

Triangulationssensoren für Roboteranwendungen

G. Seitz, G. Jahn, H. J. Tiziani
Institut für Technische Optik
Pfaffenwaldring 9
7000 Stuttgart 80

Viele Meß- und Prüfprobleme in Fertigung und Montage sind durch reine Grauwert-Bildverarbeitung nicht befriedigend zu lösen, weil hier nur ein informationsreduziertes zweidimensionales Abbild der real dreidimensionalen Szene als Informationsbasis zur Verfügung steht. Dreidimensionale Objektinformation bietet hingegen ein wesentlich höheres Informationspotential und ermöglicht neben völlig neuen Lösungsansätzen auch weniger aufwendige Lösungen von Standardproblemen /1/.

Zur dreidimensionalen Objekterfassung werden punkt- und flächenhaft arbeitende Verfahren eingesetzt. Punktverfahren gewinnen Abstandsbilder durch zeitsequentielle Meßpunkterfassung, wohingegen flächenhafte Verfahren auf zeitlich paralleler Erfassung von 3-D-Information beruhen /2/. Die folgenden Ausführungen beschränken sich ausschließlich auf punktorientierte Verfahren. Bild 1 zeigt einige punktorientierte, für Roboteranwendungen geeignete Abstandsmessverfahren.

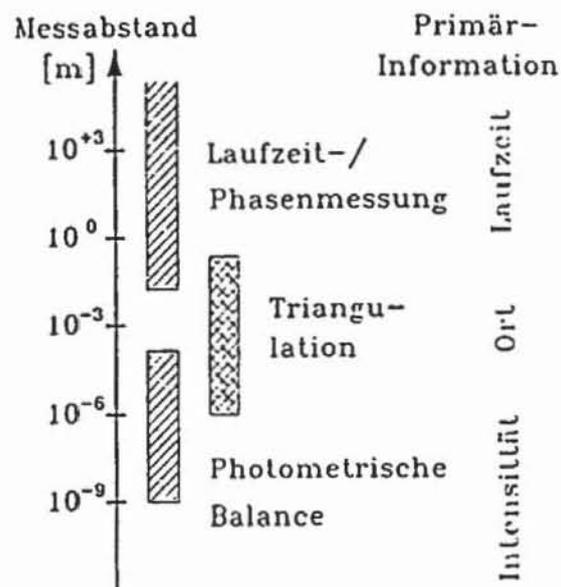


Bild 1: Abstandsmessverfahren für Roboteranwendungen

Photometrische Balance-Verfahren basieren auf optischer Pupillen-Triangulation; die Auflösung hängt also direkt von der Apertur des Meßsystems ab. Da große Aperturen im allgemeinen nur bei geringen Objektweiten unter vertretbarem Aufwand realisierbar sind, ist der Anwendungsbereich auf kleine Objektabstände begrenzt.

Laufzeit bzw. Phasenmeßverfahren basieren auf der zeitlichen Vermessung eines modulierten Lichtsignals /3/. Die obere Meßbereichsgrenze wird durch das Signal/Rauschverhältnis der Detektionsmimik bestimmt und kann bei günstigen Intensitätsverhältnissen, etwa bei Verwendung von Retroreflektoren, mehrere tausend Kilometer betra-

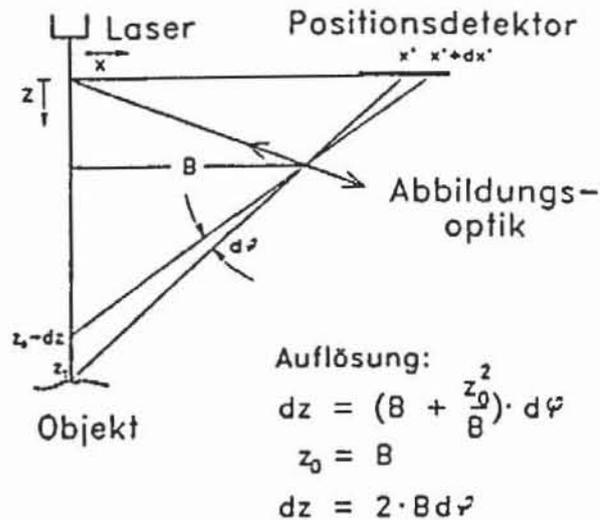
gen. Die untere Grenze scheint durch die technischen Möglichkeiten zur Auflösung von Signallaufzeiten im Pikosekundenbereich gegeben zu sein. (Laufzeit für 1mm: 6 ps). Der für Roboteranwendungen interessante Bereich zwischen 1 μm und 1 m wird voll durch die optische Triangulation abgedeckt /4/.

Eine in diesem Zusammenhang interessante Eigenschaft der Triangulation liegt darin, daß der Kompromiß zwischen Auflösung und Meßbereich direkt durch Wahl der Triangulationsbasis vorgegeben werden kann (Bild 2). Die Z-Auflösung der Triangulation ist also unter Annahme eines der Basis entsprechenden Meßabstandes gleich dem doppelten Produkt aus Basis und Winkelauflösung des Detektionssystems. Die im Beispiel angegebene Winkelauflösung wird bei einem CCD-Detektor mit 10 μm Pixelperiode und einem Abbildungsmaßstab von ca. 3:1 erreicht, wenn die Punktbildposition mit einer Genauigkeit von nur einem Pixel aufgelöst wird.

Das in Bild 2 dargestellte Triangulationsverfahren mißt nur den z-Abstand des Anstastpunkts und arbeitet daher eindimensional. Eine mehrdimensionale Erweiterung dieses Verfahrens erfordert, daß mindestens einer der beiden Strahlengänge umgelenkt wird. Zur dynamischen Umlenkung optischer Strahlengänge können folgende Prinzipien verwendet werden:

- Spiegelpolygone
- Akusto-optische Modulatoren
- Galvanometerspiegel

Spiegelpolygone sind mechanisch schnell rotierende Körper und können infolge von Kreiselmomenten nur unter großen Problemen am Roboterarm betrieben werden. Akusto-optische Modulatoren sind zwar sehr schnell, arbeiten aber nur in Ablenkbereichen bis ca. 1 Grad, was keine ausreichenden Meßfelder zuläßt. Galvanometerscanner erreichen dahingegen Ablenkbereiche von ca. 40 Grad und verursachen keine merklichen Kreiselmomente. Galvanometerscanner scheinen daher momentan die besten Voraussetzun-



z. B.:

$$B=200\text{mm}, d\varphi=2 \cdot 10^{-4}, dz=10\mu\text{m}$$

Bild 2: Prinzipskizze
optische Triangulation

gen zur Verwendung in einem Robot-Sensor zu bieten.

Der einfachste Ansatz zur dreidimensionalen Lasertriangulation ist das in Bild 3 wiedergegebene direkte Triangulationsverfahren: ein über 2 Galvanometerspiegel abgelenkter Laserstrahl markiert einen Oberflächenpunkt P, welcher dann auf ein Kamertarget abgebildet wird. Aus den Stellwinkeln der Galvanometerscanner sowie den Koordinaten des Bildpunktes P' folgen die 3 räumlichen Koordinaten des Antastpunkts P. Zur Positionsdetektion können neben CCD-Kamertargets auch Lateraleffektdioden verwendet werden. Verglichen mit CCD-Kamertargets erreichen Lateraleffektdioden wesentlich höhere Geschwindigkeiten. Lateraleffektdioden haben jedoch den Nachteil, daß ein Signal erzeugt wird, welches den Intensitätsschwerpunkt des Gesamtbildes wiedergibt. Existieren also neben dem Punkt P' noch weitere, etwa durch Umgebungslicht verursachte Bildmerkmale, so erfolgt eine Verfälschung der Punktcoordinate. Schmalbandige, auf die Wellenlänge des Antastlasers abgestimmte Interferenzfilter reduzieren zwar diesen Effekt, bieten jedoch keine Abschirmung gegen sekundäres Streulicht. Eine ausreichende Störsignalunterdrückung scheint nur bei Verwendung ortsauflösender Sensoren möglich, wo durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitung Sekundärreflexionen aufgelöst und anhand einfacher Merkmale wie z. B. geringerer Signalamplitude eliminiert werden können. Zweidimensionale CCD-Arrays sind augenblicklich mit bis zu 2000 * 2000 Pixeln erhältlich und bieten daher eine ausreichende Auflösung. Die Bildfrequenzen dieser CCD-Sensoren sind jedoch mit ca. 6 Bildern/Sekunde sehr niedrig. Im Unterschied hierzu arbeiten Hochgeschwindigkeits-CCD-Targets mit Bildfrequenzen von mehreren KHz bei Pixelzahlen in der Größenordnung von 250 * 250 Pixeln, was wiederum keine ausreichende Auflösung gewährleistet.

Berücksichtigt man nun, daß die Triangulation auf der Vermessung eines ebenen Dreiecks beruht, dessen Neigung über den Stellwinkel des Galvanometerscanners 2 (Bild 3) bekannt ist, so wird klar, daß die y-Koordinate des Punktbildes P' zur Bestimmung der Antastkoordinaten überhaupt nicht erforderlich ist. Das CCD-Kamertarget könnte also durch eine CCD-Zeile ersetzt werden, wodurch eine hohe Meßgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Auflösung erzielt werden kann. Voraussetzung hierfür ist, daß das Punktbild auf die Zeile abgebildet wird. Dies kann durch eine anamor-

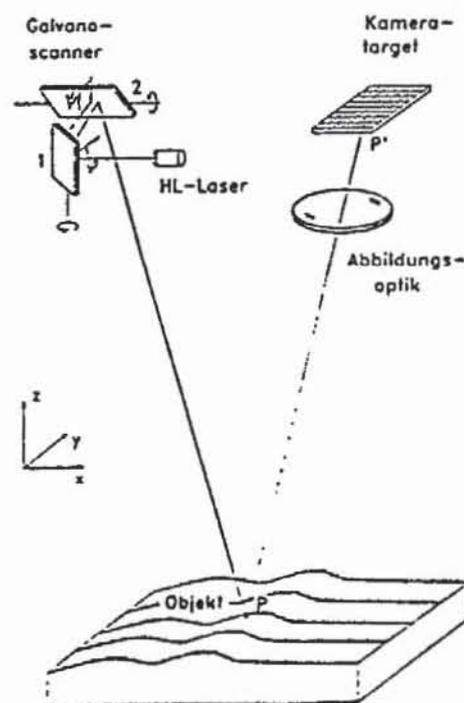


Bild 3: Direkte Lasertriangulation

photische Optik näherungsweise erreicht werden (Bild 4). Die in Bild 4 gezeigte Anordnung wurde in einen Roboterkopf (Bild 5) eingebaut und wird zur Vollständigkeitsprüfung elektronischer Leiterplatten eingesetzt. Erreicht werden folgende Leistungsdaten:

- Antastvolumen: $100 \times 70 \times 100 \text{ mm}^3$
- Meßabstand: 200 mm
- Auflösung: 0.1 mm
- Meßzeit: $\geq 1 \text{ ms/Punkt}$

Die Meßzeit ist variabel und wird entsprechend den Intensitätsverhältnissen des Antastpunkts eingestellt.

Der Meßbereich des beschriebenen direkten Triangulationsverfahrens wird durch Schärfentiefeprobleme bei der Abbildung eingeschränkt. Da die Beleuchtungsstärke in der Bildebene etwa quadratisch mit dem Abstand des Meßobjekts von der Fokusebene abnimmt, ist der Tiefenmeßbereich dieses direkten Triangulationsverfahrens verhältnismäßig klein; das Verfahren eignet sich also vornehmlich für Objekte mit geringer z-Ausdehnung.

Ein erweiterter z-Meßbereich kann durch verbesserte abbildungsseitige Schärfentiefeverhältnisse erreicht werden.

Durch geeignete Anordnung von Antaststrahl, Detektor und Abbildungssystem kann die Scheimpflug-Bedingung erfüllt werden (Bild 6). Hierdurch wird eine scharfe Abbildung des Antastpunkts über den gesamten Meßbereich auf Kosten einer konstanten Vergrößerung gewährleistet.

Eine Erfüllung der Scheimpflug-Bedingung im zweidimensionalen Fall erfordert nun eine synchrone Ablenkung von Antast- und Abbildungsstrahlengang. Bild 7 zeigt hierzu einen Ansatz: der Laserstrahl wird über einen Galvanometerspiegel abgelenkt, dessen

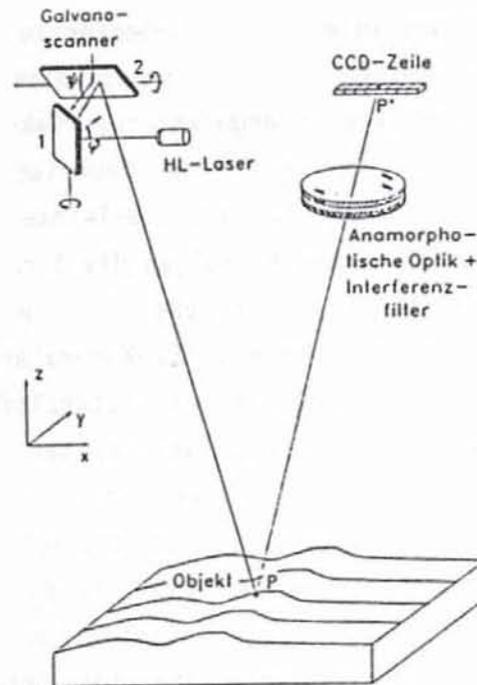


Bild 4: Direkte Lasertriangulation mit Zeilensensor

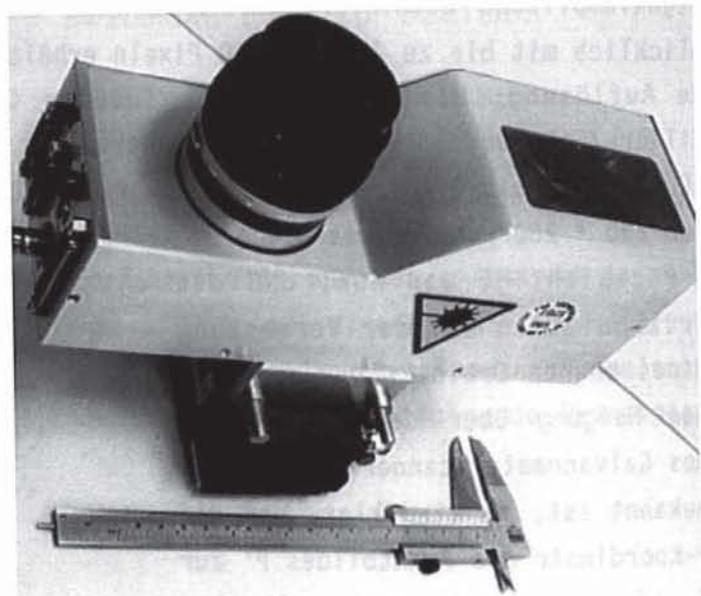


Bild 5: Roboterkopf mit Triangulationssensor

Rückseite zur Ablenkung des Abbildungsstrahlengangs verwendet wird. Bei einer Drehung des Galvanometerspiegels folgt das Bildfeld dem Antastpunkt. Laserstrahl und optische Achse der Detektionsoptik schneiden sich bei Durchfahren des Meßbereichs allerdings nicht unter exakt gleichbleibendem Winkel. Da jedoch ein konstanter Winkel zwischen Antaststrahl und optischer Achse notwendige Bedingung zur Erfüllung der Scheimpflug-Bedingung ist, kann diese nicht exakt über den gesamten Meßbereich erfüllt werden.

Einen weiteren Ansatz zeigt Bild 8: Laserstrahl und Abbildungsstrahlengang werden über dieselbe Fläche eines Galvanometerspiegels abgelenkt, wodurch der Winkel zwischen Antaststrahl und optischer Achse auch bei Drehen des Galvanometerspiegels konstant bleibt; die Scheimpflug-Bedingung kann also über den gesamten Meßbereich exakt erfüllt werden. Laser-Streulicht, verursacht durch Staubpartikel auf dem Galvanometerspiegel, hat keinen entscheidenden Einfluß auf die Punktdetektion, da dieser Spiegel nahe einer Pupillenebene des Abbildungssystems liegt und Pupillen-

und Bildebene über eine Fouriertransformation zusammenhängen; punktförmige Objekte in der Pupillenebene erhöhen also nur den Gleichlicht-Anteil in der Bildebene. Diese zweidimensional arbeitende Anordnung kann nun durch Verschieben des Seitenspiegels in Richtung der Galvanometerspiegel-Drehachse um die dritte Meßdimension erweitert werden. Die hierbei auftretende Defokussierung des Punktbilds ist durch Hinzunahme eines entsprechenden Seitenspiegels im Abbildungsstrahlengang zu verhindern (Bild 9). Dieser Spiegel wird mit dem antastseitigen Seitenspiegel starr gekoppelt

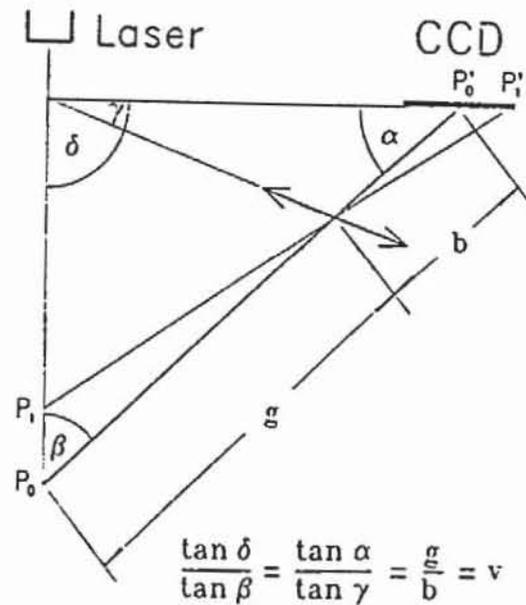


Bild 6: Scheimpflug-Bedingung

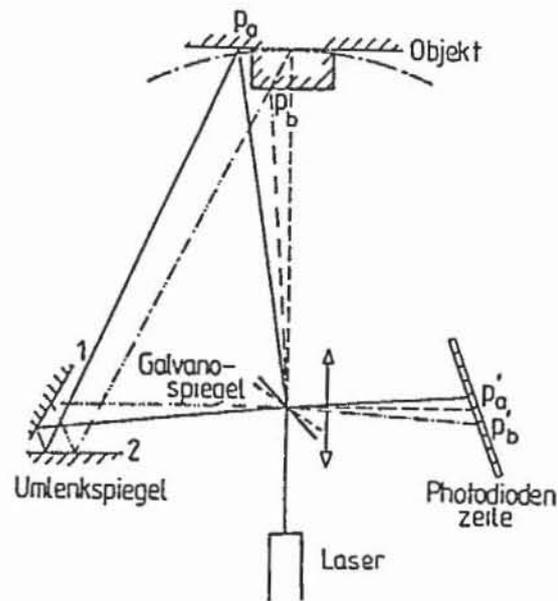


Bild 7: Synchrones Triangulationsverfahren

pelt, wodurch eine exakte Fokussierung des Antastpunktes über den gesamten Meßbereich erreicht werden kann.

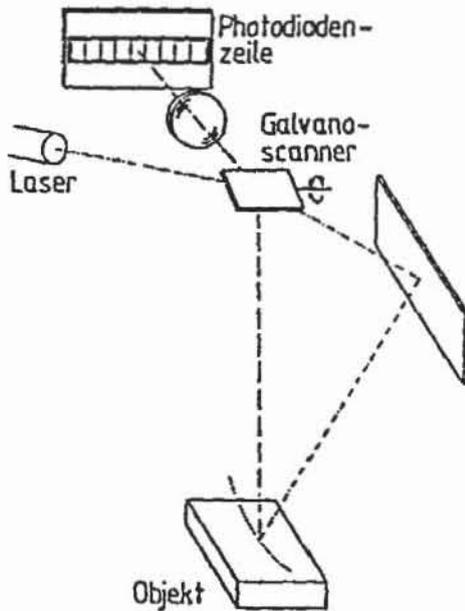


Bild 8: Synchrones Triangulationsverfahren mit verflochtenem Strahlengang

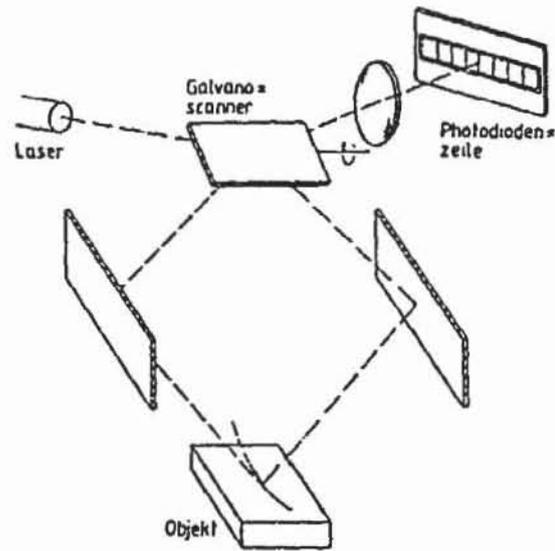


Bild 9: 3-D-Triangulationsverfahren mit verflochtenem Strahlengang

Schrifttum:

- /1/ Tiziani, H., J.: Automatisierung der optischen Qualitätsprüfung
Technisches Messen Vol. 55, Nr. 12, 1988, S. 481-491
- /2/ Jarvis, R., A.: A Perspective on Range Finding Techniques for Computer
Vision; IEEE Vol. PAMI-5, Nr. 2, 1983, S. 122-139
- /3/ Schwarte, R.: Performance Capabilities of Laser Ranging Sensors.
Proc. ESA, Workshop on Space Laser Applications and
Technology (ESA SP-202, May 1984).
- /4/ Seitz, G.; 3-D Koordinatenmessung durch optische Triangulation.
Tiziani H. J.; Feinwerktechnik + Messtechnik, Vol. 94, Nr. 7, 1986,
Litschel, R.: S. 423-425