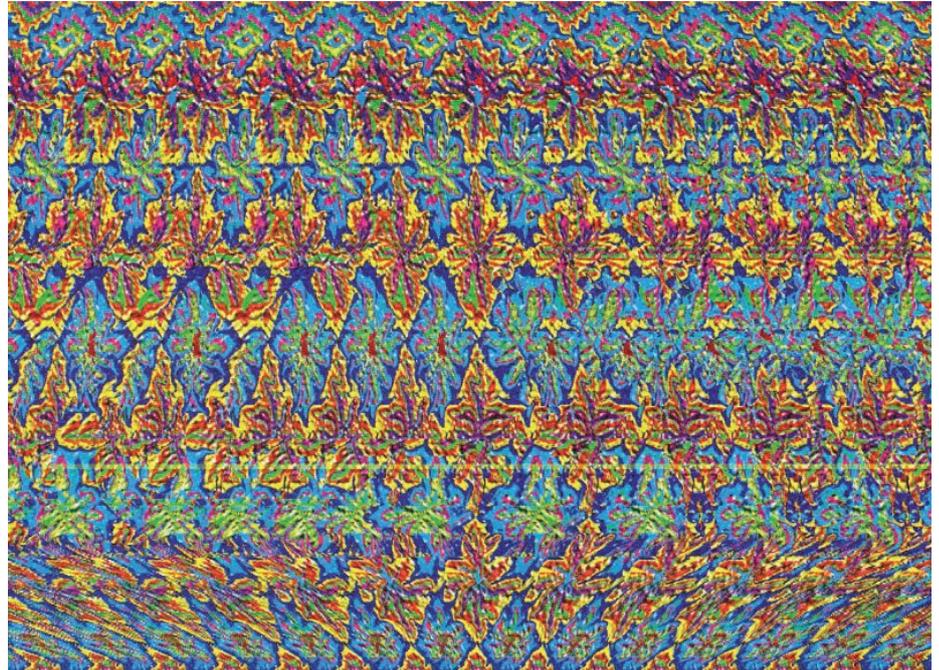


Das magische Auge

Grundlagen der Bildverarbeitung: Das PMD-Prinzip

Insbesondere in der Robotik und bei der Bildverarbeitung im Außenraum gibt es einen wachsenden Bedarf an Bildverarbeitungssystemen, die auch die Tiefeninformation für eine Szene liefern können. Mittlerweile sind von mehreren Herstellern sog. PMD-Kameras verfügbar, die einen wesentlichen Teil der Signalverarbeitung unmittelbar auf dem speziellen Detektorchip durchführen und ein orts aufgelöstes Abstandsbild erzeugen. Dazu muss die Helligkeit der Beleuchtung getaktet bzw. moduliert werden. Für viele Anwendungen sind diese Systeme bereits jetzt technisch geeignet und hinreichend kostengünstig, und eine weitergehende Optimierung ist in den nächsten Jahren zu erwarten. In diesem Artikel wird das Funktionsprinzip der PMD-Kameras erläutert.

Bei einer konventionellen Kamera wird eine Szene durch das Objektiv in Zentralprojektion auf einen ebenen Detektorchip abgebildet. Dabei geht die Tiefeninformation verloren. In der industriellen Anwendung der Bildverarbeitung dominieren daher Applikationen, bei denen Vorkennntnis über die Tiefe der Szene genutzt werden kann, z. B. weil alle Objekte auf einem Förderband liegen, dessen Abstand von der Kamera sich nicht wesentlich ändert. Klassische Stereo-Systeme nehmen mindestens zwei Bilder derselben Szene aus verschiedenen Positionen auf und suchen diejenigen Bildpunkte, die zum selben Punkt im realen Raum gehören. Nach einer geometrischen Kalibrierung kann man dann die 3D-Koordinaten dieses Punktes bestimmen. Damit das Verfahren überhaupt funktioniert, muss die Szene genügend Struktur aufweisen. Für eine weiße Wand wird es kaum gelingen, korrespondierende Bildpunkte zu berechnen – es sei denn, es wird eine Markierung aufgebracht. Eine elegante Lösung ist ein Laserstrahl, der einen hellen Lichtpunkt erzeugt. Mit einem Scanner kann der Strahl durch die gesamte Szene geführt werden, so dass grundsätzlich für jeden Bildpunkt aus dem gemeinsamen Sichtbereich der beiden Kameras eine Entfernung berechnet werden kann. Das Verfahren ist jedoch langsam und rechenaufwendig und daher für viele industrielle Anwendungen ungeeignet. Das Korrespondenzproblem kann man auch durch Projektion



Quelle: <http://www.schneider-andre.net/das-magische-auge-01.php>

von definierten Mustern, z. B. Liniengittern, aus definierten Richtungen umgehen. Diese Methode wird als Lichtschnittverfahren bezeichnet, kommt mit einer Kamera aus und wird eingesetzt, wenn die Tiefeninformation auf wenigen Linien der Szene bereits ausreicht.

Laufzeitmessung von Lichtimpulsen

Die Alternative sind aktive optische Sensoren auf der Basis der Messung der Laufzeit eines Lichtimpulses (LIDAR). Die Idee ist sehr einfach: Eine Lichtquelle sendet einen Lichtstrahl kurzer Dauer in Richtung eines Objektes, dessen Abstand bestimmt werden soll, und ein Photodetektor registriert das „Echo“, also einen Teil der vom Objekt rückgestreuten Strahlung. Die Zeitspanne Δt zwischen dem Absetzen des Impulses und dem Eintreffen der remittierten Strahlung ergibt die Laufstrecke $s = c\Delta t$, folglich mit $d = s/2$ den gesuchten Abstand zum Objekt. Bei industriellen Anwendungen sind Entfernungen im Bereich von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern typisch, die meist mit Genauigkeiten von einigen Prozent gemessen werden sollen. Da das Licht in einer Nanosekunde eine Strecke von 30 cm zurücklegt, hat man es bei diesem Konzept zwangsläufig mit Pikosekunden-Elektronik zu tun. Das ist auch in unseren modernen Zeiten keine Kleinigkeit. Die elektronischen Anforderungen werden jedoch deutlich angenehmer, wenn

das Sendersignal moduliert wird. Die Laufzeit wird dann nicht direkt bestimmt, sondern auf die Messung einer Phasenverschiebung zwischen der Modulation der Beleuchtung und der Modulation des Empfängersignals zurückgeführt. Das entsprechende elektrotechnische Konzept ist seit langem bekannt. Es wird in der Nachrichtentechnik als „Demodulation“ oder „Mischung“ bezeichnet und auch beim „lock-in“-Verstärker eingesetzt, der in der optischen Messtechnik beim Nachweis stark verrauschter Signale verwendet werden kann. Kern dieser Verfahren ist ein phasenempfindlicher Detektor (auch „Demodulator“, „Mischer“, „Mixer“ oder „Korrelator“). Seit etwa zehn Jahren wird daran gearbeitet, einen solchen Mischer in jedem einzelnen Pixel eines Flächendetektors für optische Strahlung unterzubringen [1–3]. Das Resultat, das nun allmählich in anwendungsreifen Produkten verfügbar wird, sind die sog. Photo-Misch-Detektor-Kameras (PMD), zur Zeit mit Auflösungen von etwa 160×120 Pixeln [4,5].

Modulierte Beleuchtung

Anstelle eines Lichtpulses wird bei den PMD-Kameras eine kontinuierliche, aber mit fester Frequenz modulierte Beleuchtung eingesetzt. Wenn das Licht die Entfernung d zum Sender und zurück durchlaufen hat, hat die Modulation des Senders in der Regel einen anderen

Schwingungszustand erreicht, und die Modulation des zu diesem Zeitpunkt ausgesandten Lichts ist gegenüber der Modulation des zum selben Zeitpunkt empfangenen, rückgestreuten Lichts verschoben. Abb. 1 zeigt schematisch den zeitlichen Verlauf des Sendesignals (oben) und des gleichzeitig aufgezeichneten Empfängersignals (unten). Die zeitliche Verschiebung Δt zwischen den beiden Modulationskurven ist die Laufzeit, $\Delta t = 2d/c$, entsprechend einer Phasenverschiebung $\Delta\phi = 2\pi f\Delta t = 2\pi f \cdot 2d/c = (4\pi f/c)d$. Die Entfernung d kann auf diese Weise nur für ein bestimmtes Intervall eindeutig aus der Phasenverschiebung ermittelt werden, nämlich für einen Abstandsbereich entsprechend der halben Wellenlänge der Modulation. Innerhalb dieses Bereichs ändert sich die Laufzeit vom Sender zur reflektierenden Fläche und zurück um weniger als eine Schwingungsdauer T der Modulation. Sobald die Laufzeitänderung gleich oder größer als T wird, kann ein Zustand mit Laufzeitänderung $T+\Delta t$ nicht mehr vom Zustand mit Laufzeitänderung Δt unterschieden werden, denn die beiden zugehörigen Empfängerschwingungen sind dann in der Phase um 2π gegeneinander verschoben und haben damit identische Zeitverläufe. Aktuell erhältliche PMD-Kameras arbeiten oft mit Modulationsfrequenzen von ca. 20 MHz. Ein kompletter Modulationszug hat dann eine Schwingungsdauer von $T = 1/f = 50$ Nanosekunden, also eine Wellenlänge von $\lambda = c/f = 15$ m. Der Bereich, innerhalb dessen eindeutige Abstandsmessungen möglich sind, ist unter diesen Bedingungen 7,5 m lang.

Cleverer Detektorchip

„Mischen“ bedeutet im Jargon der Elektrotechnik die Multiplikation zweier Signale. Wenn zwei harmonische Signale derselben Frequenz miteinander multipliziert werden, entsteht ein Signal mit der doppelten Frequenz und einem zusätzlichen DC-Anteil proportional zur Pha-

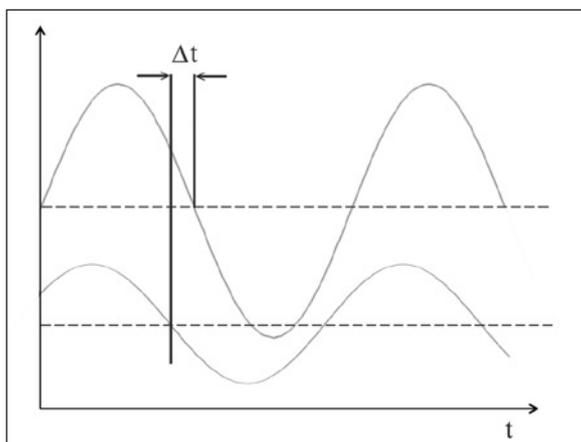


Abb. 1: Verlauf der modulierten Intensität der Beleuchtung (Sendesignal) und der gleichzeitig einlaufenden remittierten Strahlung (Empfängersignal) als Funktion der Zeit

$$\text{Sender: } \Phi(t) = \Phi_0(1 + \cos \omega t)$$

$$\text{Empfänger: } I(t) = I_0(1 + \cos(\omega t - \Delta\phi))$$

$$\text{Mischung: } \Phi(t)I(t)$$

$$\Phi(t)I(t) = \Phi_0 I_0 + \Phi_0 I_0 \cos \omega t + \Phi_0 I_0 \cos(\omega t - \Delta\phi) + \Phi_0 I_0 \cos \omega t \cos(\omega t - \Delta\phi)$$

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta))$$

\Rightarrow

$$\begin{aligned} \Phi_0 I_0 \cos \omega t \cos(\omega t - \Delta\phi) &= \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 (\cos(\omega t - (\omega t - \Delta\phi)) + \cos(\omega t + \omega t - \Delta\phi)) = \\ &= \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 (\cos \Delta\phi + \cos(2\omega t - \Delta\phi)) \end{aligned}$$

\Rightarrow

$$\Phi(t)I(t) = \Phi_0 I_0 + \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 \cos \Delta\phi + \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 \cos(2\omega t - \Delta\phi) + \Phi_0 I_0 \cos \omega t + \Phi_0 I_0 \cos(\omega t - \Delta\phi)$$

AC - Anteile mit $2\omega t$ und ωt

$$\text{DC - Anteil: } \Phi_0 I_0 + \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 \cos \Delta\phi = \Phi_0 I_0 \left(1 + \frac{1}{2} \cos \Delta\phi\right)$$

Abb. 2: Mischung des Sender- und Empfängersignals ergibt ein Signal mit einem DC-Anteil, der die Phasenverschiebung enthält

sendifferenz. Bei einer PMD-Kamera sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Da es keine negative Lichtintensität gibt, ist der Sender nicht um die Nulllinie herum moduliert, sondern enthält einen Offset, der sich auch im Empfängersignal wieder findet. Die Umformungen in Abb. 2 zeigen, dass in diesem Fall im DC-Anteil des Mischsignals neben dem Summanden, der proportional zur Phasendifferenz ist, auch das Produkt der Offsets der beiden Eingangssignale auftritt. Durch Integration bzw. Tiefpassfilterung wird der AC-Anteil eliminiert, und die gesuchte Phasenverschiebung $\Delta\phi$ wird über den Gleichspannungsanteil des Signals messtechnisch zugänglich. Dabei kann man im Prinzip beliebig lange integrieren und damit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern. Voraussetzung ist jedoch eine stabile Modulationsfrequenz. Es bleiben zwei Fragen: Wie kann man einen Multiplizierer in möglichst einfacher Form realisieren, und wie kann man den störenden

Offset im DC-Anteil eliminieren? Die Lösung beider Probleme liegt in einer sehr cleveren Architektur eines Detektorchips, der in jedem einzelnen Pixel mit Hilfe des Prinzips der Ladungskopplung und der Ladungsverschiebung ein Mischsignal erzeugt und dieses zeitlich integriert [4]. Ein Detektorpixel besteht dabei aus zwei lichtempfindlichen Bereichen, die mit je einer lichtdurchlässigen Steuerelektrode versehen sind. Unterhalb dieser Elektrode entsteht wie bei einem CCD-Sensor eine Potentialmulde, in der die einfallenden Photonen in Elektronen umgesetzt werden. Die beiden lichtempfindlichen Bereiche liegen so nah zusammen, dass die beiden Potentialmulden bei entsprechender Steuerspannung miteinander verschmelzen und die entstehenden Elektronen darin frei verschoben werden können (Ladungskopplung). Die Steuerspannungen der beiden Elektroden werden nun im Gegentakt moduliert, so dass die entstehenden Ladungen „nach links“ oder „nach rechts“ verschoben werden, je nachdem, welche Steuerspannung „gewinnt“. „Links“ und „rechts“ werden die Ladungen jeweils in eine Speichertasche transferiert und dort während der Integrationszeit akkumuliert. Vereinfacht kann man sich eine rechteckförmige Modulation der Steuerelektroden vorstellen, entsprechend einem simplen Schaltimpuls. Wenn die Steuerspannung auf „high“ geschaltet ist, werden die entstehenden Ladungsträger nach links verschoben, beim Schaltzustand „low“ nach rechts. Ist die Intensität des einfallenden Lichts konstant, kommen auf diese Weise nach einem kompletten Schaltzyklus in der lin-

ken und in der rechten Speichertasche gleich viele Ladungsträger an. Wenn die Lichtintensität jedoch mit derselben Frequenz moduliert ist, mit der auch die Steuerelektroden getaktet werden, hängt die Zahl der links und rechts gesammelten Ladungsträger von der Phasenlage zwischen dem Lichtsignal und dem Steuersignal ab. Das Ergebnis ist das gewünschte Mischsignal, und die zeitliche Integration in den Speicherbereichen erledigt gleich auch noch die Unterdrückung der AC-Anteile. Die Ladungstrennung durch die Modulation der Steuerspannung sorgt außerdem dafür, dass gleich zwei unabhängige Signale entstehen, die etwas mit der Phasendifferenz zu tun haben. Die wesentlichen Teile der Signalverarbeitung sind bei diesem Konzept also bereits auf Chip-Ebene im Prozess der Ladungstrennung, Ladungsverschiebung und Ladungsspeicherung implementiert, daher die Bezeichnung als photonischer Misch-Detektor (PMD). Diese Architektur ermöglicht nun problemlos die zeitliche Integration des Signals über mehrere Modulationszyklen. Bei dem oben genannten Beispiel mit einer Modulationsfrequenz von 20 MHz und einer Periodendauer von 50 Nanosekunden liefert eine Integrationszeit von einer Mikrosekunde bereits die Integration über 20 Schwingungsdauern. In vielen industriellen Anwendungen sind 10 oder 100 Mikrosekunden und länger als Belichtungszeit akzeptabel, so dass über viele Hundert Einzelmessungen gemittelt werden kann. Die Anforderungen an die elektronische Steuerung eines PMD-Detektors entsprechen demnach dem Stand, der aktuell bereits in der konventionellen Kamertechnik verwendet wird.

Beeindruckender Stand der Technik

Eine cosinusförmige Modulation um einen Mittelwert herum kann in erster Näherung auch durch eine Recht-

eckfunktion derselben Frequenz dargestellt werden (weil es sich dabei um die erste Komponente der Fourier-Zerlegung handelt). Die rechteckförmige Taktung der Spannung an der Steuerelektrode eines PMD-Detektors ergibt daher ein Mischsignal analog zu den Umformungen in Abb. 2. Die Gegentaktmodulation führt dazu, dass im linken Kanal ein DC-Anteil proportional zu $1+\Delta\phi/2$ entsteht, im rechten Kanal ein DC-Anteil proportional zu $1-\Delta\phi/2$. Die Differenz der beiden Signale liefert folglich ein Signal proportional zu $\Delta\phi$. Auch ohne Rückgriff auf diese Umformungen kann man sich das Resultat veranschaulichen, indem man direkt für Rechteckimpulse den zeitlichen Überlapp zwischen dem Zeitverlauf im ausgesandten Lichtimpuls und im remittierten Lichtimpuls betrachtet. Die Ladungstrennung im Detektorpixel sorgt dafür, dass während des Überlapps die entstehenden Ladungen nach links, in der verbleibenden Zeit nach rechts verschoben werden. Durch die Differenzbildung wird der Offset der Modulation eliminiert. Leider genügt zur Bestimmung der Phase der Differenzwert allein jedoch nicht, denn auch der Faktor ΦI_0 geht in den Differenzwert ein. Die Amplitude I_0 des Detektorstroms hängt z. B. vom Remissionsvermögen des Objekts ab, so dass auch bei gleicher Entfernung allein das Differenzsignal der beiden Kanäle eines Empfängerpixels noch nicht zur Bestimmung von $\Delta\phi$ ausreicht. Nominell ergibt zwar die Summe der beiden Kanäle den gesuchten Proportionalitätsfaktor, und aus dem Quotienten würde der Faktor ΦI_0 sogar ganz herausfallen. Das gilt aber nur, solange keine weiteren additiven Signalanteile vorkommen, die z. B. durch Umgebungslicht oder Dunkelstrom hervorgerufen werden können und kaum vermeidbar sind. Es müssen also weitere unabhängige Messgrößen aus dem Signal gewonnen werden. Eine Möglichkeit ist eine zweite,

identische Detektorzelle in jedem Pixel, die wiederum aus zwei ladungsgekoppelten lichtempfindlichen Bereichen besteht, aber mit einem Modulationssignal angesteuert wird, das gegenüber der Modulation der Lichtquelle um 90° , also um $\pi/2$ in der Phase verschoben ist. Dadurch entstehen zwei weitere, unabhängige DC-Anteile, die jeweils Information über die Phasendifferenz, die Modulationsamplitude und die Offsets enthalten. Aus den so gemessenen, insgesamt vier DC-Signalen des Mischsignals kann nun die Phasendifferenz $\Delta\phi$ und damit der gesuchte Abstand d berechnet werden [1]. Ein beeindruckendes Beispiel für den mittlerweile erreichten Stand der Technik zeigt Abb. 3 [6]. Im rechten Teil ist die Tiefeninformation aus einer PMD-Kamera dargestellt. Unterschiedliche Farben entsprechen unterschiedlichen Abständen.

Auch bei den PMD-Kameras spielen, wie bei anderen 3D-Messverfahren, im Detail eine Reihe von weiteren Effekten eine Rolle, z. B. die optische Verzeichnung, die Modulationsgüte bei der Beleuchtung oder unterschiedliche Dunkelströme von Pixel zu Pixel. Eine Kalibrierung des Detektorarrays für den genauen Zusammenhang zwischen gemessener Phasendifferenz und Entfernung kann daher notwendig und sinnvoll sein. Außer einer Tiefenkarte kann eine PMD-Kamera auch das Intensitätssignal einer klassischen Flächenkamera liefern, im Wesentlichen über die Summe der Signalkanäle eines Pixels (s. mittleres Teilbild in Abb. 3). Damit ist grundsätzlich die gesamte 3D-Information der Szene gleichzeitig aus einer Signalquelle zugänglich. Der wesentliche Rechenaufwand wird bereits auf Chipebene durch den photonischen Mischer hochgradig parallel erledigt, so dass die 3D-Daten mit sehr geringem zeitlichen Verzug nach der Bildaufnahme zur Verfügung stehen. Dadurch werden Applikationen möglich, die bisher wegen der langen Ausführungszeiten, der mechanischen Komplexität oder des apparativen Aufwands mit klassischen 3D-Systemen nicht durchführbar oder nicht wirtschaftlich waren. Wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung der industriellen Bildverarbeitung sind in der Vergangenheit häufig durch Hardware-Innovationen ausgelöst worden. Auch die PMD-Technologie wird vermutlich in den nächsten Jahren in einigen Teilgebieten der Bildverarbeitung für Aufregung sorgen.

Literatur

- [1] T. Spirig, P. Seitz, O. Vietze, F. Heitger, IEEE Journal of Quantum Electronics 31, 1705 (1995)

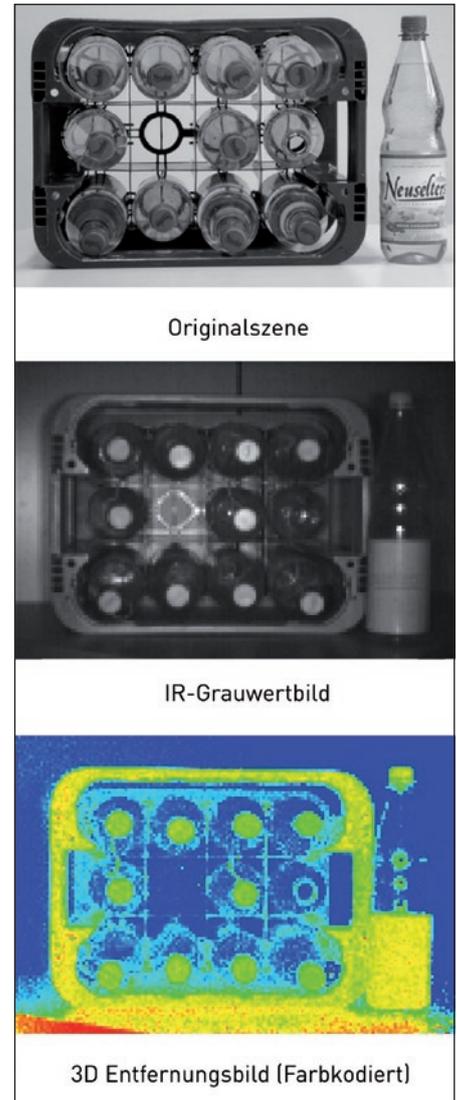


Abb. 3: Tiefenkarte (unten) und Intensitätsbild (Mitte) einer Szene, aufgenommen mit einer PMD-Kamera (mit freundlicher Genehmigung der PMDTechnologies GmbH, Siegen)

- [2] R. Schwarte, Deutsche Patentanmeldung DE 197 04 496
- [3] R. Miyagawa, T. Kanade, IEEE Transactions on Electron Devices 44, 1648 (1997)
- [4] R. Schwarte, „PMD-Sensorik für Automotive – Möglichkeiten und Grenzen“, Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Leonberg, 17./18.05.2006
- [5] siehe z. B. www.PMDTec.com; www.mesa-imaging.ch; www.canesta.com
- [6] freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Firma PMDTechnologies GmbH, Siegen

► Autor
Prof. Dr. Christoph Heckenkamp



Hochschule Darmstadt – University of Applied Sciences
Studiengang Optotechnik und Bildverarbeitung
heckenkamp@h-da.de
www.fbm.h-da.de