

Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen

Prof. Dr. Rudolf Schwarte, Dr. Zhigang Zhang, Universität Siegen, D 57068 Siegen, Dr. Bernd Buxbaum.
PMDTechnologies GmbH, Am Eichenhang 50

Eingeladener Vortrag auf dem VDE Kongress „Ambient Intelligence“, 18 – 20. 10. 2004, Berlin

Kurzfassung

Ambient Intelligence bezeichnet eine hilfreiche, sich den Bedürfnissen der Menschen anpassende Lebens- und Arbeitswelt, in der technische Systeme schützende und helfende Funktionen übernehmen. Solch eine fruchtbare Partnerschaft mit den Menschen stellt ein erstrebenswertes aber höchst anspruchsvolles Entwicklungsziel dar und erfordert technische Systeme **hoher Sensor-, Aktor- und Computer-Intelligenz**.

So wie das 3D-Sehen in seiner ganzen Komplexität der schnellen Modellierung und Kognition der Umgebung die wichtigste Sensorik des Menschen darstellt, ist unschwer die wohl wichtigste Sensorik seines technischen Gegenübers auszumachen: **Technisches 3D-Sehen in Echtzeit** – wie der Mensch es für seine Bewegung und Handhabung in natürlichen Umgebungen gewohnt ist. Dieses Ziel wird weltweit intensiv bearbeitet, insbesondere in Hinblick auf die Sicherheitstechnik, autonome Robotik und Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Ohne die schnelle Erfassung, Digitalisierung und Modellierung der dynamischen 3D-Umwelt fehlt unseren technischen Systemen die notwendige Autonomie. Sie sind praktisch „blind“. Alle Versuche, vor allem auf Basis von **Stereovision** oder **Laserscannern** z. B. zum autonomen Fahren von Robotern in natürlichen Umgebungen, konnten diese Aufgabe nicht zufrieden stellend lösen.

Im Folgenden wird ein experimentell verifizierter Lösungsweg für diese Problematik vorgestellt. **Tausende paralleler Laserradars in PMD (Photonic Mixer Device)-Technologie** erfassen gleichzeitig Tausende von Raumpunkten über Echolaufzeiten als 3D-Snapshot. Als **3D-Videokamera** vermessen sie eine dynamische 3D-Szene fortlaufend mit Videobildrate vom Nahbereich bis in den 10m-Bereich bei einer Auflösung im mm-Bereich - je nach der Empfangsoptik und Sendeleistung der modulierten Laser- oder LED-Beleuchtung.

Funktionsweise und Anwendungen der **PMD-Schlüsseltechnologien**, die diesen Fortschritt ermöglichen, werden erläutert – auch unter Betrachtung der erwarteten technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Vorteile, die diese Innovation in nahezu allen Lebensbereichen bietet.

1. Motivation zum Dynamischen Technischen 3D-Sehen

Wir wünschen, dass unsere technischen Systeme, z. B. Serviceroboter, autonom navigieren und handhaben können, so wie wir es von uns gewohnt sind. Dies würde eine kaum vorstellbare Erweiterung der Sicherheit und Automation eröffnen. Als wichtigste Bedingung müssen diese Systeme technisch dreidimensional in Echtzeit sehen können, ähnlich einem Menschen. Ohne Kenntnis der realen Raum-Zeit-Zustände der Umgebung können keine sicheren Aktionen durchgeführt werden. Das Projektionsbild einer 2D-Kamera hat die Tiefeninformation verloren und hilft dem Roboter bei der Raummodellierung praktisch kaum weiter.

So liegen Wunsch und Wirklichkeit der Autonomie mobiler Roboter noch weit auseinander. Hauptursache und schwächstes Glied der Kette ist eine geeignete Lösung für die fortlaufende schnelle und genaue Erfassung des räumlichen Umfelds als Datenbasis der dynamischen Raummodellierung, Lokalisation und Bewegungsplanung. Daher sind die Arbeitsmöglichkeiten der „3D-blinden“ Roboter bisher erheblich eingeschränkt. Hier nimmt das **Dynamische Technische 3D-Sehen** in vielfacher Weise eine Schlüsselfunktion ein.

Diese Fähigkeit technischer Systeme einer zukünftig hilfreichen **Ambient Intelligence** kann nur im Gesamtaspekt intelligenter **Sensor / Aktor / Computer-Intelligenz-Systeme (SACI-Systeme)** optimiert werden, die sich variablen Umweltzuständen zielorientiert – im Dienste des Menschen – anpassen sollen. Sie bestehen somit aus

1. der Sensorik bzw. Multisensorik **S** oder **SI** mit eigener Sensor-Intelligenz,
2. der Aktorik bzw. Multiaktorik **A** oder **AI** mit eigener Aktor-Intelligenz und
3. der Computer-Intelligenz **CI**, die die Sensor / Aktor-Systemzustände interpretiert, verknüpft und zielorientierte Aktionen simuliert und ausführt.

3D-sehende SACI-Systeme werden uns in die Lage versetzen, viele Ambient Intelligence Wünsche zu erfüllen. Fürsorgefunktionen in „Tierfamilien“ bieten beeindruckende Beispiele. Die erforderliche Orientierung und Navigation sind z. B. bei Delphinen besonders hoch entwickelt, hier vor allem das Ultraschall-Echoverfahren (Sonar), das ihnen auch im dunklen Wasser die Autonomie völliger Bewegungsfreiheit verschafft.

Unsere technischen Systeme, z. B. **Autonome Mobile Roboter**, haben diese Autonomie, in natürlichen Umgebungen autonom fahren und handhaben zu können, trotz langjähriger Anstrengungen bisher nicht

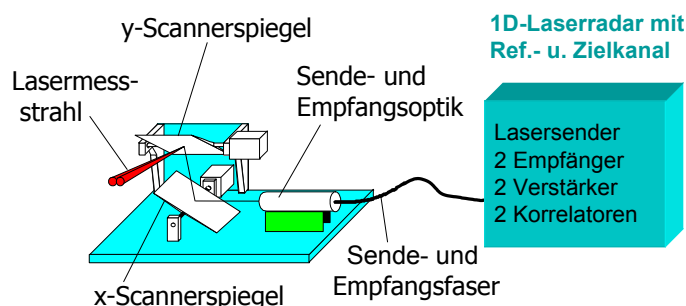
annähernd erlangt. Als Voraussetzung dieser Autonomie muss zunächst der erste Schritt, die schnelle fortlaufende Erfassung und Modellierung der unmittelbaren Umgebung, also das **Technischen 3D-Sehen**, beherrscht werden.

2. Möglichkeiten und Grenzen der heutigen 3D-Sensorik

Für das **Technische 3D-Sehen** stellt das o. g. Ultraschall-Echoverfahren, vom Wasser auf die Luft übertragen, ebenso wie das heutige Mikrowellen-Radar vor allem aufgrund der beugungsbegrenzten Lateralaufklärung keine brauchbare Lösung dar. Es gibt eine Vielzahl von optischen 3D-Sensoren, z. B. Photogrammetrie, Streifenprojektion usw. [1], die für spezielle Anwendungen entwickelt wurden, aber für die hier zu lösende Aufgaben nicht geeignet sind.

Technisches Stereosehen wurde immer wieder für das **dynamische Technische 3D-Sehen** als eine mögliche Lösung untersucht, bisher ohne den gewünschten Erfolg. Im Vergleich zum **menschlichen Stereosehen** weist es durch völlig verschiedene Lösungswege des Korrespondenzproblems identischer Pixelgruppen größeren Verarbeitungsaufwand und geringere Zuverlässigkeit auf. Wahrscheinlich wird auf absehbare Zeit das technische Stereosehen ohne Objekt gesteuerte Stereofokussierung der Linsen und ohne 3D-Bildadaption über ein Inertialsystem ähnliche Leistungen nicht erzielen können. Beim menschlichen Sehen zielen die Augäpfel u. a. durch synchrone mechanische Fixierung und Fokussierung (Akkommodation) auf die jeweils fixierte Bildelementgruppe und generieren aus Augenabstand und -winkeln fortlaufend Triangulationsdreiecke (vereinfacht dargestellt!), die automatisch ausgewertet und durch Adaption an das Vestibular-Koordinatensystem zum Gesamtraumbild fusioniert werden.

Somit verbleibt kaum eine Alternative zum **optischen Echolaufzeitverfahren**. Dieses wurde in der Evolution nicht realisiert und bereitet uns große technische Probleme aufgrund der extrem hohen Lichtgeschwindigkeit $c = 0,3\text{mm} / \text{Pikosekunde} (10^{-12}\text{s})$. Dennoch sind heute hoch entwickelte Laserradars als 1D-Abstandmesssysteme käuflich und können über Einfachscanner Ebenen und über **Zweifachscanner** Räume vermessen. Der **3D-**



Laserscanner in **Bild 1** zeigt rechts ein faustgroßes 1D-Laserradar, dessen Strahl über zwei bewegliche Spiegel beliebige Raumpunkte ansteuern und deren Abstände über Echolaufzeiten erfassen kann. Er hat sich für statische Aufgaben bewährt, jedoch nicht für eine fortlaufende Erfassung und Modellierung der Umwelt zur Navigation von Fahrzeugen in natürlichen Umgebungen.

Weder mit Technischer Stereovision noch mit 3D-Laserscannern konnten z. B. mobile Roboter bisher solche autonomen kontinuierlichen Fahrten und Hand-

Bild 1 3D-Laserscanner mit 1D-Laserradar und x/y-Scanner

habungen im SLAM-Betrieb (Simultaneous Location and Mapping) durchführen. Die während der Bewegung gewonnenen Raumdaten eignen sich online nicht zur 3D-Modellierung. Notwendig wären überlappende 3D-Snapshots.

3. Verifizierte Problemlösung: Technisches 3D-Sehen durch ein Multikanal-Lichtradar (Multichannel-Lidar) nach dem PMD-Prinzip

Eine Vielkanal-Echolaufzeitmessung nach dem Radarprinzip auf Mikrowellenbasis (Radio Detecting and Ranging) oder auf Licht-(Laser bzw. LED) Basis als sog. Lidar (Light Detecting and Ranging) war lange Zeit nicht vorstellbar, insbesondere auf Grund des Volumens, der Einzelzeitdriften und der immensen Kosten z. B. Tausender paralleler Systeme.

Für beide Verfahren bestehen jetzt Lösungsmöglichkeiten, eine konzipierte für das erstere und eine hier detailliert erläuterte für das letztere Problem [2, 3].

Mit dem PMD-Prinzip wurde eine experimentell verifizierte Lösung des Problems „Technisches 3D-Sehen“ durch die Parallelschaltung Tausender winziger 1D-Laserradars bzw. Lidars gefunden. Gleichzeitig wurden die

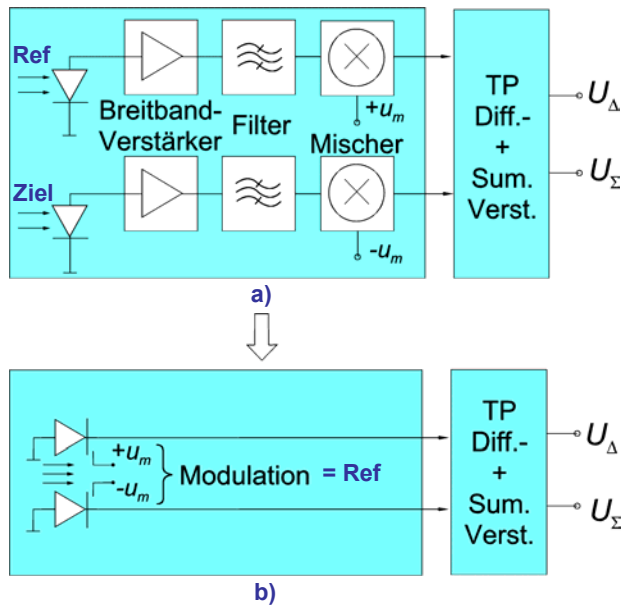


Bild 2 Vergleich der Empfänger des konventionellen (a) und neuen PMD-Abstandsradars (b)

Empfängerstruktur nach dem PMD-Prinzip, hier mit einem **Photogate-PMD (Photonic Mixer Device bzw. PhotoMischDetektor)**. Der kritische Empfängerteil besteht lediglich aus einer besonderen Photodiode, hier mit gemeinsamer Anode und zwei Kathoden, zwischen denen zwei Photogates die Photoladungen mit der Gegentakt-Modulationsspannung $+u_m$ und $-u_m$ – zugleich als Referenzsignal – zur einen oder anderen Kathode steuern können. Hierdurch geschieht die eigentliche Aufgabe der Echolaufzeitmessung, d. h. der Mischung des Ziellichtes mit der Sendemodulation bereits im inhärent mischenden Photodetektor PMD. Der Tiefpass-Differenzverstärker liefert unmittelbar mit der Autokorrelationsfunktion $AKF \wedge U_\Delta$ die Echophasenlaufzeit bzw. die Abstandsinformation. Auf diese Weise kann das Volumen der PMD-Empfängerschaltung gegenüber dem konventionellen 1D-Laserradar nahezu 100.000fach etwa auf die Größe der Photodiode verkleinert, ihre riesige Dynamik genutzt und die Überkopplung zu Nachbar-PMDs vermieden werden. Das ist zugleich der Schlüssel, Tausende von Lidar-Empfängern parallel in einer PMD-Matrix zur Erfassung eines 3D-Bildes zu betreiben und 3D-Snapshots der Umgebung als unentbehrliche Basis der Orientierung, Interpretation sowie Aktions- und Bewegungsplanung intelligenter Sensor / Aktor / Computer-Intelligenz-Systeme zu liefern.

4. Funktionsweise, Eigenschaften und Modellierung des Photogate-PMD

Das PG-PMD-Symbol aus **Bild 2b** wird in **Bild 3c** als Halbleiterstruktur veranschaulicht. Dargestellt ist der Photomischdetektor mit der Anode auf Masse und zwei in Sperrrichtung vorgespannten Auslesekathoden K_a und K_b . Zwischen diesen befindet sich der photoempfindliche Raum, der durch zwei lichtdurchlässige Photogates

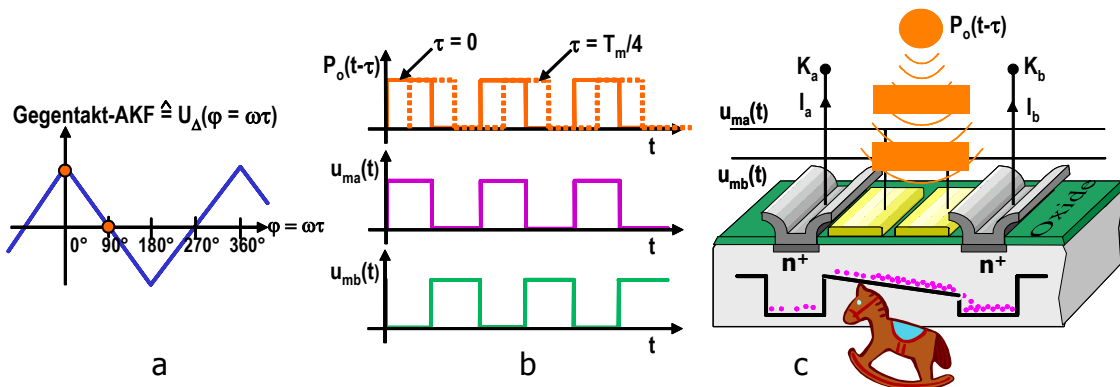


Bild 3 Vom Photodetektor zum Photomischdetektor PMD (c). Lichtsignal und Modulationssignal (b) ergeben die Gegentakt-Autokorrelationsfunktion AKF (a)

Messeigenschaften entscheidend verbessert, insbesondere bezüglich Zeitdrift, Jitter, Messdynamik und Rauschen.

Bild 2a zeigt vereinfacht die Empfängerstruktur eines konventionellen 1D-Laserradars. Messungen bis in den mm-Bereich erfordern Zeitaufösungen im 10 Pikosekundenbereich. Das ist angesichts einer Echodynamik von bis zu 1:100.000, einer hohen Zeitdrift und Nichtlinearität der Komponenten nur mit hohem Verstärker- und Entkopplungsaufwand und durch einen zum Zielkanal parallelen gleichartigen Referenzkanal (Ref) bekannter Länge möglich. Ziel- und Referenzphotodioden arbeiten hier als optisch-elektrische Signalwandler. Nach mehreren Verstärkerstufen erfolgt die EE (elektrisch-elektrische)-Mischung bzw. mit dem Tiefpass-Differenzverstärker die Korrelation von Empfangs- und Sendesignal. Der kalibrierte Echoweg $2R = (T_{Ziel} - T_{Ref}) \cdot c$ wird aus der Differenzlaufzeit ermittelt.

Bild 2b zeigt die entsprechende

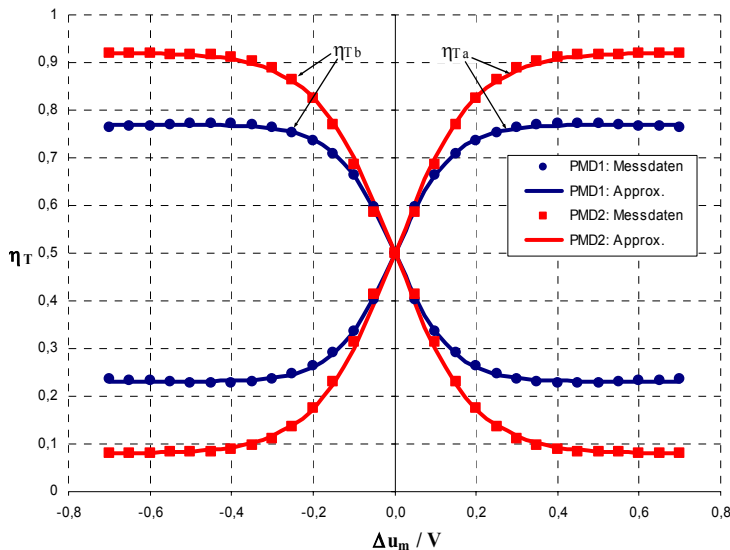


Bild 4 Gemessene und simulierte Modulationskennlinien [4]

Das Korrelationsergebnis wird wesentlich durch die Empfindlichkeit der Richtungssteuerung des Photostroms bestimmt und durch die Gegentakt-Modulationskennlinien des PMD beschrieben. **Bild 4** zeigt hierzu je zwei Paare von simulierten und gemessenen Kennlinien: ein älteres Paar PMD1 mit geringer Modulationsempfindlichkeit der Photostromverteilung in Prozent über der Gegentaktmodulationsspannung $\Delta u_m = u_{am} - u_{bm}$ und ein neueres Paar PMD2, das bei ± 400 mV bereits eine Stromverteilung von 90% zu 10% erreicht. Ohne Modulation verteilen sich die Photoströme I_a und I_b symmetrisch zu je 50% auf beide Ausgänge.

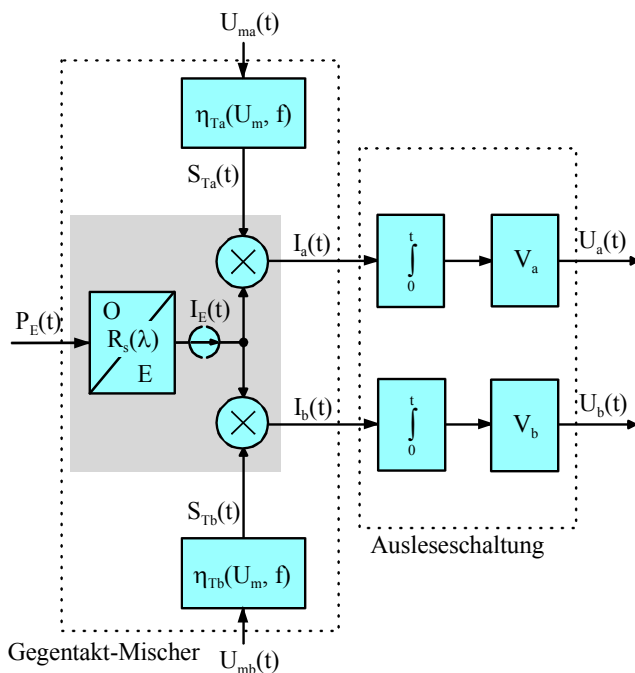


Bild 5 Funktionsmodell des Photogate-PMD

$0^\circ / 90^\circ$ - bzw. IQ-Demodulation vorgestellt. Bereits vor sechs Jahren wurde bei uns diese Version mit – aus den Modulationskennlinien in **Bild 4** verständlichem – negativem Ergebnis untersucht. Der Photomischdetektor gewichtet die Cos- und Sin-Modulation nicht getrennt, sondern nach den **Gegentaktanteilen** $\pm (u_{ma} - u_{mb}) / 2 = \pm (U \cos \omega_m t - U \sin \omega_m t) / 2 = \pm U \cdot 0,7071 \cdot \cos(\omega_m t + 45^\circ)$ und den **Gleichtaktanteilen** $(u_{ma} + u_{mb}) / 2 = U \cdot 0,7071 \cdot \cos(\omega_m t - 45^\circ)$, wobei der Gegentaktanteil das Mischergebnis bestimmt und der Gleichtaktanteil praktisch vernachlässigbar ist, wie alle Messergebnisse zeigen. In der hohen Gleichtaktunterdrückung und Dominanz der Gegentaktauswertung liegt ein großer Vorteil dieses opto-

abgedeckt ist, durch die das modulierte Licht einfällt. Die Photogates werden mit einer Gegentakt-Modulationsspannung $\pm u_m$ moduliert, die einem Mittelwert U_0 überlagert ist, und steuern die darunter erzeugten Photoelektronen je nach der Polarität und Amplitude mehr nach rechts oder links. Darin besteht der eigentlich Misch- bzw. Abtastvorgang. Die während einer Integrationszeit entstehende Ladungsdifferenz zwischen der linken und rechten Seite ist ein Maß für die Gegentakt-Autokorrelationsfunktion des Lichtes $P_0(t)$ und der Modulationsspannung $\pm u_m(t)$. Anhand der Recheckverläufe in **Bild 3b** entsteht anschaulich die Gegentakt-AKF in **Bild 3a** je nach der Phasenverschiebung bzw. Echolauftzeit zwischen Lichtphase und Schaukelphase ab.

Die Summe bleibt immer konstant 100%. Der Gleichtaktanteil spielt in diesem entscheidenden Spannungsbereich praktisch keine Rolle!

Die PG-PMD-Funktionsweise kann vereinfacht aber mit guter Näherung durch die Ersatzschaltung in **Bild 5** beschrieben werden. Das von links einfallende Licht erzeugt den Gesamtphotostrom I_E , der sich anscheinend auf zwei getrennte Mischer, in Wahrheit aber auf **einen Gegentakt-Mischer** gemäß transformierter Gegentakt-Modulationsamplitude und -kennlinien $\eta_{Ta,b}$ aufteilt, sowie integriert und verstärkt wird, wobei $U_a - U_b$ die Korrelationswerte und $U_a + U_b$ die Lichtintensitätswerte liefert.

Nur bei **reiner Gegentaktmodulation** darf diese Aufteilung des Gegentaktmischers in **zwei getrennte Mischer** erfolgen. Auf der Vision Show East in Boston im Mai 04 wurde ein Betrieb der Photogates eines PMD mit einer Cos- sowie einer Sinus-Modulation der Photogates als patentierte Verbesserung zur gleichzeitigen Gewinnung der komplexen

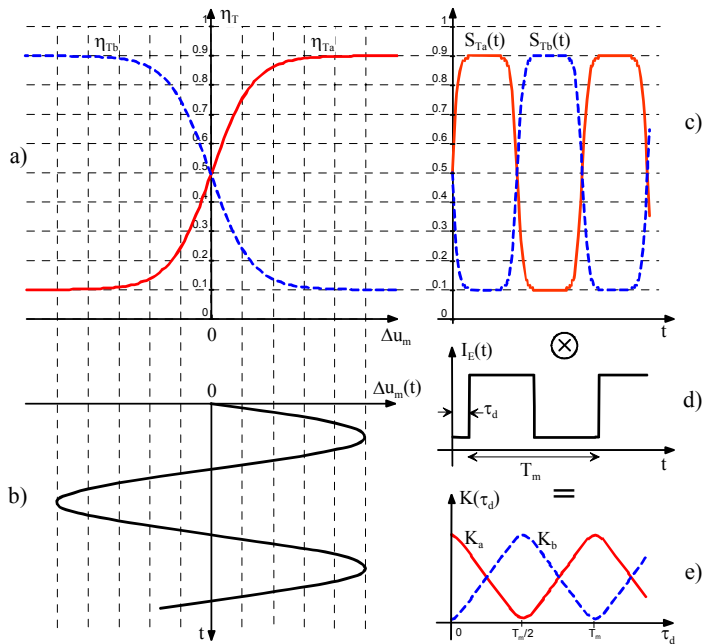


Bild 6 Modulations- und Korrelationsprozess

um 90° verschobenen Messungen können diese Differenzwerte als Real- und Imaginärteil der Gegentakt-Autokorrelationsfunktion $K(\omega\tau_d = 0^\circ)$ und $K(\omega\tau_d = 90^\circ)$ definiert werden. Dann ergibt sich die Laufzeitdifferenz τ_d bzw. Phasendifferenz mit $\varphi_d = \omega \cdot \tau_d = \arctan(U_{\Delta Im} / U_{\Delta Re})$ und der Abstand $R = \tau_d \cdot c / 2$. Die Intensität (Grauwert) beträgt: $Int = \sqrt{U_{\Delta Re}^2 + U_{\Delta Im}^2}$. Durch die Gleichtaktunterdrückung benötigt PMD statt der üblichen Mindestzahl von 3 Eintaktmessungen bzw. -abtastungen nur 2 Gegentaktmessungen, die 4 Abtastwerte liefern. Wird nicht ins Basisband, sondern auf eine Zwischenfrequenz heruntergemischt, so liefert eine nachfolgende IQ- bzw. Sin/Cos-Korrelation von U_Δ sofort alle 4 Abtastwerte.

In einer Doktorarbeit [5] wurde die weltweit erste 3D-Kamera nach dem Prinzip von 4 Eintaktabtastungen im Zeitmultiplex mit jeweils 90° Versatz entwickelt und beschrieben.

Das PMD-Prinzip mit dem OE-Gegentakt-Messprozess direkt im Photodetektor vereinfacht, verkleinert, verbessert und verbilligt nicht nur das 1D-Laserradar, es ermöglicht auch 3D-Videokameras mit einigen 10.000 bis zu 100.000 PMD-Pixeln. Weitere wesentliche Fortschritte sind:

1. Neben der Lichtintensität liefert PMD am Differenzausgang unmittelbar das OE-Korrelationsergebnis, das bekanntlich im Niederfrequenzbereich liegt.
2. Damit entfallen alle Nachteile anspruchsvoller Hochfrequenzverstärker.
3. Für unkorrelierte optische und elektrische Signale liefert der PMD-Korrelator kein Differenz-Ausgangssignal und somit eine hohe Störunterdrückung.
4. PMD nutzt die extrem hohe Dynamik von Photodioden und die hohe EMI-Störsicherheit des auf den photosensitiven Bereich begrenzten optisch-elektrischen Mischprozesses.
5. Der bekannte Effekt des Correlated Double Sampling CDS, wie z. B. gegen Fixed Pattern Noise und $1/f$ -Rauschen in CMOS-Kameras eingesetzt, wird hier durch eine 100fach schnellere Abtastfolge von

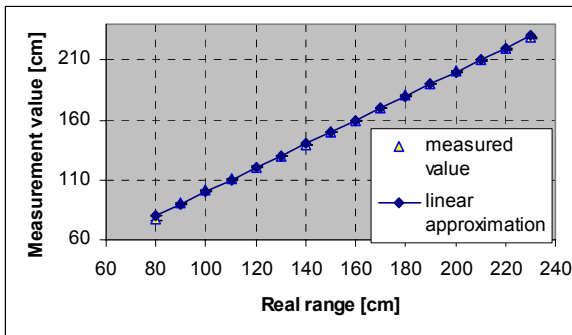


Bild 7 1D-Abstandsmessung mit dem PG-PMD

elektronischen Mischers bzgl. Aussteuerbereich, Temperaturkompensation, Rausch- und Hintergrundlichtunterdrückung.

Der Gegentakt-Modulations- und Korrelationsprozess wird in **Bild 6** veranschaulicht. Ziel der Optimierung ist ein möglichst großer Modulationskontrast $MK = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})$ der Korrelationsfunktionen K_a bzw. K_b in **Bild 6e**, der z. B. für Sinus-Licht und Sinus-Modulation maximal ca. 64% erreichen kann. Die Übertragungskennlinien in **Bild 6a** verformen die Sinusschwingung in **Bild 6b** annähernd zu einer Rechteckschwingung, wie **Bild 6c** zeigt. Diese wird mit dem idealisierten rechteckförmigen Lichtsignal in **Bild 6d** korreliert und ergibt die Korrelationsfunktionen K_a und K_b in **Bild 6e**.

Durch die Differenzbildung $U_a - U_b = U_\Delta = K(\omega\tau_d)$ entfällt der Gleichanteil. Mit zwei

5. Aufbau, Entwicklungstand und neuartiger 3D-PMD-Videokameras

Die bisher beschriebenen Vorteile des PMD-Laserradars sollen anhand von **Bild 7**, einer relativ frühen 1D-Messung vor 5 Jahren, belegt werden. Dargestellt ist eine Messreihe, die die Rohdaten aller Entfernungswerte über ca. 1 Stunde darstellt, wobei keine Referenz verwendet wurde. Erstaunlich klein



Bild 8 PMD-Kamera mit LED-Matrix

war die Zeitdrift, d. h. die hohe Stabilität der Mittelwerte. Sie liegt bereits **ohne Referenz** in der Größenordnung der Standardabweichung der Messwerte von ca. ± 2 mm.

Eine besondere Herausforderung war, diese Eigenschaften nun erfolgreich in größere PMD-Matrizen für 3D-Kameras zu übertragen. Das gelang 2003 im Wesentlichen der Siegener Firma PMD Technologies in Zusammenarbeit mit dem INV der Universität Siegen.

Bild 8 zeigt eine 3D-PMD-Kamera mit der in **Bild 9** dargestellten 16×16 PMD-Matrix mit 256 eigenständigen Lidarempfängern. Etwa 100 Infrarot-LEDs sorgen für eine modulierte 1 Watt-Beleuchtung der 3D-Szene bei ca. 16,6 MHz Modulationsfrequenz. Der Eindeutigkeitsbereich von 9 m entspricht etwa

der Reichweite, die wesentlich von der 3D-Bildrate bzw. Integrationszeit abhängt.

Bild 10 zeigt das Blockschaltbild einer PMD-Kamera, hier mit einer angedeuteten Pseudo-Noise-Modulation für Sender und Empfänger. Die mit etwa 15 – 30 MHz modulierte, kostengünstige und augensichere LED-Beleuchtung trifft im Sichtfeld auf 3D-Objekte, die das Licht um die Echolaufzeit verzögert zum Kameraobjektiv rückstreuen. Das Sichtfeld der 3D-Kamera wird mit möglichst homogener Intensität und einer homogenen sphärischen Laufzeitcharakteristik unabhängig von der Pixelgröße ausgeleuchtet. Das Kameraobjektiv bildet dieses Sichtfeld einschließlich der Laufzeiten auf die PMD-Matrix ab, wobei es – ebenso wie das Auge – zunächst physikalisch in Kugelkoordinaten „sieht“.

Für sehr schnelle Vorgänge werden die zwei notwendigen IQ-Gegentakt-Messungen $0^\circ/180^\circ$ und $90^\circ/270^\circ$ der Korrelationsfunktion bei Sinus-, Rechteck- und PN-Modulation vorzugsweise wie beim herausgeführten

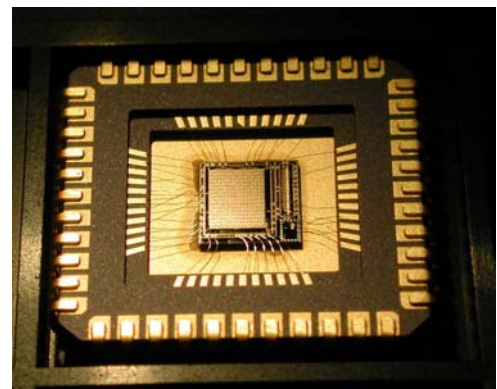


Bild 9 16×16 PMD-Pixel-Chip

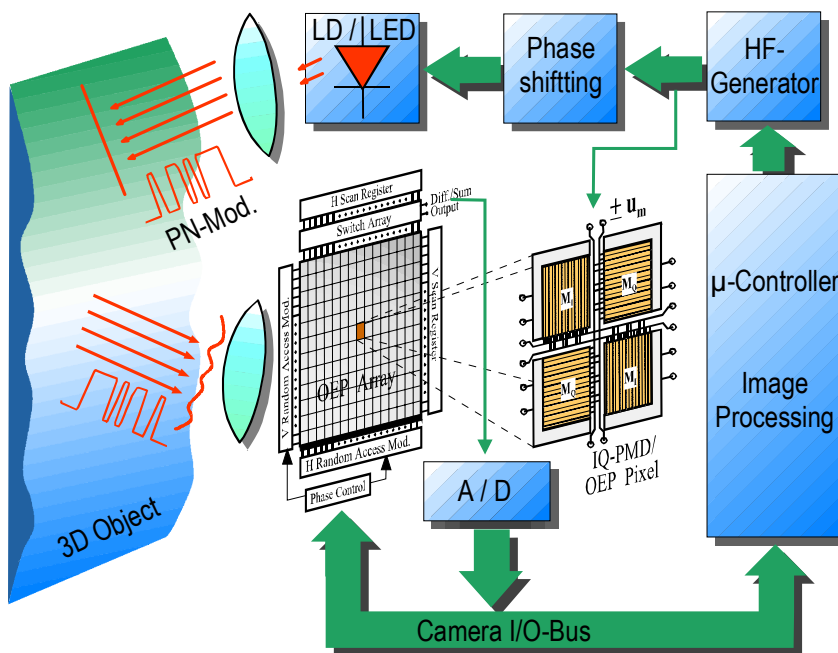


Bild 10 3D-PMD-Kamera misst die Echolaufzeit der Beleuchtung

Vierquadranten-Pixel im Raummultiplex durch je zwei diagonale Quadranten I/I und Q/Q zur gleichmäßigeren Lichtverteilung durchgeführt. Im Zeitmultiplexbetrieb werden beide Messungen nacheinander ausgeführt. Mit einer 3D-Bildrate von 25 - 50 Hz kann die PMD-Kamera als **3D-Videokamera** eingesetzt werden.

In **Bild 11** bewegt ein Mitarbeiter ein helles Brett in Richtung der 3D-Kamera. In der gewählten Perspektive wächst das Brett von der unteren Bezugskante aus in farb- oder grau codierter Höhe aufwärts. Es werden nur 4 Raumbilder aus einer Folge von 3D-Snapshots mit je 20 ms Integrationszeit annähernd als Rohdaten mit einem Matlab-

Programm dargestellt. Messgeschwindigkeit und Auflösung reichen bereits für einfache Anwendungen der Sicherheitstechnik und der autonomen mobilen Robotik aus.

Die vierfache Zahl 1024 (64 x 16) PMD-Pixel weist die 3D-Videokamera in **Bild 12** auf. Hier befinden sich die

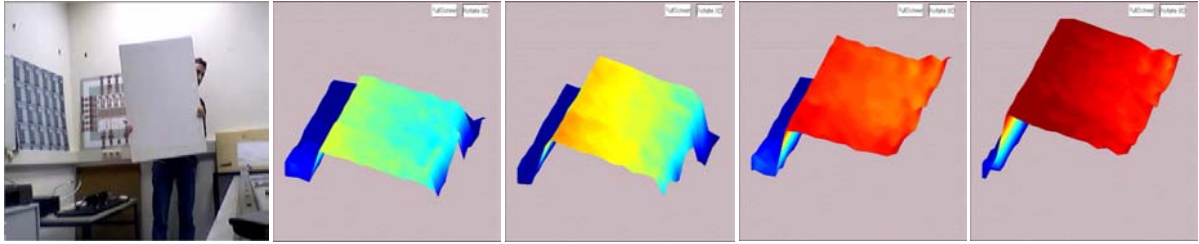


Bild 11 4 Snapshots à 20 ms aus der 3D-Bildfolge einer kontinuierlichen Brettbewegung

LEDs hinter den seitlichen Objektiven.

Bild 13 zeigt eines von 750 3D-Bildern aus einem Videoclip, hier die Drehung einer Person mit ausgestreckten Armen, wobei im Moment eine aufgerichtete Handfläche gerade zur 3D-Videokamera weist.

Der Raumhintergrund hebt sich durch die räumliche Bildkante deutlich von dem am Kinn und Bauch abgeschnittenen Oberkörper ab. Die Finger werden trotz der kleinen Teilfläche und damit relativ groben Pixelstruktur erkennbar aufgelöst. Hier werden insbesondere auch die Intensitätswerte als 2D-Graubild der 3D-Kontur überlagert.

Die zugehörige 1024er PMD-Matrix ist in der Bildmitte von **Bild 14** dargestellt. Der PMD-Chip weist eine Fläche von ca. 11 mm x 4,7 mm und eine aktive Hintergrundlicht-Unterdrückung auf. Er liegt auf einem Layout-Entwurf, der die PMD-Fingerstruktur erkennen lässt.



Bild 12 3D-Kamera mit 1024 (64x16) PMD-Pixeln

Unten rechts in **Bild 14** ist das Layout einer **19200er PMD-Matrix** im Format 160 x 120 zu sehen. Dieser PMD-Chip wurde bereits gefertigt, gehäust und erfolgreich getestet.

Bei dieser 3D-Pixelfülle drängen sich viele bisher unerfüllte und neue Anwendungen auf, z. B. in der autonomen mobilen Robotik und Handhabung, in der Verkehrssicherheit und Sicherheitsüberwachung sowie neue 3D-Mensch-Maschine-Schnittstellen. Ebenso können bekannten 2D-Rundumsichtkameras mit 3D-Rundumsichtkameras z. B. mit zylindrische LED-Beleuchtung kombiniert und ihre Daten fusioniert werden. Nahe liegend ist die pixelsynchrone Fusion von mindestens

einer niedrig auflösenden 3D-Kamera mit z. B. 80.000 3D-Pixeln, coloriert und texturiert mit den Attributen mindestens einer hoch auflösenden 2D-Farbkamera mit z. B. 800.000 2D-Farbpixeln. Ein Strahlteiler mit Spektralfilterfunktion sorgt zugleich für die Zuordnung der Pixel und der Beleuchtung. Mindestens eine zur Linsenachse versetzte 2D-Kamera kann soweit notwendig im Nahbereich mit den auf Basis der in Echtzeit verfügbaren 3D-Daten bezüglich des 2D-Pixelversatzes korrigiert werden.

Die weitere Entwicklung hat durch die letzten erfolgreich getesteten PMD-Chips mit 160 x 120 = 19200 parallelen Lidar-Empfängern neue Perspektiven gewonnen, die in ihrer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Tragweite kaum einzuschätzen sind.

Im **Bild 14** ist ein weiterer PMD-Chip abgebildet, der nur 16 x 4 Pixel aufweist, der aber eine neue PMD-Technologie eröffnet. Sie benötigt keine Photogates, da in einem mit Selbstmodulation bezeichneten Verfahren

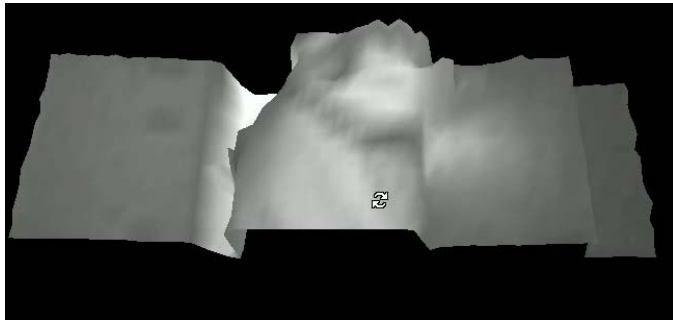


Bild 13 3D-Snapshot einer Person mit gestreckten Armen

die Ausleseelektroden selbst moduliert werden. Vorteile sind inhärente sehr hohe Hintergrundlicht-Unterdrückung, extrem hohe Modulationsfrequenzen bis in den GHz-Bereich und damit Abstandsmessungen bis in den Sub-mm-Bereich. Nachteile sind die Kosten der GaAs-Schottky-Technologie. Andererseits eröffnen sich hiermit völlig neue Möglichkeiten einer schnellen analogen und digitalen opto-elektronischen Signalverarbeitung, mit dem OEP, einer PMD-Kombination als Opto Elektronischer Prozessor [6].

6. Anwendungen des Technischen 3D-Sehens mittels PMD-Videokameras

Das Spektrum dringender und viel versprechender Anwendungen ist von kaum übersehbarer Breite, der man nur mit der Bezeichnung „Schlüsseltechnologie gerecht wird.

Hier aufgelistet einige der wichtigsten Themen der „PMD- und 3D-Videokamera-Revolution“:

- Unfall freies Fahren, Precrash, Intelligenter Airbag, Automatischer Stop & Go-Betrieb
- Autonome mobile Robotik, Telerobotik, Roboter-Teamwork, Roboter-Rettungshilfe, 3D-Roboterhandkamera
- Roboter Exploration, Roboterhilfe für die „Silver Generation“
- 3D-Mensch-Maschine-Schnittstelle, 3D-Web-Kamera, Virtual and Augmented Reality,
- Automatisierung in der Landwirtschaft
- Sicherheitstechnik, Gefahrenraumüberwachung, Zugangskontrolle, Personen- und Fahrzeugidentifizierung,
- Neue analoge und digitale OE-Signalverarbeitung und Messtechnik mit Schottky-PMD-Technologie
- Neue Luftfahrtapplikationen mit Gain-PMD-Technologien

Schwerpunkte der anstehenden Anwendungen liegen vor allem in den Bereichen Sicherheit, Autonome Robotik und Automotive.

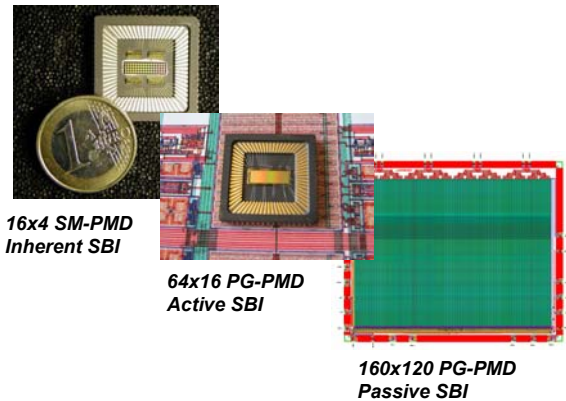


Bild 14 64er, 1024er und 19200er PMD-Matrizen

7. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag versucht, den Schritt von der Photodiode PD zum Photomischdetektor PMD mit seiner zugleich unglaublichen Vereinfachung des OE-Misch- und Korrelationsprozesses und grundlegenden Verbesserung der Messtechnik auch sein vielleicht wichtigstes Innovationsergebnis, das Technische-3D-Sehen, zu erläutern.

Nach der erfolgten Verifizierung dieses Konzeptes steht zukünftig die Umsetzung dieser Innovation in Produkte und wirtschaftliche Nutzung sowie die Erweiterung der Spezifikationen in Richtung höherer Messgenauigkeit, größerer Reichweite und anwendungsspezifischer Ausführungen an. Die PMD-Technologien bieten den Schlüssel zu vielen jahrelang ungelösten Problemen in der Robotik, Verkehrs- und Sicherheitstechnik, aber auch für soziale Aufgaben in der „Silver Society“.

8. Danksagung

Hinter den vorliegenden Fortschritten stehen Fleiß, Teamwork und Kompetenz von außergewöhnlicher Qualität seitens der verantwortlichen Mitarbeiter der PMDTechnologies und S-Tec GmbH, und des Instituts für Nachrichtenverarbeitung.

9. Literatur

- [1] Schwarte, R. et. al.: Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques. In Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging; Academic Press; Boston 1999
- [2] Kraft, H., Frey, J., Moeller, T., Albrecht, M., Grothof, M., Schink, B., Hess, H., Buxbaum, B.: 3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies. OPTO 2004, Nürnberg
- [3] Schwarte, R.: Breakthrough in Fast 3D-Imaging Using PMD- and OEP-Technology. IMS Workshop „CMOS-Imaging“, Duisburg, May 25-26 2004, Konferenz-CD
- [4] Zhang, Z.: Untersuchung und Charakterisierung von PMD (Photomischdetektor)-Strukturen und ihren Grundschaltungen. Dissertation, Universität Siegen, 2004
- [5] Lange, R.: 3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Dissertation, Universität Siegen, 2000
- [6] Schwarte, R., Zhang, Z., Kraft, H., Moeller, T., Frey, J., Grothof, M., Buxbaum, B., Ringbeck, T.: OEP (Opto Electronic Processor) for Extremely Fast Multi-Channel Analog and Digital OE-Signal Processing. OPTO 2004, Nürnberg