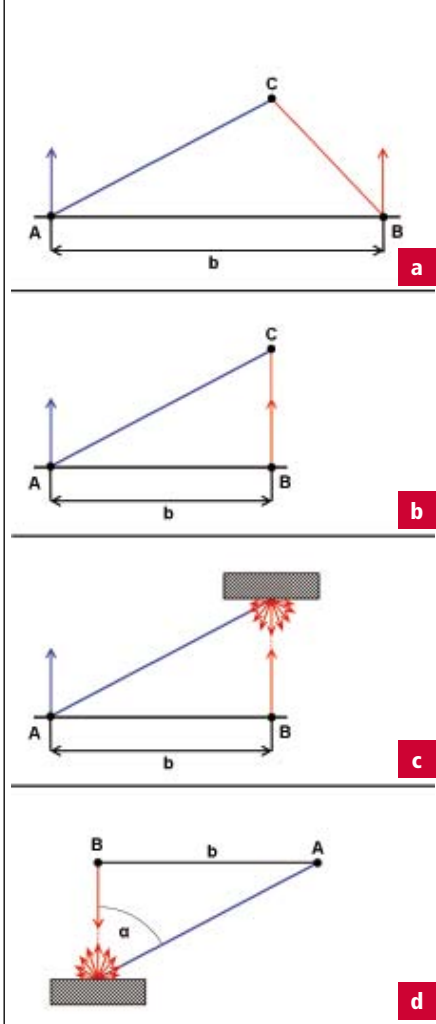


Abb.1: Das Triangulationsprinzip

figuration der Standard-Stereo-Geometrie mit zwei Kameras entspricht, deren optische Achsen parallel zueinander ausgerichtet sind [2]. Abbildung 1b zeigt einen Spezialfall, bei dem eine der beiden Blickrichtungen senkrecht auf der Basis steht. Im Triangulationssensor wird diese Blickrichtung durch einen Laserstrahl ersetzt, der unter einem definierten Beleuchtungswinkel einen Lichtfleck auf einer Oberfläche erzeugt. Vom Standpunkt A aus wird der Winkel bestimmt, unter dem der Laserspot auf der Oberfläche erscheint. Geometrisch ist diese Konfiguration vollkommen gleichwertig zu der Situation in Abbildung 1b. Gedreht um 180° entsteht die Geometrie von Abbildung 1d, die meist bei der Beschreibung eines Triangulationssensors verwendet wird: Ein Laserstrahl wird senkrecht auf eine Oberfläche gerichtet, und der Laserspot wird unter dem Triangulationswinkel  $\alpha$  von einem Linsensystem auf einen Detektor abgebildet.

### Die optische Abbildung

In Abbildung 2 ist die optische Abbildung des Laserspots vom Objekt in die Bildebene genauer dargestellt. Der Leuchtfleck wird mit einer Linse erfasst, deren optische Achse auf den Arbeitsabstand  $z$  des Sensors ausgerichtet ist. Wenn sich die

Oberfläche längs der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls verschiebt, der Abstand also größer oder kleiner wird, verschiebt sich auch die Position des Bildes in der Bildebene des Sensors. Die Verschiebung  $\Delta x$  in der Detektorebene ist in erster Näherung proportional zur Verschiebung  $\Delta z$  längs der Richtung des Laserstrahls:

$$\Delta x = \beta' \sin \alpha \Delta z$$

Dabei ist  $\beta'$  der Abbildungsmaßstab, der von der Brennweite  $f'$  der Optik und der Gegenstandsweite  $a$  bzw. der Bildweite  $a'$  abhängt:

$$\beta' = (a'/a) = f'/(a+f')$$

In der Bildebene eines Triangulationssensors muss folglich die Verschiebung  $\Delta x$  des Bildes des Laserspots in Bezug auf die optische Achse ermittelt werden. Dazu kann eine Detektorzeile mit diskreten Pixeln oder ein positionsempfindlicher Detektor, der ein Analogsignal liefert, verwendet werden. Der Proportionalitätsfaktor  $\beta' \sin \alpha$  ist in erster Näherung konstant. Abweichungen von der linearen Beziehung zwischen  $\Delta x$  und  $\Delta z$  können durch Kalibrierung erfasst und in der Auswertung kompensiert werden. Der Arbeitsbereich, also die maximale Verschiebung  $\Delta z$  um den Arbeitsabstand herum, wird durch die maximale Ablage  $\Delta x$  des Bildpunktes auf dem Detektor begrenzt, also letztlich durch die Länge der Detektorzeile. Die Tiefenauflösung ergibt sich aus der Genauigkeit, mit der die Position des Bildflecks erfasst werden kann. Bei einer Detektorzeile ist das auf den ersten Blick der Pixelabstand. Grundsätzlich kann der Schwerpunkt eines Spots, der sich über mehrere Pixel erstreckt, jedoch mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden. Für einen Sensor, in dem eine Detektorzeile mit 1024 Pixeln verbaut ist, wird man folglich eine Tiefenauflösung in der Größenordnung von einem Promille des Arbeitsbereichs erwarten.

### Die Scheimpflug-Bedingung

Aus Abbildung 2 geht auch hervor, dass die optische Abbildung unscharf wird, wenn die Objektebene sich längs der  $z$ -Richtung vom Arbeitspunkt aus nach oben oder unten verschiebt. Die Gegenstandsebene, die von der Linse scharf abgebildet wird, steht senkrecht auf der optischen Achse. Die Tiefenvariation  $\Delta z$  verläuft jedoch längs des Laserstrahls und ist damit gegenüber der Gegenstandsebene verkippt. Wenn der Detektor senkrecht auf der optischen Achse steht, ist das Bild über- oder unterfokus-

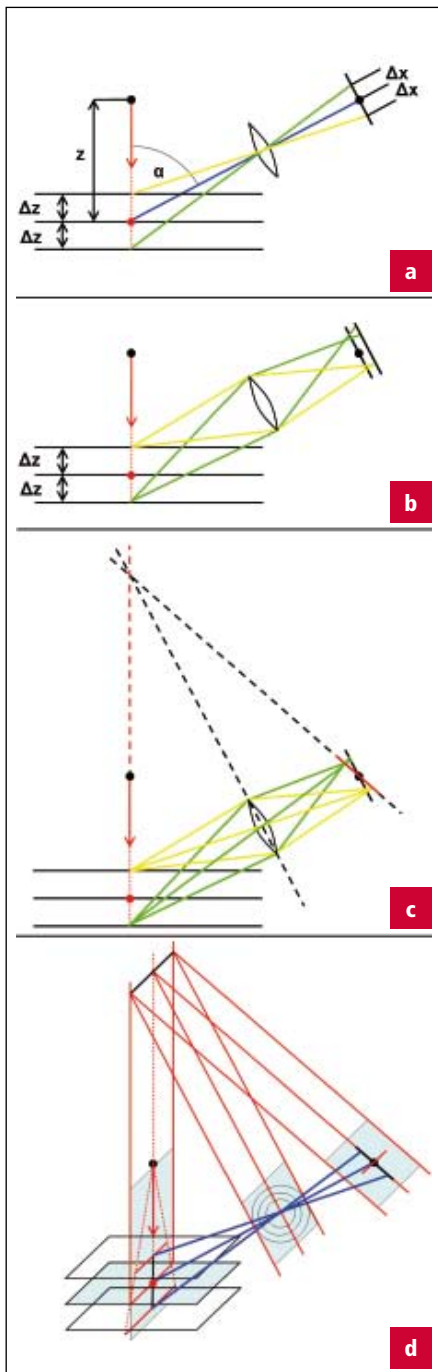


Abb.2: Die optische Abbildung beim Triangulationssensor. Damit in der Detektorebene ein scharfes Bild entsteht, muss der Sensor so verkippt werden, dass sich Gegenstandsebene, Linsenebene und Bildebene in einer Linie schneiden (Scheimpflug-Bedingung)

sichert, sobald es aus der zentralen Position herauswandert. Die Unschärfe in der Bildebene kann man kompensieren, wenn man den Detektor um die zentrale Position herum verkippt. Für den Kippwinkel muss die sog. Scheimpflug-Bedingung [1] erfüllt sein: Bildebene, Linsenebene und Gegenstandsebene müssen sich in einer Linie bzw. in einem Punkt schneiden, siehe Abbildung 2c. Die Gegenstandsebene wird beim Triangulationssensor durch den einfallenden Laserstrahl definiert, denn man

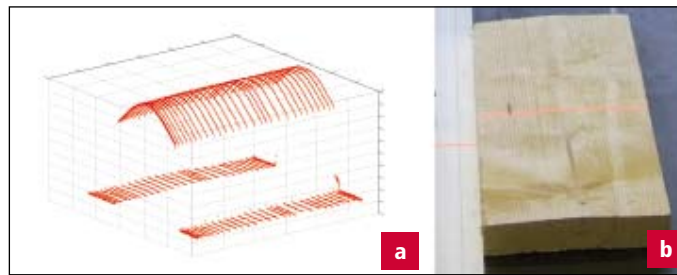


Abb.3: Eine Messung mit einem Lichtschnittsensor. Das Messobjekt wird senkrecht zur Laserlinie transportiert. Die Gesamtheit der Höhenprofile ergibt eine 3D-Darstellung der Oberfläche als Punktwolke.

möchte, dass alle Punkte, die sich im Arbeitsbereich auf dem Laserstrahl befinden, scharf abgebildet werden. Damit ist auch der nächste Schritt zum sog. Lichtschnitt-Verfahren nahe liegend: Anstelle eines dünnen Strahlenbündels kann man auch eine Laserlinie auf das Objekt projizieren und mit der Empfängeroptik auf einen Array-Detektor abbilden. Das Bild der Linie enthält Punkt für Punkt die Abstandsinformation für den korrespondierenden Punkt der Laserlinie auf dem Objekt. Die Gegenstandsebene, die der Scheimpflug-Bedingung genügen muss, wird dann durch die Laserlinie und die Ausbreitungsrichtung des Mittenstrahls definiert, also durch den entstehenden Laserfächer, siehe Abbildung 2d. Solche Anordnungen werden als Lichtschnitt-Sensoren bezeichnet. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für eine Messung mit einem kommerziellen Lichtschnitt-Sensor. Die Laserlinie verläuft senkrecht zu einem Vorschub, mit dem das Messobjekt unter dem Sensor hinweg bewegt werden kann. Für jeden Lichtschnitt ergibt sich ein Oberflächenprofil in der Ebene des Laserfächers. Die gesamte abgetastete Kontur des Objekts entsteht als Punktwolke aus der Aneinanderreihung der einzelnen Profile.

### Randbedingungen

Die Triangulation entsprechend Abbildung 2 funktioniert nur für diffus reflektierende Objekte. Der einfallende Laserstrahl muss zum Teil in Richtung der Nachweioptik remittiert werden, damit ein Signal entsteht. Glänzende, spiegelnde Oberflächen sind daher für das Verfahren nicht geeignet. Dunkle Flächen mit geringem Remissionsgrad erzeugen möglicherweise ein zu geringes Signal für eine verlässliche Bestimmung der Bildposition. Helle Objekte sind folglich besser für die Triangulation geeignet als dunkle Flächen. Für eine verlässliche Abtastung der Oberfläche muss die Remission tatsächlich an der Oberfläche erfolgen. Manche Materialien, z.B. einige Kunststoffe, sind jedoch Volumenstreuer, d.h. das Streulicht kommt aus einer ausgedehnten Zone im Innern des Materials. Das Streuverhalten kann außerdem stark von der Wellenlänge

abhängen. Materialien, die im Sichtbaren stark streuen, können im NIR nahezu transparent sein [3]. Die Wellenlänge der Beleuchtung muss folglich bei der Anwendung des Sensors berücksichtigt werden. Bei der optischen Auslegung ist zu beachten, dass die Scheimpflug-Bedingung lediglich eine Korrektur erster Ordnung ist. Ein Objektiv mit starker Bildfeldwölbung und optischer Verzeichnung wird zusätzliche Unschärfe und weitere Änderungen des Abbildungsmaßstabs längs der Detektorzeile hervorrufen. Hinzu kommen perspektivische Verzerrungen durch die Zentralprojektion bei Standard-Objektiven. Wenn Störreflexe in die Optik gelangen können, finden sich womöglich plötzlich zwei Spots in der Bildebene, und die Unterscheidung zwischen Nutz- und Störsignal kann schwierig werden. Generell muss sich ein Laserfleck oder eine Laserlinie im Bild hinreichend vom Hintergrund abheben. Hier kommt die Verknüpfung mit der Bildverarbeitung ins Spiel. Sowohl die Strahlformung durch die Beleuchtungsoptik als auch die Algorithmen können speziell so ausgelegt werden, dass die sichere Erkennung und Auswertung der Laserspots im Bild unterstützt wird. Auch die Projektionsoptik für die Beleuchtung muss optimiert werden, wenn die physikalisch mögliche Ortsauflösung quer zur Tiefenauflösung erreicht werden soll. Weiterbildungen des einfachen Lichtschnittprinzips sind Sensoren, die Gruppen von parallelen Linien oder Streifenmuster für die Beleuchtung verwenden.

### Literaturangaben

- [1] A. Donges, R. Noll, Lasermesstechnik, Hüthig, Heidelberg 1993
- [2] s. INSPECT 1/2006, Stereo-Vision, S. 18
- [3] s. INSPECT 2/2006, NIR-Imaging, S. 14

► **Autor**  
**Prof. Dr. Christoph Heckenkamp**  
 Hochschule Darmstadt  
 Studiengang Optotechnik und Bildverarbeitung  
 heckenkamp@h-da.de  
 www.fbmn.h-da.de

