

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
27. Februar 2003 (27.02.2003)

PCT

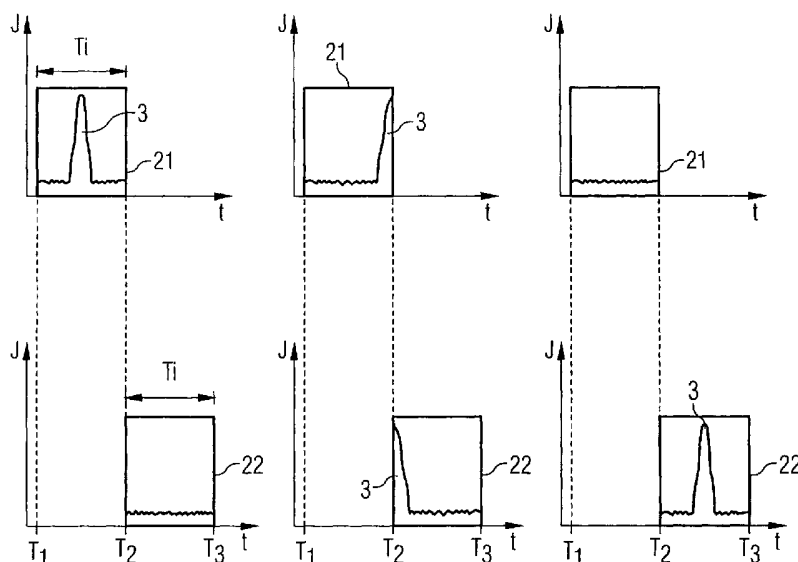
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/016944 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01S 17/89, 7/487
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE02/02843
- (22) Internationales Anmeldedatum: 1. August 2002 (01.08.2002)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
101 38 531.5 6. August 2001 (06.08.2001) DE
101 53 742.5 31. Oktober 2001 (31.10.2001) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).
- (72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): MENGEL, Peter [DE/DE]; Roggensteiner Allee 32, 82223 Eichenau (DE).
DOEMENS, Günter [DE/DE]; Eichenfeldstrasse 4, 83607 Holzkirchen (DE).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, KR, US.
- (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR RECORDING A THREE-DIMENSIONAL DISTANCE-MEASURING IMAGE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR AUFNAHME EINES DREIDIMENSIONALEN ABSTANDS-BILDES



(57) Abstract: The invention relates to methods and devices for recording three-dimensional distance-measuring images of an object surface by measuring light propagation time using a short-term integrated photodetector. For starting a light-induced pulse (1) on the transmission side, a trigger signal is produced that is at the same time used on the receiving side for opening at least one integration window (2, 21, 22) for receiving back-scattered light-induced pulses (3) with a predetermined time delay (ΔT_v). A predetermined event such as a maximum or a zero crossing is detected which, by its interval relative to the integration windows, determines a trigger delay. Said trigger delay is correlated with the light propagation time and allows calculation of the object point distance d.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 03/016944 A2

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) für die folgenden Bestimmungsstaaten JP, KR, europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Es werden Verfahren und Vorrichtungen zur Aufnahme von dreidimensionalen Abstandsbildern einer Oberfläche durch Lichtlaufzeitmessungen mit einem Photodetektor mit Kurzzeitintegration beschrieben. Dabei wird zum Start eines sendeseitigen Lichtimpulses (1) ein Triggersignal erzeugt, welches zugleich empfangsseitig mit vorgegebenen Zeitverzögerungen (DTv) zum Öffnen von mindestens einem Integrationsfenster (2, 21, 22) zum Empfang zurückreflektierte Lichtimpulse (3) verwendet wird. Es wird ein vorgegebenes Ereignis wie beispielsweise ein Maximum oder ein Nulldurchgang ermittelt, der in seiner zeitlichen Lage relativ zu den Integrationsfenstern eine Triggervverzögerung bestimmt, die mit der Lichtlaufzeit korreliert wird und die Berechnung des Objektpunktabstandes d zulässt.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zur Aufnahme eines dreidimensionalen Abstandsbildes

5

Die schnelle, robuste Erfassung dreidimensionaler Bilder gewinnt insbesondere für die Sensorik auf zahlreichen Gebieten zunehmend an Bedeutung. Bekannte Triangulationsverfahren sind wegen der erforderlichen Messbasis für die trigonometrische Berechnung eines Abstandswertes nur für den Nahbereich bis ca. 2m geeignet und eingeschränkt anwendbar. Insbesondere für größere Messbereiche von beispielsweise 20 cm bis 50 m ergeben sich für kostengünstige dreidimensional (3D) erfassende und auswertende Messsysteme vielfältigste Anwendungen, wie beispielsweise im Bereich der Automobiltechnik, der Navigation oder der Gebäude-, Sicherheits- und Automatisierungstechnik. Die Vermessung größerer 3D - Szenen und 3D - Objekte kann heute nur statisch mittels Photogrammetrie oder mit einem scannenden 3D - Laserradar bei entsprechend hohem Kosten- und Zeitaufwand erfolgen.

In der deutschen Patentanmeldung Nr. 198 33 207 wird ein Verfahren beschrieben, bei dem die extrem kurze Integrationszeit eines CMOS - Fotosensors, die beispielsweise bei 30 ns liegt, in Verbindung mit einem ebenfalls kurzen Laserimpuls genutzt wird, um Entfernungs- bzw. Abstandsbilder schnell und kostengünstig durch Auswertung von Lichtlaufzeitmessungen zu erzeugen. Zugleich mit dem Aussenden des Laserimpulses wird über einen Trigger ein Messfenster am CMOS Bildwandler geöffnet und die Lichtintensität des Laserimpulses nach Reflexion am auszumessenden Objekt in zwei aufeinanderfolgenden Messungen mit den Integrationszeiten T_1 und T_2 detektiert. Aus der Messung der integrierten Intensität U_1 und U_2 innerhalb von zwei Messfenstern mit Integrationszeiten T_1 und T_2 lässt sich die Laufzeit T_0 und damit der Abstand zum Objektpunkt exakt berechnen, nach der Rechenbeziehung:

$$d = \frac{1}{2} c \frac{U_2 T_1 - U_1 T_2}{U_2 - U_1}$$

Als Beleuchtung dient eine Laserlichtquelle, die mit dem Beginn der Integrationszeit T_1 und T_2 synchronisiert ist und kurze Anstiegszeiten (ca. 1 ns), sowie eine möglichst konstante Ausgangsleistung aufweist.

Die Anwendung dieser Formel erfordert allerdings aufgrund der Differenz und Quotientenbildung eine Messung mit Lichtintensitäten, deren integrierte Photospannungen deutlich über der Rauschgrenze des CMOS - Bildwandlers liegen müssen. Zwar können die Ergebnisse zahlreicher Laserimpulsbeleuchtungen aufsummiert werden, eine Verbesserung des Signal/Rauschverhältnisses lässt sich aber nur mit der Wurzel der Anzahl der Laserimpulse erreichen. Des Weiteren führen endliche Anstiegsflanken der Laserimpulse sowie unvermeidbare Nichtlinearitäten im Integrationsverhalten des CMOS-Bildwandlers zu Messwertfehlern, die zusätzliche Kalibrierverfahren erfordern.

20

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde Verfahren und Vorrichtung zur Aufnahme eines dreidimensionalen Abstandsbildes mittels Lichtlaufzeitmessungen zur Verfügung zu stellen, womit ein vergrößerter Abstandsmessbereich erzielt wird, Unabhängigkeit des Sensorsignals von der Form der Lichtimpulse gegeben ist und eine niedrigere Lichtleistung für die Sendeseite ermöglicht wird.

Die Lösung geschieht durch die jeweilige Merkmalskombination von Anspruch 1, 3 bzw. Anspruch 14 oder 15. Vorteilhafte Ausgestaltungen können den Unteransprüchen entnommen werden.

Die vorliegende Erfindung verwendet einen CMOS - Fotosensor mit einer Vielzahl von Bildpunkten bzw. -zellen mit Kurzzeitintegration, wobei die Integrationszeit bildpunktweise einstellbar ist, sowie eine Lichtimpulsbeleuchtung zur Erzeugung

eines 3D - Abstandbildes. Die dazu verwendete Lichtquelle muss einheitlich ansteuerbar sein, kann aber sowohl punktförmig, als auch flächig ausgebildet sein. Für die Bestimmung der Abstandswerte wird ein neues Messprinzip eingesetzt mit dem Ziel, zuverlässige Lichtlaufzeitmessungen bis an die Rauschgrenze des CMOS Sensors zu ermöglichen. Dazu wird durch die Triggersignale sendeseitig das Aussenden der Lichtimpulse und empfangsseitig das Öffnen des elektronischen Shutters, gleichbedeutend mit dem Öffnen eines Zeitfensters, am CMOS Sensor gesteuert. Dies geschieht empfangsseitig mit einer schrittweise ansteigenden Zeitverzögerung, beispielsweise über eine Verzögerungsleitung, in Inkrementen von beispielsweise 1/10 Nanosekunde. Somit werden ausgesendeter Laserimpuls und Integrationsfenster zeitlich mit wachsender Zeitverzögerung gegeneinander verschoben, wobei mit je schrittweise ansteigender Triggerverzögerung mindestens ein Lichtimpuls gesendet wird. Zur Verringerung der Laserimpulsleistung werden bei möglichst allen Triggerverzögerungen Mehrfachbelichtungen angewandt und eine Signalauswertung zum Abschluss ausgeführt. Die so gemessenen integrierten Sensorsignale werden in einer Verarbeitungseinheit gespeichert.

Bei Korrelation der eingestellten Verzögerung mit der Lichtlaufzeit des korrespondierenden Objektpunktes ergibt sich entsprechend einer Lösung ein Maximum im integrierten Signal, dessen Ermittlung aus den gespeicherten Werten der Verarbeitungseinheit durch Interpolationsverfahren mit hoher Sensitivität und präzise durchgeführt werden kann. Der 3D-Abstandswert kann somit anhand der für die größte Übereinstimmung zwischen Zeitfenster und zurückreflektiertem Lichtimpuls ermittelte Triggerverzögerung definiert werden und das Ergebnis, die Lichtlaufzeit, wird weitgehend unabhängig von der Form des Lichtimpulses sowie von den Linearitätseigenschaften des CMOS Bildwandlers erhalten. Anders ausgedrückt ergibt sich der Abstand zum Objektpunkt aus der Zahl von Verzögerungsschritten, die bis zu diesem Zustand aktiviert wurden. Hierbei sind Laserimpuls und Integrationszeit etwa von glei-

cher Dauer um ein möglichst ausgeprägtes Korrelationsmaximum zu erzielen. Die Integrationszeit ist jedoch aus schaltungstechnischen Gründen auf etwa 30 ns begrenzt.

5 Eine weitere Lösung der gestellten Aufgabe benutzt ebenfalls die Kurzzeitintegration eines Photoempfängers, sowie die in Schritten durchgeführte zeitliche Verzögerung eines Laserimpulses relativ zu empfangsseitigen Integrationsfenstern. Die Kurzzeitintegration wird jedoch zweimal mit gleicher Integra-
10 tionszeit, d.h. mit gleichlangem Integrationsfenster, entweder parallel oder seriell durchgeführt. Dies geschieht in Bezug auf zwei hintereinander geschaltete und unmittelbar aufeinander folgende Integrationsfenster. Dabei bedeutet die parallele Verfahrensweise, dass gleichzeitig für das vordere
15 und für das hintere Integrationsfenster beleuchtet und detektiert wird. Die über beispielsweise eine Verzögerung zeitverzögerte Triggerung der Integrationsfenster relativ zum sendeseitigen Laserimpuls wird unverändert ausgeführt. Die serielle Behandlung sieht eine Auswertung mit oder durch das
20 erste Integrationsfenster vor, woraufhin die zweite sich anschließende Phase in Bezug auf das zweite Integrationsfenster ausgewertet wird und die jeweils abgespeicherten integrierten Werte miteinander verglichen werden. Für diesen Fall der Auswertung ist die Dauer des Laserimpulses kurz im Verhältnis
25 zur Dauer der Integrationszeit bzw. der Länge des Integrationsfensters. Ein Laserimpuls kann beispielsweise 4 ns betragen, wo hingegen die Integrationszeit z.B. 30 ns dauert. Durch diese Auswertemethode wird der Objektpunkt Abstand ebenfalls durch die ermittelte Richtlaufzeit bestimmt. Diese ergibt sich durch die Suche nach einem möglichst eindeutig auswertbarem empfangsseitigem Ereignis, das einer bestimmten
30 Triggerverzögerung, die schrittweise veränderbar ist, zugeordnet werden kann. In der ersten Variante wurde ein Maximum für die empfangsseitige Deckungsgleichheit von Laserimpuls und Integrationsfenster gesucht. Bei der hier beschriebenen
35 Auswertemethode wird der Zeitpunkt detektiert, bei dem sich der Lichtimpuls am Übergang vom ersten zum zweiten Integrati-

onsfenster befindet. Für diesen Fall, wenn der zurückreflektierte Lichtimpuls am Empfänger symmetrisch zur Hälfte in das erste und zur weiteren Hälfte in das zweite Integrationsfenster fällt, ergeben sich gleiche Lichtanteile bzw. gleiche
5 Spannungen. Auswertbar ist ebenso die Differenz dieser beiden Spannungswerte, die gegen null geht. Da dieser Nulldurchgang sehr steil ist, ist eine Ermittlung relativ einfach.

Um kritische Laserleistungen aufgrund von Laserschutzbestimmungen keinesfalls zu überschreiten, können Mehrfachbelichtungen eingesetzt werden. Ein wesentlicher damit erzielbarer Vorteil liegt jedoch in der Kummulierung von mehreren hintereinander eintreffenden Lichtimpulsen an den Integrationszellen. Diese werden durch entsprechendes Öffnen und Schließen
15 der Integrationszellen bei jedem Lichtimpuls aufintegriert, so dass an jeder Integrationszelle ein ausreichend hoher Signalpegel vorliegt, der sich wesentlich vom Rauschbereich abhängt. Somit kann für die Vielzahl von Integrationszellen, deren örtliche Verteilung der Pixelverteilung des Bildes entspricht, eine insgesamt gut auswertbare Anzahl von Spannungssignalen erzielt werden. Nachdem das zeitaufwendige Auslesen der Vielzahl von Integrationszellen erst am Ende einer Mehrfachbelichtung geschieht, läuft die Auswertung relativ
20 schnell ab.

25

Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt in der kolinearen Führung der Lichtstrahlen auf einer Achse.

30

Im Folgenden werden anhand von die Erfindung nicht einschränkenden Figuren Ausführungsbeispiele beschrieben:

Figur 1 zeigt eine Messvorrichtung zur Erzeugung von dreidimensionalen Abstandsbildern,

35

Figur 2 zeigt das Verfahrensprinzip der korrelierten Lichtlaufzeitmessung und

Figur 3 zeigt die Interpolation zur Ermittlung des Maximalwertes zur Bestimmung der Laufzeitverzögerung T_0 .

Figuren 4 bis 7 zeigen arstellungen zur Erzeugung von Abstands-
5 standsbildern mit differenzieller Kurzzeitin-
tegration an CMOS-Sensoren

- Die gesamte zu vermessende 3D - Szene wird für eine
Bildaufnahme seriell mit kurzen Lichtimpulsen mit Anstiegs-
10 zeiten in Nanosekunden-Bereich beleuchtet. Der Start des Aus-
sendens der Lichtimpulse erfolgt über einen Trigger , der für
jeden Messvorgang von einer Kontroll- und Verarbeitungsein-
heit vorgegeben wird (Figur 1). Ein Teil des Triggersignals
wird gleichzeitig über eine programmierbare Verzögerungslei-
15 tung geführt und dient nach einer vorgegebenen zeitlichen
Verzögerung T_v mit Inkrementen im 1/10 - Nanosekundenbereich
als Startsignal für das Öffnen des elektronischen Shutters am
CMOS FOTOSensor , das nach einer bestimmten kurzen Integra-
tionszeit (beispielsweise 30 ns) wieder geschlossen wird.
20 Dies ist gleichbedeutend mit dem Öffnen eines Zeitfensters
zum Empfang von zurückreflektierten Lichtimpulsen 3. In einem
geöffneten Zeitfenster können eingehende Lichtimpulse aufin-
tegriert werden. Die Integrationszeit, also die Dauer des ge-
öffneten Fensters, wird vorteilhafterweise gleich der zeitli-
25 chen Dauer eines Lichtimpulses gewählt.

- Die ausgesandten Lichtimpulse werden an den Objekten der
3D Szenen gestreut und das zurückkommende Licht über eine
entsprechende Optik am CMOS Sensor innerhalb der Integrati-
30 onszeit des elektronischen Shutters erfasst. Aufgrund der un-
terschiedlichen Abstände unterschiedlicher Objektpunkte vom
Sensor werden mit den Orten korrespondierende Lichtimpulse
eine unterschiedliche Laufzeitverzögerung T_0 erhalten. Für
einen bestimmten, einzigen Objektpunkt im Abstand d ergibt
35 sich damit ein integriertes Sensorsignal $U (T_0, T_v)$ am kor-
respondierenden, empfangsseitigen Bildpunkt aus der zeitli-
chen Überlappung des CMOS Integrationsfensters 2 mit dem zu-

rückkommenden Lichtimpuls 3 (mathematische Faltungsfunktion) bei der momentan eingestellten Triggerverzögerung T_V (Figur 2).

- 5 • Wird nun die Triggerverzögerung T_V beginnend vom Wert 0 in Inkrementen $n \times \Delta T_V (=T_V)$ erhöht, so steigt das Sensorsignal $U(T_0, T_V)$ zunächst an bis die Triggerverzögerung T_V gleich der Lichtlaufzeit T_0 für diesen Bildpunkt ist. In diesem Fall liegt eine maximale Überlappung von zurückkommendem
10 Laserimpuls 3 und dem Messfenster 2 des CMOS-Sensors vor, so dass sich hier ein Maximum für die integrierte Intensität ergibt. Wird die Triggerverzögerung T_V darüber hinaus weiter erhöht so reduziert sich wieder der zeitliche Überlappungsbereich und damit das integrierte Sensorsignal (Spannung U).
- 15 • Damit lässt sich ein 3D - Abstandsbild aus einfachen Intensitätsvergleichsmessungen mit Extremwertbestimmung unter Einsatz sehr niedriger Lichtleistungen erzeugen. Die Kontroll- und Verarbeitungseinheit speichert für eine Reihe von unterschiedlichen Triggerverzögerungen $n \times \Delta T_V$ (Laufindex $n = 0$
20 bis i) die zugehörigen Sensorsignale $U(T_0, T_V)$ des gesamten CMOS Fotosensors ab und ermittelt anschließend den Maximalwert $U(T_0, T_V)_{\text{Max}}$ für jeden einzelnen Bildpunkt. Aus der zugehörigen Triggerverzögerung T_V lässt sich die Lichtlaufzeit $T_0 = i \times \Delta T_V$, siehe Fig. 2, für diesen Bildpunkt bestimmen und daraus der Abstand d des korrespondierenden Objektpunktes $d = c T_0 / 2$ (c - Lichtgeschwindigkeit).
- 30 • Im allgemeinen wird die Lichtlaufzeit T_0 nicht exakt gleich der in Inkrementen eingestellten Triggerverzögerung $n \times \Delta T_V$ sein, sondern einen Zwischenwert besitzen, wie in Fig. 3 gezeigt. Es ist daher vorgesehen, für die Maximalwertbestimmung Interpolationsverfahren einzusetzen. Für ideale Pulsformen sind lineare Verfahren hinreichend. Unter realen Bedingungen ist es aber vorteilhaft, aufwendige Interpolationsverfahren auf der Basis quadratischer Polynome oder
35 Splin-Funktionen einzusetzen. Das Ergebnis für die Lichtlauf-

zeit T_0 lässt sich dabei nicht nur aus dem Maximalwert sondern gegebenenfalls auch aus anderen Formkriterien, Schnittpunkten, etc... der Interpolationskurve ermitteln. Da bei der Messung von Lichtimpulsen 3 mit unterschiedlichen Laufzeiten T_0 die Interpolationskurven der Signalwerte nur in ihrer Lage bezüglich der eingestellten Triggerverzögerungen T_V verschoben werden, ist auch ein Auswertung durch Vergleich mit einer gespeicherten Referenzkurve durchführbar, die zuvor bei einem bekannten Abstandswert d aufgenommen wurde. Damit lässt sich mit Interpolations- und Referenz-Vergleichsverfahren das Ergebnis der Abstandsbestimmung in seiner Genauigkeit verbessern und die Anzahl der einzustellenden Triggerverzögerungen für eine gewünschte Entfernungsauflösung reduzieren.

• Für eine elektronische Triggerverzögerung können vorteilhaft programmierbare Verzögerungsleitungen (Programmable Delay Lines) in CMOS Technologie eingesetzt werden. Erhältlich sind beispielsweise Verzögerungselemente mit standardmäßig 0,25 ns Inkrement und 256 programmierbaren Einstellungen. In künftigen Entwicklungen sind Inkremente mit 0,1 ns denkbar. Damit werden Entfernungsauflösungen von 1,5 cm möglich, die durch Interpolation noch auf 0,5 cm verbessert werden können.

• Die in Figur 1 dargestellte Kontroll- und Verarbeitungseinheit kann teilweise- oder vollständig innerhalb der elektronischen Ansteuerungseinheiten des CMOS Sensor integriert werden.

• Entfernungsbilder mit etwa tausend Bildpunkten sind für eine Raum- und Sicherheitsüberwachung in den meisten Fällen schon ausreichend. Möchte man für einen Entfernungs- Messbereich von 10 m Entfernungsbilder mit 0,5 % Auflösung (5 cm) erzeugen, so werden mit Interpolation etwa 100 Bildaufnahmen mit Verzögerungsinkrementen von $\Delta T_V = 0,6$ ns erforderlich. Dies führt unter Annahme einer Bildpunktdatenrate des CMOS Sensors von 5 MHz zu einer Messzeit von $1000 \times 0,2 \mu s \times$

100 = 20 ms für die Erfassung des gesamten 3D Abstandsbildes
(\cong 50 3D-Bilder/s).

• Bei der Messung mit einer momentan eingestellten Trig-
5 gerverzögerung T_V können zusätzlich noch mehrere Lichtim-
pulse analog am Chip aufaddiert werden, wodurch eine weitere
Verbesserung des Signal/ Rauschverhältnisses erzielt wird und
eine adaptive Einstellung der Mehrfachbelichtung entsprechend
Objektreflektivität ausgeführt werden kann.

10

Das anhand der Figuren 4 bis 7 näher erläuterte Verfahren der
differentiellen Kurzzeitintegration an CMOS-Sensoren beinhal-
tet folgendes:

Das vorgeschlagene Verfahren benutzt ebenfalls die Kurzzeit-
15 integration eines Photoempfängers, sowie die in Schritten
durchgeführte zeitliche Verzögerung eines Laserimpulses rela-
tiv zu einem oder mehreren Integrationsfenstern. Im Unter-
schied zur ersten Lösung der gestellten Aufgabe wird die
Kurzzeitintegration jedoch zweimal parallel oder seriell mit
20 gleicher Integrationszeit T_i durchgeführt, wobei die beiden
gleichlangen Integrationsfenster 21, 22 unmittelbar hinter-
einander geschaltet sind und somit eine gemeinsame zeitliche
Grenze aufweisen.

25 Die Dauer des Laserimpulses ist vorzugsweise kurz im Ver-
gleich zur Integrationszeit T_i . Der Messvorgang für die
Lichtlaufzeit besteht nun darin, dass der ausgesendete Laser-
impuls relativ zu der Integrationszeit T_i um die Verzöge-
rungszeitinkremente ΔT_V verschoben wird. An der optoelektro-
30 nischen Umsetzung ändert sich der integrale Wert der Spannung
 U bei fortschreitender Triggerverzögerung T_V so lange nicht,
wie der Laserimpuls voll in eines der beiden Integrations-
fenster 21, 22 fällt. Figur 4 zeigt diesen Zustand, wobei der
Laserimpuls in der linken Bildhälfte im ersten Integrations-
35 fenster 21 befindlich ist und in der rechten Bildhälfte im
zweiten Integrationsfenster 22 auftaucht. In der mittleren
Darstellung der Figur 4 befindet sich der Laserimpuls 3 zur

Hälfte im ersten und zur Hälfte im zweiten Integrationsfenster. Kurz vor diesem Übergang nimmt der integrale Wert der Spannung U der empfangene Lichtintensität durch das zeitliche Herauswandern aus dem jeweiligen Integrationsfenster entsprechend ab, während in dem sich unmittelbar anschließenden Integrationsfenster die integrierte Lichtintensität entsprechend zunimmt. Bei einer bestimmten der jeweiligen Entfernung d zum Objektort entsprechenden Triggerverzögerung sind somit die in den beiden Integrationsfenstern gemessenen Spannungen gleich groß. Ihre Differenz geht gegen null. Dieser Nulldurchgang ist sehr steil und damit genau bestimmbar. Weiterhin können einfache Interpolationsverfahren eine wesentliche Präzisierung erzielen.

Figur 7 betrifft eine grafische Darstellung zur Auswertung einer Signalkurve bei differentieller Kurzzeitintegration an CMOS-Sensor. Die im Spannungs/Zeit-Diagramm dargestellte Funktion wird durch Aneinanderreihung von Messpunkten aufgebaut, wobei sich ein einzelner Messpunkt aus einer Messung mit konstanter Triggerverzögerung T_V ergibt. Diese Triggerverzögerung setzt sich zusammen aus einem Anfangs- oder Nullwert addiert mit dem Verzögerungszeitinkrement ΔT_V oder einem Vielfachen davon. Für jeden stufenweise konstant gehaltenen Wert der Triggerverzögerung ergibt sich ein Messpunkt. Innerhalb einer Aufnahme eines Messpunktes kann beispielsweise die beschriebene Mehrfachbeschichtung stattfinden, so dass die Integration erst zum Schluss dieser Mehrfachbelichtung erfolgt.

In Figur 5 ist weiterhin erkennbar, dass ein Spannungswert aus einem der beiden verwendeten unmittelbar aufeinander folgenden Integrationsfenster negativ gesetzt wird, so dass die Funktion einen Nulldurchgang aufweist. Mit dem Bezugszeichen n_0 wird die Nummer des Verzögerungsschrittes vor dem Nulldurchgang bezeichnet. In der in Figur 5 angeführten Gleichung für den Pixelabstand d , der Abstand zwischen Objekt und Sensor, ist der Wert n_0 enthalten. Der Nulldurchgang der in Fi-

gur 5 dargestellten Funktion wird also in der Regel über ein Interpolationsverfahren ermittelt. Bei gleichzeitiger Betrachtung der Figuren 4 bis 7 werden die zeitlichen Eckwerte der Integrationsfenster 21, 22 durch die Zeitpunkte T_1 , T_2 und T_3 genannt und verdeutlicht. Für das erste Integrationsfenster 21 gilt, dass dieses bei T_1 geöffnet und bei T_2 geschlossen wird. Das zweite Integrationsfenster 22 wird bei T_2 geöffnet und bei T_3 geschlossen. Die Figuren 6 und 7 beziehen sich jeweils auf eine einzige von einer Vielzahl von Photodioden, die in einem optoelektronischen Chip jeweils für einen Bildpunkt empfangene Lichtimpulse aufnehmen und weiterleiten. Die Kurzzeitintegration über unmittelbar aufeinanderfolgende gleichlange Zeitfenster ist verbunden mit der empfangsseitigen Triggerverzögerung, die stufenweise insbesondere um gleiche Beträge anwächst. Bei jeder zeitweise konstanten Triggerverzögerung geschieht mindestens eine Belichtung und eine Integration bezogen auf ein Zeitfenster. Bei jeder Stufe mit konstanter Triggerverzögerung sind insbesondere Mehrfachbelichtungen vorgesehen. Die Detektion des Triggerverzögerungswertes der über die Auswertung mittels Lichtlaufzeit in einen Abstandswert umgerechnet werden kann, geschieht durch stufenweises Überstreichen eines empfangenen Lichtimpulses durch die beiden unmittelbar aufeinanderfolgenden Integrationsfenster 21, 22. Die Auswertung erfolgt zweckmäßigerweise nach der Digitalisierung der analogen Spannungssignalwerte. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der absolut identischen Integration innerhalb der beiden Zeitfenster. Die Beleuchtung kann aus unterschiedlichen Laserimpulsen herrühren, deren Verlauf geringfügig voneinander abweichen kann.

30

In der Figur 6 eine Auswerteschaltung dargestellt, die vom Aufbau her eine parallele Auswertung ermöglicht. Jedem Integrationsfenster ist ein jeweils baugleicher Integrator zugeordnet. Die sich ergebenden Signale werden jeweils über eine Zwischenspeichereinheit SH auf einen Differenzverstärker gelegt, wodurch ein Differenzbild erzeugbar ist. Nachdem sich die zeitlichen Integrationsbereiche bei der Messung jedoch

35

aneinander reihen, werden zeitlich versetzte Integrationen vorliegen. So wird in der Sektion A der zeitliche Rahmen von T_1 bis T_2 entsprechend dem ersten Integrationsfenster 21 berücksichtigt und in der Sektion B im entsprechenden Zeitraum von T_2 bis T_3 der Rahmen des Integrationsfensters 22.

Die Figur 7 zeigt den gleichen Verfahrensgrundsatz, wobei jedoch die Ausgestaltung der Photodiode eine parallele Integration ermöglichen. Die Photodiode ist in zwei getrennte Sektionen eingeteilt, so dass jede Sektion die gleiche optische Intensität empfängt. Besonders gut geeignet hierzu sind Rautenmuster, wie sie in Figur 7 dargestellt sind. Die Trennung der Photodiode in zwei Einzelphotodioden bewirkt, dass die beiden Integrationen vollkommen ohne Wechselwirkungen ablaufen. Die Schaltung entsprechend Figur 7 ermöglicht somit die parallele Auswertung von zwei auf sämtlichen Photodioden jeweils vorhandenen Sektionen, die jeweils einem Integrator zugeführt werden. Die eine zeitliche Integration bezieht sich wiederum auf das erste Integrationsfenster 21 im Zeitrahmen von T_1 bis T_2 und die zweite Integration bezieht sich auf das zweite Integrationsfenster in der Zeit von T_2 bis T_3 . Die weitere Auswertung geschieht in gleicher Weise wie sie in Figur 6 dargestellt wird.

Mit einem Verfahren entsprechend der Erfindung können Messgenauigkeiten in Bezug auf die Entfernungsmessung relativ zum Stand der Technik dreifach verbessert werden. Die bis dahin notwendige Laserleistung kann um den Faktor 10 verringert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Aufnahme eines dreidimensionalen Abstandsbildes eines Objektes anhand von Lichtlaufzeitmessungen, für die Lichtimpulse (1) von einer Lichtquelle auf eine Objekt-
5 oberfläche gesendet und zurückreflektierte Lichtimpulse (3) mittels eines Fotodetektors mit Kurzzeitintegration empfangen werden, sowie der Objektpunkt-
abstand (d) jeweils aus der Lichtlaufzeit (T_0) von Lichtimpulsen berechnet wird, wobei
- 10 - ein für den Start eines Lichtimpulses (1) erzeugtes Triggersignal zugleich empfangsseitig mit einer schrittweise in Zeitinkrementen (ΔT_V) ansteigenden Triggerverzögerung (T_V) zum Öffnen von mindestens einem Integrationsfenster (2,21,22) zum Empfang zurückreflektierter Lichtimpulse (3)
15 angewandt wird und
- bei jeder vorgegebenen Triggerverzögerung (T_V) eine Mehrfachbelichtung mit für jede Belichtung geöffnetem Integrationsfenster zur kumulierten Integration der reflektierten Lichtimpulse (3) durchgeführt wird.
- 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem
- das Triggersignal empfangsseitig zum wiederholten Öffnen eines einzigen Integrationsfensters (2) zum Empfang zurückreflektierter Lichtimpulse (3) verwendet wird,
- 25 - ein jeweiliger Abstand (d) eines Objektpunktes bei Erreichen eines Maximalwertes der integrierten Spannung (U) aus der zugehörigen Triggerverzögerung (T_V), die annähernd gleich der Lichtlaufzeit (T_0) ist, errechnet wird.
- 30
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die zeitliche Länge eines Integrationsfensters (2) gleich der Dauer eines Lichtimpulses (1,3) ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem
- das Triggersignal empfangsseitig zum wiederholten Öffnen eines ersten Integrationsfensters (21) mit einem unmittelbar darauf folgenden zweiten Integrationsfenster (22) zum jeweiligen Empfang zurückreflektierter Lichtimpulse (3) verwendet wird,
 - die Kurzzeitintegration für die beiden Integrationsfenster (21,22) parallel oder seriell mit gleicher Integrationszeit (T_1) durchgeführt wird,
 - 10 - die Dauer der Lichtimpulse (3) relativ zur Integrationszeit (T_1) klein ist und
 - ein jeweiliger Abstand (d) eines Objektpunktes berechenbar ist, wenn ein Lichtimpuls (3) auf der gemeinsamen Grenze zwischen erstem und zweitem Integrationsfenster (21,22) positioniert ist und gleiche Beträge der integrierten zu 15 den beiden Integrationsfenstern (21,22) jeweils zugehörigen Spannungen (U) vorliegen, wobei die korrespondierende der Lichtlaufzeit (T_0) entsprechende Triggerverzögerung (T_v) in den Abstandswert (d) umgerechnet wird.
- 20 5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei anstelle des Vergleiches der Beträge der integrierten Spannungen (U) eine Spannung negativ angetragen wird und der Nulldurchgang zwischen beiden, den hintereinandergeschalteten Integrationsfenstern zugeordneten Spannungen detektiert wird.
- 25 6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, bei dem als Sensorelemente eingesetzte Photodioden in sich in zwei getrennte Sektionen unterteilt sind, wobei jede Sektion die gleiche optische Intensität empfängt.
- 30 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei stark unterschiedlicher Reflektivität eines Objektes oder einzelner Objektpunkte die Anzahl der Mehrfachbelichtungen so

gewählt wird, dass für möglichst viele Objektpunkte die integrierten Intensitätswerte nahe dem Sättigungsbereich liegen.

- 5 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Beleuchtung das Licht eines Lasers oder einer Laserdiode verwendet wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
10 für den ersten empfangsseitigen Lichtimpuls (3) einer Bildaufnahme die Triggerverzögerung gleich Null ist.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
15 die zeitliche Länge eines Integrationsfensters (2) konstant ist.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Triggerverzögerung inkrementenweise weniger als 0,25 Nanosekunden beträgt.
20
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Bestimmung von Maximalwerten bzw. von Nulldurchgängen der Spannung (U) Interpolationsverfahren eingesetzt werden.
- 25 13. Verfahren nach Anspruch 12, wobei Interpolationsverfahren auf der Basis von quadratischen Polynomen oder Splin-Funktionen eingesetzt werden.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
30 zur Auswertung von Spannungswerten ein Vergleich mit einer vorab gespeicherten Referenzkurve mit bekanntem Abstand (d) durchgeführt wird.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
35 die Triggerverzögerung (T_v) durch Verwendung von programmierbaren Verzögerungsleitungen geschieht.

16. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens entsprechend einem der Ansprüche 1-3 oder 7-15 bestehend aus:

- einer Lichtimpulsbeleuchtung mit einer einzigen Lichtquelle zur Beleuchtung einer Objektoberfläche,
- 5 - einem CMOS-Sensor mit einer Vielzahl von Sensorpunkten als Fotodetektor mit pixelweiser Kurzzeitintegration,
- einer Kontroll- und Verarbeitungseinheit, die zumindest die sendeseitige und empfangsseitige Triggerung steuert und die Berechnung der Abstandswerte aus den Spannungssignalen (U) durchführt,
- 10 - einer Verzögerungsleitung zwischen der Kontroll- und Verarbeitungseinheit und dem CMOS-Empfangssensor zur Bereitstellung einer schrittweise einstellbaren Triggerverzögerung und
- 15 - jeweiligen Triggerzuleitungen zu der Lichtimpulsbeleuchtung und zu dem CMOS-Empfangssensor.

17. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens entsprechend einem der Ansprüche 1 oder 4-15, bestehend aus:

- 20 - einer Lichtimpulsbeleuchtung mit einer einzigen Lichtquelle zur Beleuchtung einer Objektoberfläche,
- einem CMOS-Sensor mit einer Vielzahl von Sensorpunkten als Fotodetektor mit pixelweiser Kurzzeitintegration,
- einer Kontroll- und Verarbeitungseinheit, die zumindest die sendeseitige und empfangsseitige Triggerung steuert und die Berechnung der Abstandswerte aus den Spannungssignalen (U) unter Einsatz eines Differenzverstärkers durchführt,
- 25 - einer Verzögerungsleitung zwischen der Kontroll- und Verarbeitungseinheit und dem CMOS-Empfangssensor zur Bereit-

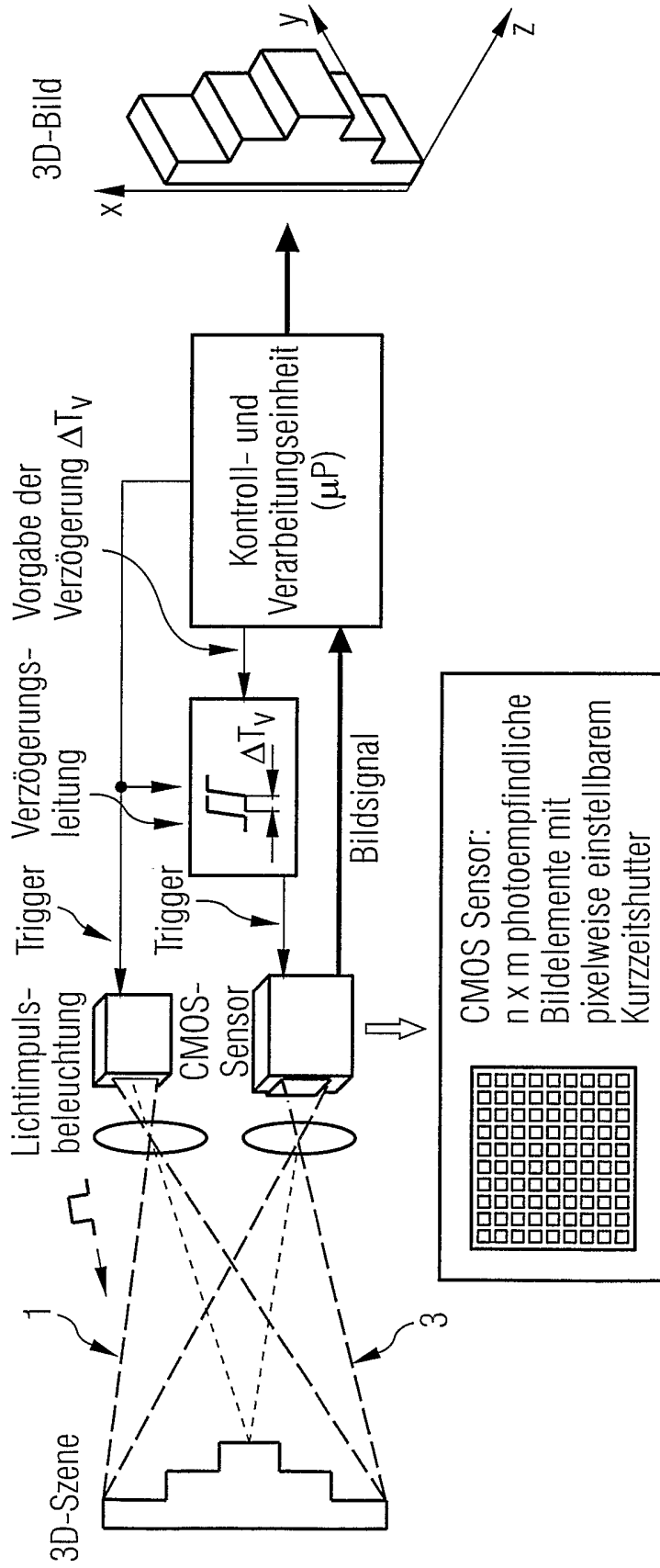
stellung einer schrittweise einstellbaren Triggerverzögerung und

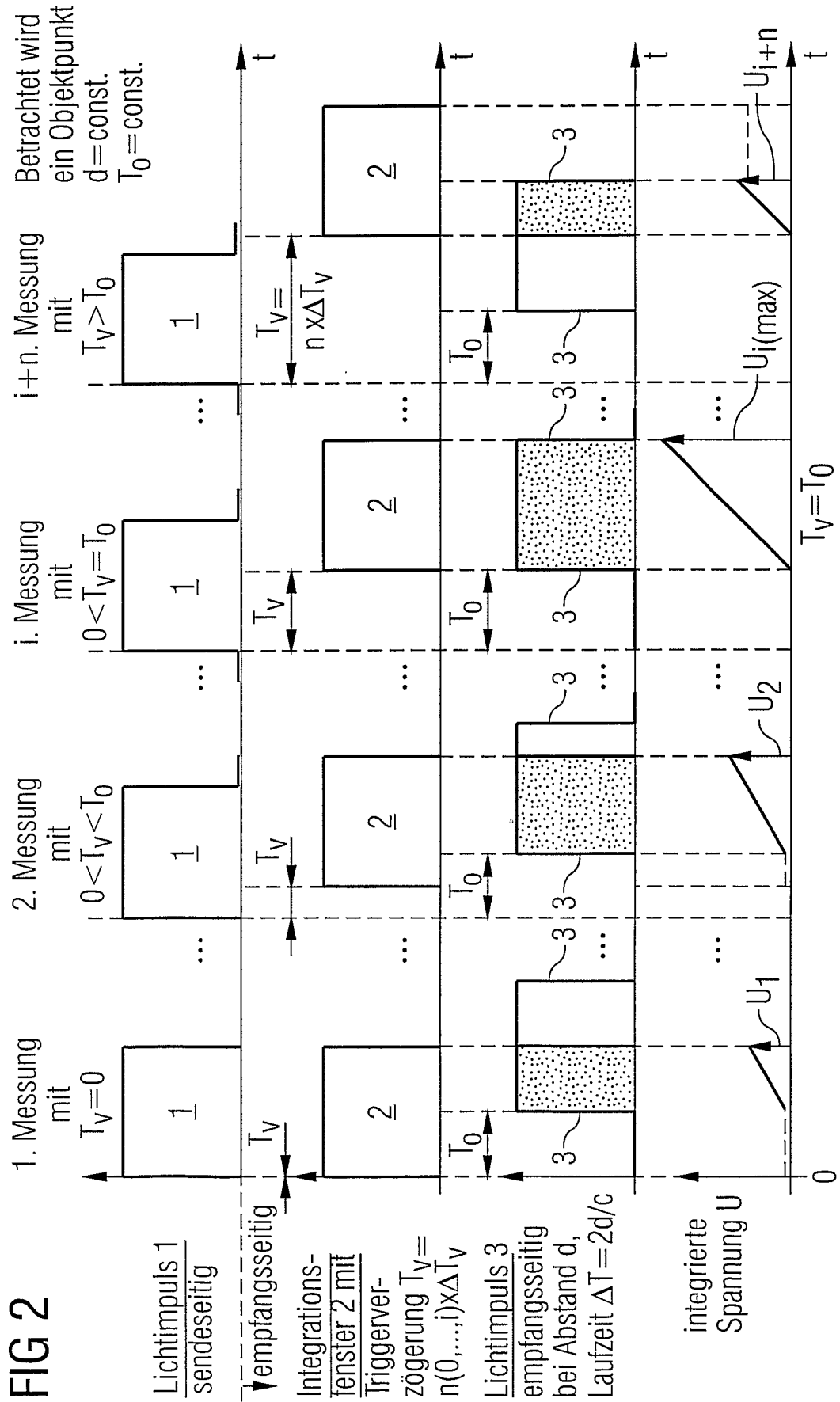
- jeweiligen Triggerzuleitungen zu der Lichtimpulsbeleuchtung und zu dem CMOS-Empfangssensor.

5 18. Vorrichtung nach Ansprüche 16-17, bei der die Kontroll- und Verarbeitungseinheit zumindest teilweise in der elektronischen Einheit des CMOS-Empfangssensor integriert ist.

10 19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16-18, bei der die Spannungswerte von Photodioden parallel oder seriell Integratoren zugeführt werden, anschließend in Zwischenspeichereinheiten gespeichert optional einem Differenzverstärker und dann einer Verarbeitungseinheit zugeführt werden.

FIG 1





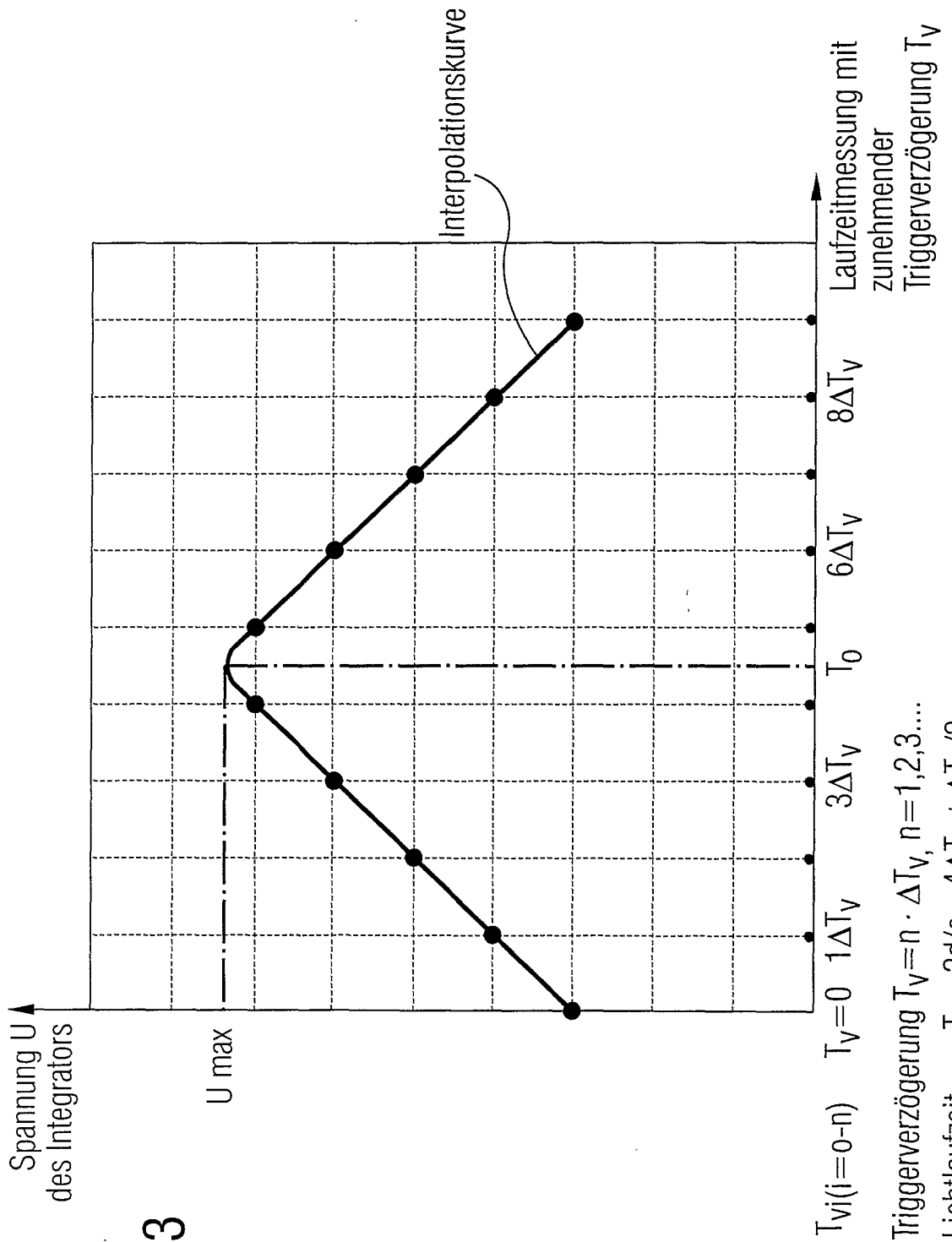


FIG 3

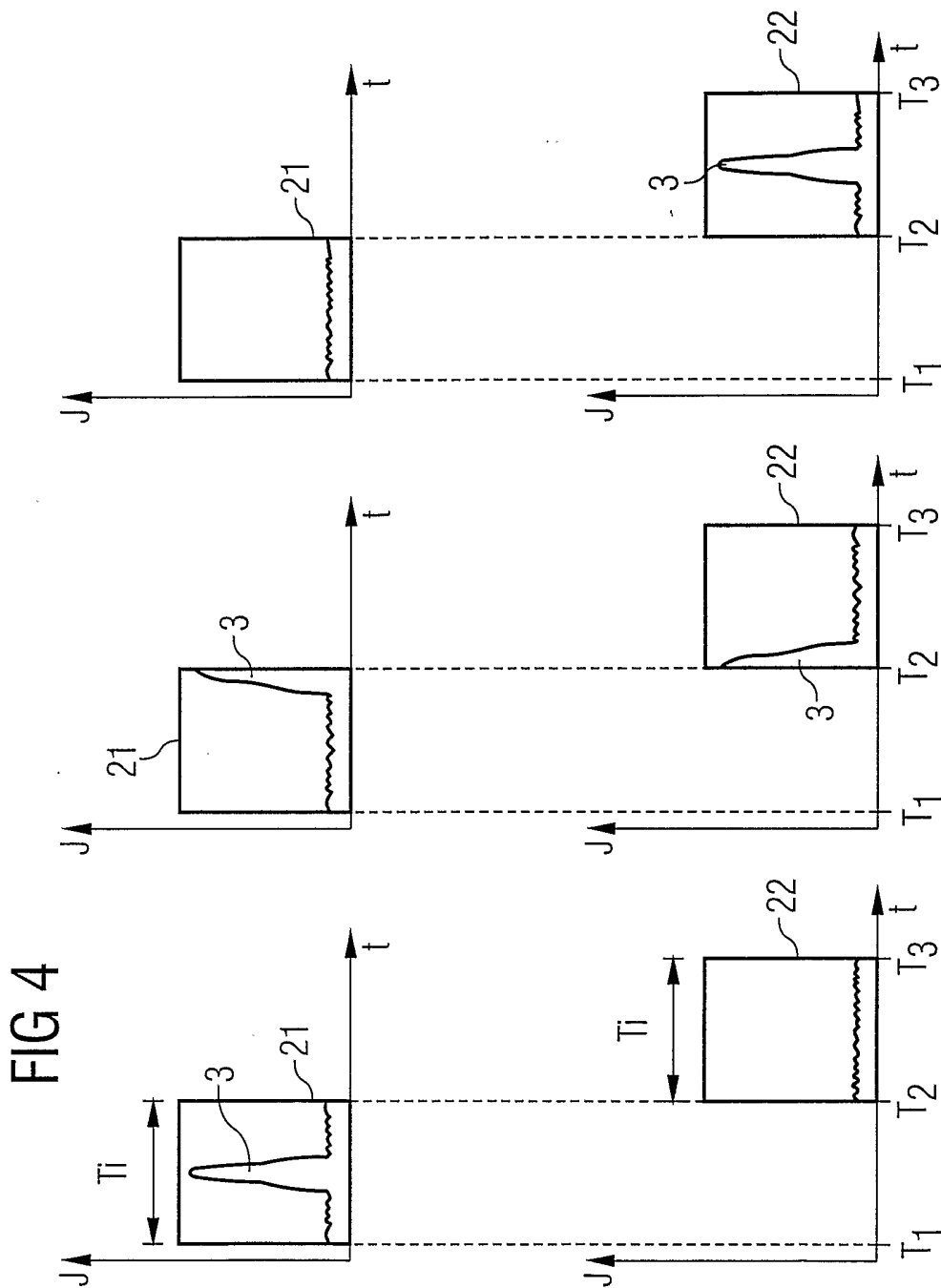
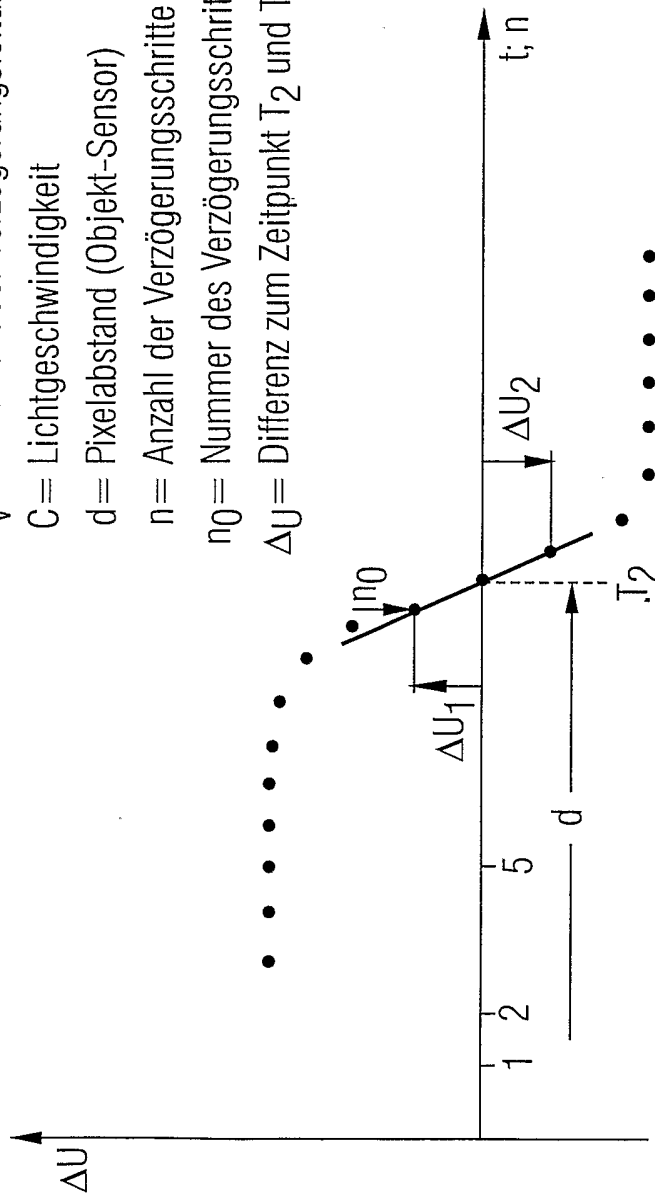


FIG 5

- $T_{Vn} = n \cdot \Delta T_V$
- $T_V(n) =$ Triggerverzögerung mit $n=0,1,2,\dots,i$
- $\Delta T_V =$ Inkrement der Verzögerungsleitung
- $C =$ Lichtgeschwindigkeit
- $d =$ Pixelabstand (Objekt-Sensor)
- $n =$ Anzahl der Verzögerungsschritte
- $n_0 =$ Nummer des Verzögerungsschrittes vor dem Nulldurchgang
- $\Delta U =$ Differenz zum Zeitpunkt T_2 und T_3



$$d = n_0 \cdot \Delta T_V \cdot C \left(1 + \frac{\Delta U_1}{\Delta U_1 + \Delta U_2} \right)$$

