

Taktil-los

Entfernungsbestimmung mit dem Laser

Der Wilderer im Silberwald hat ein ruhiges Gewissen. Weder der Hirsch, den er gerade mit seinem Laserzielfernrohr anvisiert noch irgendwelche unbeteiligten Zeugen brauchen sich Gedanken um ihr Augenlicht zu machen. Der Halbleiterlaser in der Zieloptik erfüllt nämlich die Bestimmungen der Laserschutzverordnung, Klasse I.

Innerhalb einer Sekunde liefert das System seinem Benutzer die Entfernung des ausgewählten Ziels auf 2 m genau, was mit dazu beiträgt, daß sich der Hirsch bald überhaupt keine Gedanken mehr zu machen braucht. Und das, obwohl mehr als 600 m zwischen dem Wild und dem Schützen liegen.

Dieses Beispiel einer Laser-Entfernungsmessung erscheint Ihnen zu brutal? Bitte sehr:

Golfspieler versuchen mit Laser-Rangefindern ihr Handicap zu verbessern, in der Automatisierungstechnik sorgen Laser-Abstandssysteme mit Submillimetermeßgenauigkeit für Vollständigkeitsanalysen, Vermessung von Werkstücken, die Kontrolle von Leiterplattenbestückungen etc.

Neben der hohen Meßgeschwindigkeit ist der größte Vorteil optischer Distanzerfassung, daß sie berührungslos funktioniert. Die Technik kommt deshalb selbst mit klebrigen, chemisch aggressiven, heißen oder auch empfindlichen Oberflächen zurecht, solange dem Empfänger das reflektierte Signal für eine Messung ausreicht. Kein mechanischer Verschleiß, wie er bei taktilen Verfahren auftritt, trübt die Meßfreude.

Je nach Meßbereich und erforderlicher Genauigkeit, haben sich verschiedene Laser-Abstandsmeßverfahren etabliert, z.B.:

- Pulslaufzeitmessung
- Phasenverschiebung
- Triangulation
- Absolute Interferometrie

Pulslaufzeit

Auch das schnellste Photon braucht eine bestimmte Zeit, um die Strecke Sender – Ziel – und zurück zum Empfänger zurückzulegen. Da sich bei bekanntem Brechungsindex die Lichtgeschwindigkeit im Ausbreitungs-

medium leicht aus der definierten Vakuumlichtgeschwindigkeit berechnen läßt, ist die Laufzeit des Lichtpulses ein direktes Maß für die Zieldistanz.

Je höher die Anforderungen an die Genauigkeit und die Auflösung der Abstandsmessung sind, desto aufwendiger und somit kostspieliger wird diese Methode. Die Auswerteelektronik, einschließlich des Empfängers und der Signalverarbeitung, muß nämlich Zeiten auf der Nano- und Subnanosekundenskala verarbeiten. Während der Dezimeterbereich noch relativ leicht mit Nanosekunden-Pulsen beherrschbar ist, verlangt die Millimeter- und Submillimeter-Meßgenauigkeit nach optischen Pulsen mit einer Dauer von einigen zehn Pikosekunden und sehr speziellen Signalverarbeitungstechniken.

Anschaulich ist klar, daß ein verschmierter, plattgedrückter Puls die Auflösung verschlechtert. Mathematisch gesprochen, ist die Standardabweichung der Meßentfernung proportional zur Anstiegszeit des optischen Pulses und außerdem umgekehrt proportional zum Signal/Rausch-Verhältnis.

Ein Beispiel für ein augensicheres Halbleiter-PulsLaserradar mit einem Meßbereich von 2 m und einer Auflösung unter 1 mm ist in Lit. 1 beschrieben.

Bei Entfernungen oberhalb einiger Kilometer hat die Signalauswertung mit ganz anderen Problemen zu kämpfen. Immer weniger vom Ziel reflektierte Photonen erreichen anschließend den Detektor. Eine Verbesserung der Signalintensität kann durch geeignete Bündelung schon in der Sendeoptik geschehen. Zusätzlich bringen Retroreflektoren am Zielobjekt die Lichtstrahlen in die richtige Bahn. So auch beim „Lunar-Ranging-Experiment“ der NASA, bei dem mehrere optische Reflektoren auf dem Erdtrabanten mithalfen, seine Entfernung zur Erde auf 5 cm genau zu messen.

Die Reichweite des Systems erhöht sich natürlich, wenn empfindlichere Empfänger verwendet werden. Eine low-cost-Avalanche Photodiode kann bei gleicher Laserleistung etwa viermal so weit messen wie eine PIN-

Diode, und eine high-end-APD schafft sogar die zehnfache Entfernung.

Auf der Emitter-Seite sind passende PulsLaserdioden nur im Infraroten verfügbar (zw. 850 und 1650 nm). Das hat zwar zur Folge, daß der Strahl selbst nicht sichtbar ist, erleichtert aber, vor allem im langwelligen Bereich, bei hinreichend kleinen Pulsbreiten die Augensicherheit der Systeme zu erreichen, trotz hoher optischer Spitzenleistungen.

Sehr kompakte, portable Meßgeräte sind mit Hilfe einer coaxialen Optik für Sende- und Empfangsstrahl sowie durch Integration der Auswerteelektronik realisierbar.

So werden zum Beispiel bei der Optical Time Domain Reflectometry

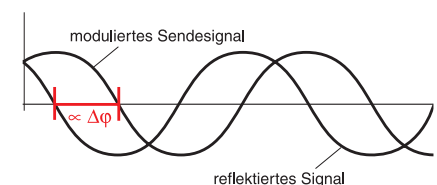


Abb. 1: $\Delta\phi$ ist durch die Entfernung zum reflektierenden Objekt festgelegt. Eine eindeutige Abstandsmessung ist nur dann gewährleistet, wenn $\Delta\phi$ kleiner als 360° ist. (Zur besseren Veranschaulichung ist ein amplitudenmoduliertes Signal dargestellt.)

(OTDR) schadhafte Stellen in Lichtwellenleitern anhand der an ihnen reflektierten Signale lokalisiert und charakterisiert.

Auch die LIDAR-Geräte, die schon seit Jahrzehnten die Atmosphäre erkunden, sind mit dieser Technik eng verwandt.

Phasenverschiebung

Bei der Phasenverschiebungsmethode mißt man sozusagen das Echo einer Modulation des ausgesandten CW-Laserstrahls (Abb. 1). Die Phasenverschiebung zwischen emittiertem und empfangenem Signal ist proportional zum Lichtlaufweg und läßt sich mit relativ einfachen Mitteln auswerten. Kommt das Licht erst dann am Empfänger an, wenn sich der Sender schon mit der nächsten Modulationsperiode beschäftigt, ist die Phasenverschiebung zwischen den Signalen größer als 360° . Die Entfernung kann dann nicht mehr ohne weiteres eindeutig bestimmt werden. Demnach

Special: Laser-Abstandsmessung

ist der maximale eindeutig meßbare Abstand die Strecke, die das Licht innerhalb einer Modulationsperiode zurücklegt. Das Verfahren wird bei Distanzen von einigen zehn Metern angewendet.

Der Eindeutigkeitsbereich der Entfernungsmessung kann durch Mehrfrequenzmodulation oder Modulation mit einer variablen Frequenz erweitert werden.

Triangulation

Bei Meßbereichen von einigen Millimetern bis zu maximal 10 Metern ist die Triangulation das meistbenutzte Entfernungsmeßverfahren (Abb. 2). Ein Laser oder eine LED sendet einen gut kollimierten Analysestrahl auf die Zieloberfläche. Von dort wird das Licht i.a. in alle Richtungen gestreut. Die Lage des Abbildungspunktes des Streulichts auf der Detektoroberfläche ist abhängig von der Entfernung zum Objekt. Ortsauflösende Detektoren wie PSDs (positionsempfindliche Detektoren), Mehrelement-Dioden oder CCD-Zeilen vermögen den Auftreffpunkt des Lichts mit hoher räumlicher Auflösung und hoher Abtastfrequenz (bis MHz) zu ermitteln. Einfache trigonometrische Beziehungen führen zur zuverlässigen Entlarung der Objektentfernung, mit einer Genauigkeit, die besser als 0,5 % ist.

Weniger als 10 ms Meßdauer sind erforderlich, so daß auch Schwingungen online erfaßt werden können.

Die Lichtquelle sollte kompakt sein und muß einen möglichst kleinen Lichtfleck ausreichender Intensität aussenden, der sich mit zunehmender Entfernung nur wenig aufweitet. Eine leichte Modulierbarkeit der Amplitude ist dann wichtig, wenn das System zwischen Störungen aus der Umgebung (Fremdlicht) und dem modulierten Meßsignal unterscheiden muß. Kollimierte Halbleiterlaser, die im

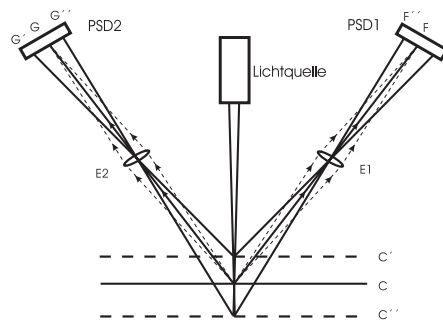


Abb. 2: Triangulationsverfahren

Streulicht, das von einem Objekt in der Ebene C über die Optik E auf den Detektor abgebildet wird, trifft diesen im Punkt F. Befindet sich das Objekt in einer anderen Ebene, z.B. C' oder C'', registriert der PSD das Licht in F' bzw. F''.

Bei der doppelten Triangulation kümmern sich zwei Detektoren um die Auswertung der Signale.

Sichtbaren oder im nahen Infraroten emittieren, erfüllen diese Vorgaben und kommen deshalb bevorzugt zum Einsatz.

Bei Verwendung eines einzigen Detektors können sich Kanten durch ungünstige Abschattungen störend bemerkbar machen. Die „doppelte Triangulation“ überwindet solche Probleme (Abb. 2). Durch die Kompensationswirkung der beiden Detektoren ist die laterale Empfindlichkeit deutlich verbessert, was zu einer Abstandsauflösung von mindestens 0,01 % führt. Die Summe der Signale der beiden Detektoren ist direkt proportional zur Energiemenge, die den Empfänger erreicht, was eine automatische Regelung der Sendeleistung ermöglicht.

Auch bei unregelmäßig strukturierten oder nahezu transparenten Oberflächen führt diese Technik zum Erfolg.

Noch einen Schritt weiter geht die „rotationssymmetrische Triangulation“.

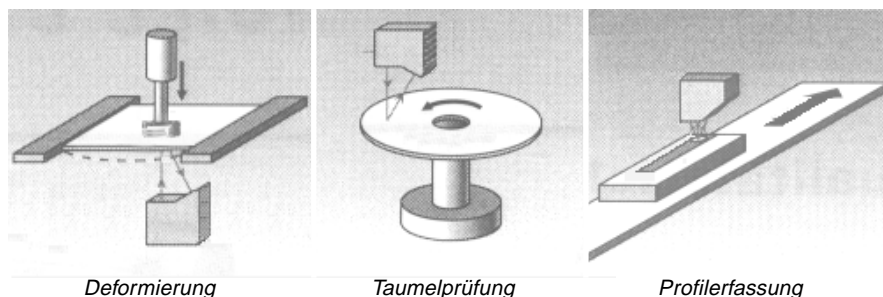


Abb. 3: Die Kontrolle der Produktqualität geschieht immer häufiger in Echtzeit schon während des Fertigungsprozesses. Zu dieser Entwicklung haben sicher auch die Qualitätssicherungsvorschriften der ISO 9000ff beigetragen.

Eine spezielle Optik bildet das reflektierte Licht heilighinscheinartig auf einen ringförmigen PSD ab. Die Position des Lichtrings verschiebt sich, wenn die Entfernung zum Objekt verändert wird.

Abschattungen beliebig orientierter Kanten oder Nuten spielen nun keine Rolle mehr, Farb- und Helligkeitsänderungen der Meßoberflächen wirken sich nicht aus. Auch stark glänzende Gegenstände können sich der Messung nicht mehr entziehen.

Bei schnell bewegten, rotierenden oder vibrierenden Meßobjekten kann die kurze Belichtung mit einer Puls-laserdiode die Meßgenauigkeit verbessern.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Triangulation sind äußerst vielfältig (s. Abb. 3). Unter anderem kontrollieren und regeln solche Verfahren in Echtzeit Produktionsprozesse, überwachen die Produktqualität, positionieren Roboterarme und regeln die Fahrwerke der Rennbolide von Schumacher, Frentzen und Co.

Absolute Interferometrie

Wo Abstandsmessungen eine Genauigkeit in der Größenordnung weniger Mikrometer erfordern, vertraut man auf die Unbestechlichkeit von Interferenzeffekten:

Vom Licht der Wellenlänge λ_1 paßt eine bestimmte Anzahl Wellenlängen in den Abstand L (s. Abb. 4). Ein kontinuierliches Durchstimmen der Wellenlänge bis λ_2 entspricht anschaulich

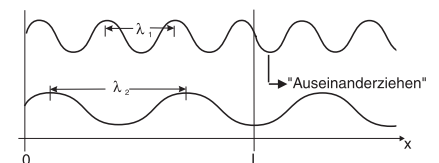


Abb. 4 Beim kontinuierlichen Durchstimmen der Wellenlänge ist die relative Phasenlage der Wellen λ_1 und λ_2 bei $x = L$ ein Maß für die Entfernung L.

lich einem „Auseinanderziehen“ der Lichtwelle. Dabei läuft eine von L eindeutig abhängige Anzahl Wellenberge am Beobachtungsort bei $x = L$ vorbei. Die Aufgabe des Interferometers besteht nun darin, diese Zahl möglichst genau zu ermitteln.

Ist $\Delta\Phi$ die meßbare Phasendifferenz, welche aus der kontinuierlichen Wellenlängenänderung resultiert (Lit. 2), so ergibt sich der Abstand zu

$$L = \Delta\Phi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

	Pulslaufzeitmessung	Triangulation	Absolute Interferometrie
Meßbereich	finanziell interessant: einige 10 m bis einige 10 km	einige mm bis max. 10 m meist 5 - 200 mm	mit konv. Halbleiterlaser: ca 1 m mit External Cavity Laser > 40 m
Genauigkeit	Submillimeterbereich möglich	0,01 % erreichbar	in Größenordnung der benutzten Wellenlänge
Bauteile:	Emitter	Impulsaserdiode; verfügbar zw. 850 und 1650 nm	kollimierte Laserdioden, vis oder NIR. Oder LED
	Detektor	Si-/InGaAs-PIN-Photodioden Si-/InGaAs-Avalanche-Photodioden für höhere Reichweite	modensprungfrei durchstimmbare Laserdioden
		PSDs, CCD-Zeilen, Mehrelement-Dioden	Standard-Photodioden

(Der Bruch wird auch als „synthetische Wellenlänge“ Λ_s bezeichnet.)

Dazu mißt ein Michelson-Interferometer während des Durchstimmens die Phasenänderung. Da die Wellenlängen λ_1 und λ_2 bei Halbleiterlasern nicht ohne weiteres reproduzierbar eingestellt werden können, mißt man gleichzeitig mit einem zweiten Interferometer eine wohlbekannte Referenzstrecke.

Aus dem Verhältnis der Meßergebnisse ergibt sich:

$$L = L_{\text{ref}} \cdot \Delta\Phi / \Delta\Phi_{\text{ref}}$$

Oder aber man tauscht die Referenzstrecke gegen ein Regelinterferometer, das die Änderung einer wohlbestimmten Wellenlänge λ_1 um ein ganz bestimmtes $\Delta\lambda$ kontrolliert.

Mit einem zweiten Halbleiterlaser, der bei λ_3 emittiert, läßt sich die Auflösung

erhöhen. Ein Vergleich der Phasen ϕ_1 und ϕ_3 sowie ϕ_2 und ϕ_3 liefert die entsprechende Genauigkeit.

Die Meßgenauigkeit der absoluten Interferometrie wird umso besser, je größer der modensprungfreie Durchstimmbereich ist und je besser die Phasenauflösung gelingt. Außerdem sollte die Meßdauer möglichst kurz sein, damit Brechungsindexänderungen oder Variationen der Meßspiegelposition durch Schwingungen während des Durchstimmens das Meßergebnis nicht zu sehr beeinträchtigen.

Die kurze Kohärenzlänge konventioneller Halbleiterlaser schränkt deren Nutzen für diese Methode auf Meßbereiche bis zu etwa einem Meter ein. Ein externer Gitterresonator erlaubt wegen seiner viel größeren Resonatorabmessungen Kohärenzlängen von

mehr als 100 m. Damit lassen sich Entfernungen bis über 40 m mit einer Genauigkeit von 10^{-6} bestimmen. Man muß dafür allerdings das nötige Kleingeld für die teuren External Cavity Laser auf den Tisch blättern.

Literatur:

1.) F.P. Volpe: *Erzeugung von optischen Pikosekundenimpulsen hoher Leistung mit Halbleiterlasern zur Nahbereichs-Entfernungsmessung mit Submillimetermeßgenauigkeit* (Fortschrittberichte VDI, **Reihe 9: Elektronik**, **Nr. 202**, VDI-Verlag)

2.) T. Pfeifer, J. Thiel: *Untersuchung eines absolutmessenden Interferometers mit Halbleiterlaser* (Weiterführende Ansätze in der Interferometrie, VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1995)