



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 013 099.1**
 (22) Anmeldetag: **03.09.2014**
 (43) Offenlegungstag: **03.03.2016**

(51) Int Cl.: **G01S 17/10 (2006.01)**
G01S 17/89 (2006.01)
G01S 7/486 (2006.01)

(71) Anmelder:
Basler Aktiengesellschaft, 22926 Ahrensburg, DE

(72) Erfinder:
Kunze, Jörg, Dr., 22926 Ahrensburg, DE

(74) Vertreter:
**Prüfer & Partner mbB Patentanwälte
 Rechtsanwalt, 81479 München, DE**

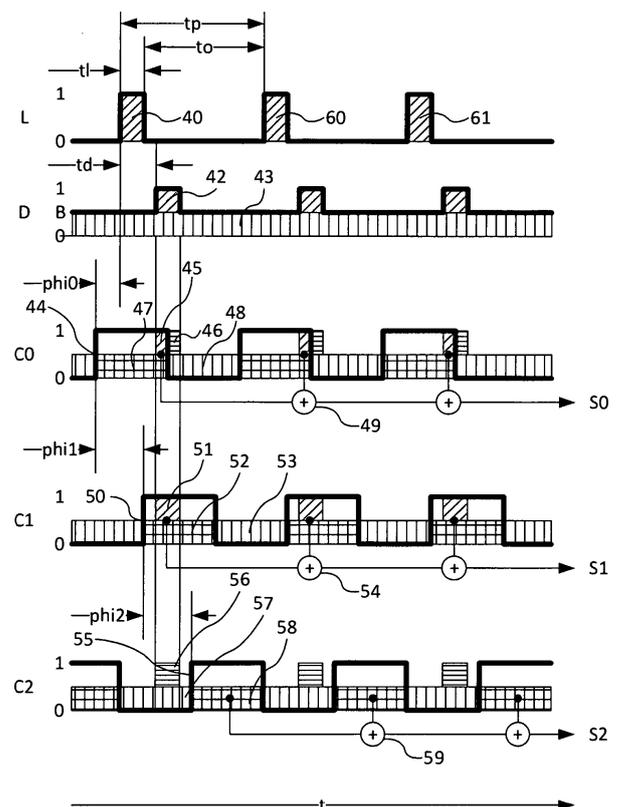
(56) Ermittelter Stand der Technik:
US 7 554 652 B1
US 2001 / 0 046 317 A1
US 2006 / 0 197 937 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur vereinfachten Erfassung eines Tiefenbildes**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Steuerung einer Lichtlaufzeitkamera, bei der eine Entfernungsinformation für ein dreidimensionales Bild aus einem Laufzeitunterschied oder einer Phasenverschiebung zwischen einem von einer Lichtquelle der Laufzeitkamera emittierten Lichtsignal (L) und einem von einem Bildsensor der Laufzeitkamera durch Streuung oder Reflexion des emittierten Lichtsignals (D) empfangen Lichtsignal ermittelt wird. Es werden zumindest drei Subbilder aufgenommen. Dabei wird zumindest ein Lichtpuls ausgesendet und eine Verschlusseinrichtung (Shutter) wird mittels zumindest dreier Steuersignale (C0, C1, C2) so getaktet, dass die Phasenverschiebung zwischen Lichtimpuls und Shutter durch die verschiedenen Phasenlagen der Steuersignale zwischen den Subbildern variiert wird. Dadurch werden pro Pixel drei Messwerte (S0, S1, S2) erhalten. Diese können einem Operator zugeführt werden, der analog zu einem Hue-Operator aufgebaut ist und einen Drehwinkel um die Raumdiagonale des S0-S1-S2-Raumes ermittelt. Mittels einer Proportionalitätskonstante kann dieser dann in die Entfernungsinformation umgerechnet werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Erfassung eines dreidimensionalen Tiefenbildes basierend auf einer Bildinformation aus einem Bildsensor mit ein- oder zweidimensionaler Bildpunktanordnung.

[0002] Zum elektronischen Erfassen von Bildern werden heutzutage meist digitale Kameras eingesetzt. Eine solche digitale Kamera ist beispielsweise in der US4131919A und in der EP2367360A2 beschrieben und wird hier nachfolgend als konventionelle digitale Kamera bezeichnet. Mit Hilfe konventioneller digitaler Kameras werden Helligkeitsbilder aufgenommen. In einem solchen Helligkeitsbild sind den Pixeln Helligkeitswerte zugeordnet.

[0003] Fig. 1 zeigt einen schematischen Aufbau einer konventionellen Digitalkamera **10**, die eine aus Objekten **17** bestehende Szene **11** aufnimmt, indem das Bild mittels einer Optik **12**, z. B. mittels eines Objektivs, auf mindestens einen Bildsensor **13** abgebildet wird, dessen Signale von einer elektronischen Bildverarbeitungseinrichtung **14** in ein digitales Bild gewandelt werden, das mittels einer Schnittstelle **15** über eine Signalübertragungsleitung **16** ausgegeben wird. Dabei ist es möglich, dass in der elektronischen Bildverarbeitungseinrichtung **14** zuvor eine Speicherung erfolgt oder dass die Signalübertragungsleitung **16** zu einem Speichermedium (nicht gezeigt) führt, in dem das Bild gespeichert wird.

[0004] Fig. 2 zeigt einen schematischen Aufbau eines Bildsensors **170** für konventionelle Kameras, der nachfolgend als konventioneller Bildsensor bezeichnet wird. Solche Bildsensoren bestehen meist aus einer periodischen Anordnung von Bildpunkten **171** (nachfolgend als Pixel bezeichnet). Vorwiegend eindimensionale Anordnungen werden als Zeilensensoren und vorwiegend zweidimensionale Anordnungen werden als Flächensensoren bezeichnet. Bei dem in Fig. 2 gezeigten Bildsensor handelt es sich somit um einen Flächensensor mit konventionellen Pixeln **171**. Unabhängig von der Technologie ist den Pixeln **171** dabei gemeinsam, dass sie jeweils einen lichtempfindlichen Bereich **172**, typischerweise eine Photodiode (PD) oder eine sogenannte Pinned-Photo-Diode (PPD) aufweisen, welche so ausgestaltet ist, dass sie während einer Belichtungszeit in Abhängigkeit des einfallenden Lichts eine elektrische Größe erzeugt, die ein Maß für die Menge des von dem betreffenden Pixel empfangenen Lichts darstellt. Diese elektrische Größe kann eine Ladung, eine Spannung, ein Strom oder auch ein zeitcodiertes Signal, wie beispielsweise eine Impulsfolge, sein.

[0005] Häufig sind solche Bildsensoren als sogenannte ladungsgekoppelte Anordnung (Charge-Coupled Device, CCD) aufgebaut, wie beispielsweise in

der US4194213A beschrieben. Eine besondere Form von CCDs bilden die sogenannten Zwischenzeilen-Verschiebungs-CCDs (Interline-Transfer-CCDs), die beispielsweise in der US4656519A oder in der EP2150039A1 erläutert werden.

[0006] Eine aktuellere Technologie bilden die sogenannten Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) Bildsensoren. Diese verfügen heutzutage zumeist über aktive Pixel, wie sie beispielsweise in der US5471515A beschrieben werden. Es sind zahlreiche verschiedene Schaltkreise für aktive Pixel für CMOS-Bildsensoren bekannt, unter anderem solche, die einen rollenden elektronischen Verschluss, einen sogenannten Electronic Rolling Shutter (ERS) aufweisen. Ein Schaltkreis für einen solchen Pixel ist in der US5841126 gezeigt. Andere aktive Pixel können einen sogenannten Global Shutter (GS) bilden, wie beispielsweise in der US6667768 offenbart ist. Hier werden Pixel für konventionelle Bildsensoren ungeachtet der Technologie, in der sie ausgeführt sind, also CCD oder CMOS, als konventionelle Pixel bezeichnet.

[0007] In GS-Pixeln gibt es darüber hinaus typischerweise einen Signalspeicher **173**, wie in Fig. 2 gezeigt, in dem Ladungen oder Spannungen gespeichert werden können. Oftmals handelt es sich dabei in CMOS-Pixeln um eine sogenannte Floating Diffusion (FD), während die Speicherung der Ladung in CCDs häufig in sogenannten Metal-Oxide Semiconductor (MOS) Dioden erfolgt.

[0008] Es gibt in Bildsensoren für konventionelle Kameras auch solche Pixel, die mit mehr als einem Signalspeicher ausgestattet sind, beispielsweise um eine sogenannte korrelierte Doppelabtastung (Correlated Double Sampling, CDS) auszuführen, oder um einen erweiterten Dynamikbereich (HDR) zu erzielen. Ein Beispiel dazu ist in der US2012/0193516A offenbart.

[0009] Den vorgenannten Pixelarchitekturen gemäß Fig. 2 ist gemeinsam, dass es jeweils nur höchstens einen Signalweg **174** gibt, mit dem die elektrische Größe vom lichtempfindlichen Bereich zu dem mindestens einen zugehörigen Signalspeicher übertragen wird, sofern dieser von dem lichtempfindlichen Bereich baulich getrennt ist. In manchen Fällen, wie beispielsweise in der US6667768 ist der lichtempfindliche Bereich zwar noch über einen Steuerweg **175** an einen elektrischen Verschluss angeschlossen, beispielsweise an einen sogenannten Rücksetz-Transistor (Reset-Transistor), jedoch bildet dieser Steuerweg **175** keinen zweiten Signalweg zu einem Signalspeicher, sondern verbindet den lichtempfindlichen Bereich lediglich mit einer Versorgungsspannung, damit die Ladung außerhalb der Belichtungszeit aus dem Pixel entfernt wird.

[0010] Es gibt einfarbige Kameras, die als monochrom bezeichnet werden. Monochrome Kameras verfügen nicht über die Fähigkeit, bei der Bildaufnahme zwischen verschiedenen Farben zu unterscheiden. Daneben gibt es auch Farbkameras, die eine solche Unterscheidung zwischen verschiedenen Farben erkennen können. Beispielsweise können sie einen Bildsensor verwenden, der einen sogenannten Mosaikfilter mit verschiedenen Farben aufweist, wie er in der US3971065 beschrieben ist.

[0011] Weiterhin gibt es dreidimensionale (3D) Kameras, die sogenannte Entfernungsbilder oder Tiefenbilder erzeugen bei denen den Pixeln Entfernungswerte zugeordnet werden, die ein Maß für die Entfernung zwischen der Kamera und dem Objekt darstellen.

[0012] Dabei ist es möglich, dass die Tiefenbilder direkt ausgegeben werden, oder dass intern weitere Verarbeitungsschritte erfolgen, beispielsweise das Erzeugen sogenannter Punktwolken aus 3D-Koordinaten oder die Interpretation der Tiefenbilder beispielsweise als Geste einer Hand.

[0013] In letzter Zeit werden vermehrt dreidimensional aufnehmende Lichtlaufzeitkameras angeboten, die eine lichtlaufzeitbasierte Entfernungsmessung vornehmen und als Time-of-Flight-Kameras (TOF-Kameras) bezeichnet werden, wie beispielsweise in der DE 10 2011 089 636 A1 offenbart.

[0014] Fig. 3 zeigt einen schematischen Aufbau einer ToF-Kamera **20**, die eine Synchronisationseinheit **21** aufweist, welche eine elektronische Steuereinrichtung **22** für eine Lichtquelle **23** mittels eines Steuersignals **33** dergestalt ansteuert, dass diese Lichtquelle **23** zeitlich moduliertes Licht oder Lichtimpulse aussendet. Die ausgesandten Lichtstrahlen **34** und **36** werden von Objekten **25** und **26** gestreut oder reflektiert und gelangen teils als Objektlichtstrahlen **35** und **37** zurück zur Kamera, wobei sie verzögert werden, da sie die notwendige Strecke mit etwa Lichtgeschwindigkeit zurücklegen. Dort werden sie mit einer Optik **27**, z. B. mit einem Objektiv, auf den Bildsensor **28** abgebildet. Der Bildsensor **28** wird seinerseits mittels eines Ansteuersignals **32** von der Synchronisationseinheit **21** so angesteuert, dass er eine Demodulation der Objektlichtstrahlen vornimmt. Aus den vom Bildsensor **28** gelieferten Rohdaten werden dann in einer Recheneinheit **29** Tiefenbilder erzeugt, die über eine Schnittstelle **30** an eine Übertragungsleitung **31** ausgegeben werden.

[0015] Solche ToF-Kameras verfügen häufig über besondere ToF-Bildsensoren zur Messung von Entfernungen, wie sie beispielsweise aus der DE19704496C2, der US8115158 oder der US20120176476A1 bekannt sind. Diese Bildsensoren arbeiten häufig mit Pixeln, die mit sogenannten

Photomischdetektoren (PMD) ausgestattet sind oder nach einem verwandten Prinzip arbeiten. Diese Pixel werden nachfolgend als Demodulationspixel bezeichnet und die Bildsensoren als Demodulationsensoren.

[0016] Fig. 4 zeigt einen schematischen Aufbau eines ToF-Demodulationssensors **180** mit Demodulationspixeln **282**. Solche Demodulationspixel **181** weisen die Gemeinsamkeit auf, dass darin jeweils ein lichtempfindlicher Bereich **182** vorhanden ist, der mit mindestens zwei verschiedenen Signalspeichern **183** und **184** über mindestens zwei verschiedene Signalwege **185** und **186** verbunden ist. Häufig ist in solchen Demodulationspixeln auch die Ausleseelektronik für die mindestens zwei Signalspeicher mehr als einmal pro Pixel vorhanden. Demodulationspixel werden überwiegend zusammen mit Lichtquellen verwendet, die im sogenannten Dauerstrichbetrieb („Continuous Wave“ (CW) Betrieb) arbeiten. Dabei kommt sehr häufig sinusförmig moduliertes Licht zum Einsatz oder Licht mit einem Puls-Pausen-Verhältnis von ca. 50%.

[0017] Solche Bildsensoren mit Demodulationspixel werden speziell für ToF-Anwendungen hergestellt. Sie sind im Allgemeinen aufwändiger und damit teurer als vergleichbare konventionelle Bildsensoren oder sie weisen bei gleichem Preis weniger Pixel und somit eine geringere räumliche Auflösung auf. Ein Grund dafür liegt darin, dass Demodulationspixel für ihre charakteristische Mehrzahl an Signalwegen eine aufwändigere Elektronik benötigen, als konventionelle Pixel. Dadurch weisen sie gegenüber den konventionellen Pixeln einen erhöhten Platzbedarf auf, der zu einem höheren Ressourcenbedarf, beispielsweise an Chipfläche, führt. Weiterhin sinkt dadurch bei einem Demodulationspixel gegenüber einem konventionellen Pixel der für den lichtempfindlichen Bereich zur Verfügung stehende Flächenanteil an der Gesamtfläche des Pixels. Dadurch sind konventionelle Pixel im Allgemeinen lichtempfindlicher als Demodulationspixel. Schließlich werden derzeit konventionelle Bildsensoren in weit höherer Stückzahl produziert als ToF-Bildsensoren, woraus sich ein weiterer Preisvorteil für die konventionellen Bildsensoren ergibt. Aus diesen Gründen wäre es vorteilhaft, konventionelle Bildsensoren mit konventionellen Pixeln auch für ToF-Kameras bereitstellen zu können.

[0018] Die konventionellen Pixel in konventionelle Bildsensoren weisen hingegen, wie oben erwähnt, meist nur einen Signalweg und häufig auch nur einen Signalspeicher auf. Auch mit solchen Bildsensoren können jedoch grundsätzlich ToF-Entfernungsbilder aufgenommen werden.

[0019] Aus der US5081530 ist ein Verfahren bekannt, bei dem ein ToF-Bild mit einem konventionellen Interline-CCD (ILCCD) Bildsensor aufgenommen

wird. Dieses Verfahren weist jedoch den Nachteil auf, dass es nur bei dunklen Szenen ohne Umgebungslicht anwendbar ist (abgesehen vom Pulslicht). Ursache dafür ist, dass die in dem CCD gesammelte Elektronenzahl N_1 und N_2 durch das Umgebungslicht um die Zahl NU additiv erhöht werden, also zu $N_1 + NU$ und $N_2 + NU$, sodass dann die Entfernung unter Verwendung der Formel $R/2 \cdot (N_1 - N_2) / (N_1 + N_2) + R/2$ fälschlicherweise als $R/2 \cdot (N_1 - N_2) / (N_1 + N_2 + 2 \cdot NU) + R/2$ berechnet wird. Die mit dem Umgebungs- oder Hintergrundlicht verbundene Problematik wird beispielsweise in der DE19704496C2 als Gleichanteil und in der EP1040366B1 als Umgebungslicht diskutiert. Weiterhin erfordert die Tatsache, dass in der US5081530A nur ein einziger Lichtimpuls pro Bild verwendet wird, eine sehr leistungsstarke und somit auch teure Pulslichtquelle.

[0020] Ein weiteres Verfahren zum Aufnehmen eines ToF-Bilds mittels eines konventionellen CMOS-Bildsensors ist aus der EP1040366B1 bekannt. Hier wird unter anderem vorgeschlagen, zur Ermittlung eines Entfernungsbildes drei verschiedene Rohbilder (dort als Sensorsignale bezeichnet) aufzunehmen, nämlich ein erstes Bild mit Dunkelstrom und Umgebungslicht, ein zweites Rohbild, bei dem abhängig von der Lichtlaufzeit ein Teil des empfangenen Lichts integriert wird, und ein drittes Signal mit einer höheren Integrationszeit. In einer anderen Ausführungsform werden Dunkelstrom und Umgebungslicht zweimal aufgenommen, nämlich mit kurzer und mit langer Integrationszeit.

[0021] Darüber hinaus gibt es auch konventionelle Bildsensoren mit Pixeln, die nicht mehr als einen Signalweg, jedoch mehr als einen Signalspeicher, aufweisen. Ein Beispiel für eine solche Pixelarchitektur findet sich beispielsweise für einen CCD-Bildsensor in der US8576319A und für einen CMOS Bildsensor in der EP2109306A2.

[0022] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Lichtlaufzeitkamera bereitzustellen, welche Tiefendaten mit hoher Messqualität und hoher Bildauflösung liefern kann.

[0023] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Vorrichtung nach Anspruch 1, eine Lichtlaufzeitkamera nach Anspruch 9, ein Verfahren nach Anspruch 13 und ein Computerprogramm nach Anspruch 14.

[0024] Dementsprechend werden die Lichtquelle der Lichtlaufzeitkamera zur Abgabe von zumindest einem Lichtimpuls und der Bildsensors zur Demodulation des empfangenen Lichtsignals mittels einer jedem Bildpunkt des Bildsensor zugeordneten elektrischen Verschlusseinrichtung gesteuert, wobei die elektrische Verschlusseinrichtung mindestens dreimal mit fester Phasenbeziehung zu dem zumindest einen

Lichtimpuls getaktet (d. h. geöffnet und geschlossen) wird, um mindestens drei Signale zu erfassen, wobei die zeitliche Dauer des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung jeweils gleich ist, und wobei die Phasenverschiebung zwischen dem ersten Öffnen und dem zweiten Öffnen gleich der Phasenverschiebung zwischen dem zweiten Öffnen und dem dritten Öffnen ist. Es werden also zumindest drei Subbilder aufgenommen, wobei die Verschlusseinrichtung (Shutter) so getaktet ist, dass die Phasenverschiebung zwischen Lichtimpuls und Shutter durch die verschiedenen Phasenlagen der Taktung zwischen den Subbildern variiert wird. Dadurch werden pro Bildpunkt drei Messwerte erhalten. Diese können einem Operator zugeführt werden, der bspw. analog zu einem Hue-Operator aufgebaut sein kann und einen Drehwinkel um die Raumdiagonale des SO-S1-S2-Raumes ermittelt. Mittels einer Proportionalitätskonstante kann dieser dann in die gewünschte Entfernungsinformation umgerechnet werden.

[0025] Somit kann durch die erfindungsgemäße Lösung eine Bildverarbeitung mit lediglich einem Signalpfad pro Bildpunkt des Bildsensors bereitgestellt werden, wodurch die herkömmlichen bildsensorabhängigen Vorteile der geringen Komplexität, der Rauschermut, der hohen lateralen Auflösung und der hohen Bildrate auch bei Lichtlaufzeitkameras beibehalten werden können.

[0026] Durch die erfindungsgemäße Möglichkeit der Verwendung konventioneller Bildsensoren in ToF-Kameras ist es möglich, mit ein und derselben Kamera sowohl konventionelle Bilder als auch Entfernungsbilder aufzunehmen.

[0027] Optional können auch Farbbildsensoren verwendet werden. Da üblicherweise die im Bayer-Pattern verwendeten Farbfilter für infrarotes Licht transparent sind, kann bei der heutzutage üblichen Verwendung einer infraroten Lichtquelle auch mit einem konventionellen Farbbildsensor ein Entfernungsbild aufgenommen werden. Dieses bietet den Vorteil, dass es dadurch möglich wird, mit ein und derselben ToF-Kamera sowohl Farbbilder als auch Entfernungsbilder aufzunehmen.

[0028] Vorzugsweise kann die Phasenverschiebung zwischen dem ersten Steuersignal und dem zweiten Steuersignal und die Phasenverschiebung zwischen dem zweiten Steuersignal und dem dritten Steuersignal in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses jeweils 120° betragen.

[0029] Gemäß einer ersten vorteilhaften Weiterbildung kann die Phasenverschiebung zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste der drei Steuersignale und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpul-

ses -60° betragen. Ferner kann die zeitliche Dauer der impulsförmigen Steuersignale für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° und die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 60° entsprechen. Hierdurch kann für die Impulslänge des Lichtimpulses ein besonders großer Entfernungsmessbereich erzielt werden. Unter Beibehaltung der vorgenannten Zeitverhältnisse kann bei einer Erhöhung der Periodendauer des Lichtimpulssignals eine vorteilhafte Vermeidung des unerwünschten Tiefenaliasing erreicht werden.

[0030] Gemäß einer zweiten vorteilhaften Weiterbildung kann die Phasenverschiebung zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste der drei Steuersignale und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses 0° betragen. Ferner kann die zeitliche Dauer der impulsförmigen Steuersignale für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 60° und die zeitliche Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entsprechen. Dies ermöglicht eine hohe Messqualität bei allerdings verkleinertem Messbereich. Auch hier kann unter Beibehaltung der vorgenannten Zeitverhältnisse bei einer Erhöhung der Periodendauer des Lichtimpulssignals eine vorteilhafte Vermeidung des unerwünschten Tiefenaliasing erreicht werden.

[0031] Gemäß einer dritten vorteilhaften Weiterbildung kann die Phasenverschiebung zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste der drei Steuersignale und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses 0° betragen, wobei aber hier die zeitliche Dauer der impulsförmigen Steuersignale für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° und auch die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entsprechen kann. Dies ermöglicht eine hohe Messqualität mit geringen nicht-linearen Fehlern. Wiederum kann unter Beibehaltung der vorgenannten Zeitverhältnisse bei einer Erhöhung der Periodendauer des Lichtimpulssignals eine vorteilhafte Vermeidung des unerwünschten Tiefenaliasing erreicht werden.

[0032] Gemäß einer vierten vorteilhaften Weiterbildung kann die Phasenverschiebung zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste der drei Steuersignale und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses 0°

betragen, wobei aber nunmehr die zeitliche Dauer der impulsförmigen Steuersignale für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 120° und auch die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 120° entspricht. Diese Modifikation der Phasenverhältnisse ermöglicht ein Ermitteln der Entfernung mit besonders geringem Rechenaufwand und damit verbundenen geringeren Ressourcen. Schließlich kann auch hier unter Beibehaltung der vorgenannten Zeitverhältnisse bei einer Erhöhung der Periodendauer des Lichtimpulssignals eine vorteilhafte Vermeidung des unerwünschten Tiefenaliasing erreicht werden.

[0033] Vorzugsweise kann die vorgeschlagene Lichtlaufzeitkamera eine Recheneinrichtung aufweisen zur Berechnung der Entfernungsinformation des dreidimensionalen Bilds anhand der Werte der drei Signale basierend auf einer Fallunterscheidung für verschiedene durch gegenseitige Größenverhältnisse der Werte der drei Signale festgelegte Bereiche. Die Recheneinrichtung kann vorteilhaft so ausgestaltet sein, dass die Gültigkeit der berechneten Entfernungsinformation anhand eines Verhältnisses zwischen Signalqualität und Rauschen bestimmt wird. Ergänzend oder alternativ kann die Recheneinrichtung so ausgestaltet sein, dass eine Entscheidung über die Gültigkeit der berechneten Entfernungsinformation anhand des Sättigungsgrades der drei Signale erfolgt.

[0034] Erfindungsgemäß ergibt sich gegenüber Lichtlaufzeitkameras mit Demodulationssensoren als weiterer Vorteil, dass für das ausgesendete Lichtsignal ein Puls-Pausenverhältnis verwendet werden kann, das kleiner oder sogar sehr viel kleiner als 50% ist. Dadurch ergibt sich eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht und somit eine verbesserte Messqualität. Dies ermöglicht Kameraanwendungen bei starkem Umgebungslicht, z. B. durch Sonnenlicht oder Studioscheinwerfer.

[0035] Die Komponenten der zur Lösung der vorgenannten Aufgabe vorgeschlagene Vorrichtung bzw. Lichtlaufzeitkamera können einzeln oder gemeinsam als diskrete Schaltkreise, integrierte Schaltkreise (z. B. Application-Specific Integrated Circuits (ASICs)), programmierbare Schaltkreise (z. B. Field Programmable Gate Arrays (FPGAs)) realisiert sein. Insbesondere die Recheneinheit kann durch ein FPGA als zentrales Bauteil realisiert sein. Ferner können die Schritte des Verfahrensanspruchs als Software-Programm oder Software-Routine zur Steuerung des Prozessors einer Computervorrichtung zu deren Ausführung realisiert sein.

[0036] Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Be-

zugnahme auf die Zeichnungsfiguren näher erläutert. Es zeigen:

[0037] Fig. 1 einen schematischen Aufbau einer konventionellen Digitalkamera;

[0038] Fig. 2 einen schematischen Aufbau eines konventionellen Bildsensors;

[0039] Fig. 3 einen schematischen Aufbau einer ToF-Kamera;

[0040] Fig. 4 einen schematischen Aufbau eines ToF-Demodulationssensors mit Demodulationspixeln;

[0041] Fig. 5(a)–(d) schematische Zeitdiagramme für eine ToF-Kamera gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;

[0042] Fig. 6(a)–(e) schematische Zeitdiagramme zur Erläuterung der Zeitsteuerung für Licht- und Steuersignale gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel;

[0043] Fig. 7(a) und (b) schematische Zeitdiagramme mit Signalverläufen und Entfernungsermittlung für das erste Ausführungsbeispiel;

[0044] Fig. 8 eine Formel zur Ermittlung der Entfernung in dem ersten Ausführungsbeispiel;

[0045] Fig. 9(a) und (b) Bahnkurven der S-Vektoren im S-Raum gemäß dem Stand der Technik bzw. gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel;

[0046] Fig. 10(a) und (b) Zeitdiagramme zur Erläuterung einer Verschiebung eines Messbereichs zu einer minimalen Entfernung;

[0047] Fig. 11 eine Formel zur Ermittlung der Entfernung d bei einem verschobenem Messbereich;

[0048] Fig. 12(a) und (b) Signalverläufe zur Erläuterung einer anderen Verschiebung eines Messbereichs zu einer minimalen Entfernung;

[0049] Fig. 13 eine Formel zur Ermittlung der Entfernung d bei einem weiter verschobenem Messbereich;

[0050] Fig. 14 ein Diagramm mit Signalverläufen unter Berücksichtigung des Abstandsgesetzes;

[0051] Fig. 15 eine Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens;

[0052] Fig. 16 eine Formel zur Bestimmung der Gültigkeit von Entfernungswerten;

[0053] Fig. 17 ein Diagramm zur Darstellung einer Approximation des Rauschens mittels einer vereinfachten Näherungsfunktion;

[0054] Fig. 18 ein Zeitdiagramm mit dem Signalverlauf eines idealen und eines realen Lichtimpulses;

[0055] Fig. 19 ein Diagramm mit dem Kurvenverlauf einer real gemessenen Entfernung in Abhängigkeit der Zeitdifferenz;

[0056] Fig. 20 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel;

[0057] Fig. 21(a) und (b) Diagramme mit resultierenden Signalverläufen gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel;

[0058] Fig. 22 eine Formel zur Ermittlung der Entfernung d bei dem zweiten Ausführungsbeispiel;

[0059] Fig. 23(a) und (b) Zeitdiagramme mit Spitzenwert und Mittelwert eines pulsfrequenzmodulierten Signals bei verschiedenen Pulswiederholraten;

[0060] Fig. 24 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel;

[0061] Fig. 25 eine Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens bei dem dritten Ausführungsbeispiel;

[0062] Fig. 26 eine Formel zur Bestimmung der Gültigkeit von Entfernungswerten des dritten Ausführungsbeispiels;

[0063] Fig. 27 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel;

[0064] Fig. 28 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel;

[0065] Fig. 29 Diagramme mit resultierenden Signalverläufen gemäß dem fünften Ausführungsbeispiel;

[0066] Fig. 30(a) und (b) eine Bahnkurve der S-Vektoren für das fünfte Ausführungsbeispiel aus zwei verschiedenen Blickrichtungen;

[0067] Fig. 31 eine Formel zur Ermittlung der Entfernung aus den Signalendes fünften Ausführungsbeispiels;

[0068] Fig. 32 einen Kurvenverlauf einer real gemessenen Entfernung in Abhängigkeit der Zeitdifferenz für das fünfte Ausführungsbeispiel;

[0069] Fig. 33 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel;

[0070] Fig. 34 Diagramme mit resultierenden Signalverläufen gemäß dem sechsten Ausführungsbeispiel;

[0071] Fig. 35 eine Formel zur Bestimmung der Entfernung im sechsten Ausführungsbeispiel;

[0072] Fig. 36 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem siebten Ausführungsbeispiel;

[0073] Fig. 37 Diagramme mit resultierenden Signalverläufen gemäß dem siebten Ausführungsbeispiel;

[0074] Fig. 38(a) und (b) eine Bahnkurve der S-Vektoren für das siebte Ausführungsbeispiel aus zwei verschiedenen Blickrichtungen;

[0075] Fig. 39 eine Formel zur Bestimmung der Entfernung im siebten Ausführungsbeispiel;

[0076] Fig. 40 eine Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens bei dem siebten Ausführungsbeispiel;

[0077] Fig. 41 Zeitdiagramme mit einer Zeitsteuerung gemäß einem achten Ausführungsbeispiel;

[0078] Fig. 42 Diagramme mit resultierenden Signalverläufen gemäß dem achten Ausführungsbeispiel; und

[0079] Fig. 43 eine Formel zur Bestimmung der Entfernung im achten Ausführungsbeispiel.

[0080] Gemäß den nachfolgenden Ausführungsbeispielen wird eine ToF-Kamera mit modifizierter und dadurch effektiverer Bildverarbeitung beschrieben.

[0081] Fig. 5(a) bis (d) zeigen Zeitdiagramme mit Signalverläufen zur Erläuterung einer Zeitsteuerung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel für den Betrieb einer ToF-Kamera gemäß Fig. 3 mit einem Bildsensor 28, der vorzugsweise ein konventioneller Bildsensor gemäß Fig. 2 ist. Dabei zeigt Fig. 5(a) die Zeitsteuerung für das Aussenden von Licht L von der Lichtquelle 23 in der Kamera 20 mit zwei verschiedenen Intensitätspegeln „0“ und „1“ über der Zeit t. Beispielsweise wird bei dem Pegel „1“ Licht ausgesendet und bei dem Pegel „0“ kein Licht ausgesendet. Dabei wird das Licht als zeitlich begrenzter Lichtimpuls 40 ausgesendet, der eine zeitliche Pulslänge t_l besitzt und mit einer Periode t_p nach einer Totzeit t_o optional als zweiter Lichtimpuls 60 und dritter Lichtimpuls 61, und so weiter, wiederholt wird. Zum vereinfachten Verständnis der Zeit- bzw. Phasenzusammenhänge wird hier die Periode t_p mit 360° gleichgesetzt. Im gezeigten Beispiel entspricht dann die Pulslänge t_l des Lichtsignals einem Phasenwert von 60° , denn $t_l = 1/6 \cdot t_p$ und entsprechend $t_o = 5/6 \cdot t_p$.

[0082] In der Kamera 20 gemäß Fig. 3 wird durch den Bildsensor 28 einfallendes Licht D detektiert. Der zugehörige Signalverlauf ist ebenfalls in Fig. 5(a) gezeigt. Ohne Einfluss des ausgesandten Lichtimpulses 40 besteht das einfallende Licht zunächst nur

aus dem Umgebungslicht 43 mit dem als konstant angenommenen Intensitätspegel B. Zu diesem Umgebungslicht addiert sich der einfallende Lichtimpuls 42, wodurch sich der gezeigte zeitliche Verlauf von D ergibt. Dieser hat zwischen Aussenden und Einfallen von der Lichtquelle 23 zu den Objekten 25, 26 und zurück zum Bildsensor 28 eine Strecke mit ungefähr Lichtgeschwindigkeit zurückgelegt und ist daher um eine Zeitdifferenz t_d verzögert. Weiterhin wird der Lichtimpuls 40 auch durch die Ausbreitung im Raum gemäß dem Abstandsgesetz und durch die unvollständige Reflektion am Objekt in seiner Intensität gemindert, so dass der empfangene Lichtimpuls 42 grundsätzlich weniger Intensität aufweist als der ausgesandte Lichtimpuls 40.

[0083] Gemäß Fig. 3 wird der Bildsensor 28 mittels des Ansteuersignals 32 von der Synchronisationseinheit 21 angesteuert, so dass er eine Demodulation der Objektlichtstrahlen vornimmt. Dieses Ansteuersignal 32 wird in den nachfolgenden Ausführungsbeispielen durch drei Steuersignale C0, C1 und C2 gebildet. Die Steuerung des Bildsensors 28 erfolgt dabei mittels eines elektrischen Verschlusses (Shutters) der eingangs genannten Art.

[0084] In Fig. 5(b) ist das erste Steuersignal C0 zur Steuerung des elektrischen Verschlusses des in Fig. 3 gezeigten Bildsensors 28 über der Zeit t für den Erhalt eines ersten Rohbildes dargestellt. Im Einzelnen nimmt Steuersignal C0 Zustände „0“ und „1“ an, wobei der elektrische Verschluss im Zustand „0“ geschlossen ist und der Bildsensor 28 kein Licht empfangen kann, während er im Zustand „1“ offen ist und der Bildsensor 28 Licht empfangen kann. Das Steuersignal C0 wird parallel zu den in Fig. 5(a) gezeigten ausgesandten Lichtimpulsen 40, 60 und 61 mit fester Phasenrelation ϕ_{i0} zum Erhalt eines ersten Rohbildes angewandt. Dabei beträgt die Phasenrelation zwischen dem Öffnen des elektrischen Verschlusses in Bezug auf das Aussenden des Lichtimpulses 40 ϕ_{i0} , im gezeigten ersten Ausführungsbeispiel ist $\phi_{i0} = -60^\circ$. Die Öffnungszeit beträgt jeweils 180° .

[0085] Dadurch wird während der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses ein Signalanteil 47 des Umgebungslichts 43 vom Bildsensor 28 erfasst, während ein anderer Signalanteil 48 des Umgebungslichts 43 außerhalb der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses nicht erfasst wird. Entsprechend seiner Verzögerung wird zusätzlich ein Signalanteil 45 des einfallenden Lichtimpulses 42 erfasst, während ein anderer Signalanteil 46 des einfallenden Lichtimpulses nicht erfasst wird.

[0086] Dies kann beispielsweise dadurch realisiert werden, dass dann, wenn das Steuersignal C0 den Zustand „0“ annimmt, die Ladung aus dem lichtempfindlichen Bereich 172 über den mit dem Signalweg

175 verbundenen elektrischen Verschluss (nicht gezeigt) gemäß **Fig. 2** entfernt wird, und dann, wenn das Steuersignal C0 den Zustand „1“ annimmt, die Ladung aus dem lichtempfindlichen Bereich **172** über den Signalweg **174** kumulierend dem Speicher **173** zugeführt wird.

[0087] Aus dem einfallenden Licht wird ein Signal gebildet, beispielsweise eine Ladung, eine Spannung, ein Strom oder eine digitale Zahl. Sofern mehrere Lichtimpulse **40**, **60** und **61** ausgesandt wurden und der elektrische Verschluss mehrfach geöffnet wurde, werden die Signale der einzelnen Öffnungen des Verschlusses als Ladungen im Speicher **173** analog, d. h. als Ladungspakete, addiert oder kumuliert, was durch die Addierfunktion **49** symbolisiert ist, und bilden schließlich ein Signal S0. Dieses Signal ist jeweils einem Pixel zugeordnet. Gemeinsam mit weiteren Signalen S0 von anderen Pixeln entsteht ein erstes Rohbild für das Signal S0. Optional könnte die Addierfunktion **49** auch in der in **Fig. 3** gezeigten Recheneinheit **29** realisiert sein, falls Signale der einzelnen Verschlussöffnungen separat digitalisiert und verarbeitet werden. Gleiches gilt auch für die nachfolgend erwähnten (symbolischen) Addierfunktionen **54** und **59**.

[0088] In **Fig. 5(c)** ist ein zweites Steuersignal C1 zu Steuerung des elektrischen Verschlusses über der Zeit t für den Erhalt eines zweiten Rohbildes dargestellt. Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen denen aus **Fig. 5(b)**. Hier wird nun eine andere Phasenrelation verwendet. Die Phasenrelation zwischen der steigenden Flanke **44** des Signals C0 und der steigenden Flanke **50** des Signals C1 beträgt ϕ_1 und hat im gezeigten Beispiel den Wert $\phi_1 = 120^\circ$. Die Öffnungszeit beträgt 180° .

[0089] Dadurch wird während der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses ein Signalanteil **52** des Umgebungslichts **43** empfangen, während ein anderer Signalanteil **53** des Umgebungslichts **43** außerhalb der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses nicht empfangen wird. Entsprechend seiner Verzögerung wird in diesem Fall der gesamte Signalanteil **51** des einfallenden Lichtimpulses **42** empfangen.

[0090] Aus dem einfallenden Licht wird wiederum ein Signal gebildet und sofern mehrere Lichtimpulse **40**, **60** und **61** ausgesandt wurden und der elektrische Verschluss mehrfach geöffnet wurde, werden die Signale der einzelnen Öffnungen des Verschlusses durch eine symbolische Addierfunktion **54** als Ladungen im Speicher **173** analog, d. h. als Ladungspakete, addiert oder kumuliert und bilden schließlich ein Signal S1. Auch dieses Signal ist jeweils einem Pixel zugeordnet. Gemeinsam mit weiteren Signalen S1 von anderen Pixeln entsteht ein zweites Rohbild für das Signal S1. Optional könnte die Addierfunktion **54** auch in der in **Fig. 3** gezeigten Recheneinheit **29**

realisiert sein, falls Signale der einzelnen Verschlussöffnungen separat digitalisiert und verarbeitet werden.

[0091] Schließlich ist in **Fig. 5(d)** ein drittes Steuersignal C2 zur Steuerung des elektrischen Verschlusses über der Zeit t für den Erhalt eines dritten Rohbildes dargestellt. Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen wiederum denen aus **Fig. 5(b)** und (c). Im gezeigten Beispiel ist $\phi_2 = 120^\circ$, ebenso wie ϕ_1 . Die Öffnungszeit beträgt wiederum 180° .

[0092] Dadurch wird während der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses lediglich ein Signalanteil **58** des Umgebungslichts **43** empfangen, während ein anderer Signalanteil **57** des Umgebungslichts **43** außerhalb der Öffnungszeit des elektrischen Verschlusses nicht empfangen wird. Entsprechend seiner Verzögerung wird in diesem Fall der gesamte Signalanteil **56** des einfallenden Lichtimpulses **42** nicht empfangen. Die Signale der einzelnen Öffnungen des Verschlusses werden auch hier durch eine symbolische Addierfunktion **59** als Ladungen im Speicher **173** analog, d. h. als Ladungspakete, addiert oder kumuliert und bilden schließlich ein Signal S2. Auch dieses Signal ist jeweils einem Pixel zugeordnet. Gemeinsam mit weiteren Signalen S2 von anderen Pixeln entsteht ein drittes Rohbild für das Signal S2. Optional könnte die Addierfunktion **59** auch in der in **Fig. 3** gezeigten Recheneinheit **29** realisiert sein, falls Signale der einzelnen Verschlussöffnungen separat digitalisiert und verarbeitet werden.

[0093] Die Steuersignale C0, C1 und C2 weisen die gleiche Periode t_p auf wie das Licht L.

[0094] Durch Kombination der drei Rohbilder für jeden Pixel liegen schließlich drei Signale S0, S1 und S2 vor. Unter der Annahme, dass das Objekt während der Aufnahme der drei Rohbilder keine wesentlichen Bewegungen ausgeführt hat und für jeden Pixel jeweils das Umgebungslicht **43** und die Intensität des empfangenen Lichtimpulses **42** gleich sind, kann für jeden Pixel aus den drei Signalen S0, S1 und S2 die Zeitdifferenz t_d und durch mit Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit die Entfernung des von auf diesem Pixel abgebildeten Signalanteils des Objektes **25** rechnerisch ermittelt werden. Daraus kann ein Entfernungsbild errechnet werden, bei dem den Pixeln Entfernungswerte zugeordnet sind.

[0095] Die Auswahl der Anzahl von drei Steuersignalen und Signalen erfolgt dabei auf Grundlage der nachfolgenden Überlegungen. Bei der Ermittlung der Entfernung eines Objekts über die Laufzeit des Lichts liegen drei Unbekannte vor, nämlich die Entfernung, die Intensität des Umgebungslichts und die Intensität des einfallenden Lichtimpulses. Zur Bestimmung dieses Problems mit drei Freiheitsgraden werden also mindestens drei verschiedene Signale benötigt.

Gleichzeitig ist es zur Erzeugung hoher Bildraten geboten, die Anzahl der Rohbilder so klein wie möglich zu halten. Daher kann die Anzahl der Rohbilder und die damit verbundene Anzahl von Steuersignalen als drei gewählt werden.

[0096] Fig. 6(a) bis (e) zeigen Diagramme zur Erläuterung des Zustandekommens der Signale durch Anwendung der Zeitsteuerung für Licht und Steuersignale. Im Einzelnen zeigen die Fig. 6(a) bis (e), wie sich aus der Phasenbeziehung zwischen dem einfallenden Licht D und dem Steuersignal C ein Verlauf des Signals S über der Zeitdifferenz td ergibt.

[0097] In Fig. 6(a) trifft der einfallende Lichtimpuls **70** so ein, dass ein Signalanteil **71** des empfangenen Lichtimpulses vor der steigenden Flanke **73** des Steuersignals C liegt und nicht empfangen wird, während ein anderer Signalanteil **72** hinter der steigenden Flanke **73** liegt und entsprechend empfangen wird. Je später nun der einfallende Lichtimpuls **70** eintrifft, desto kleiner wird der nicht empfangene Signalanteil **71** des einfallenden Lichtimpulses und desto größer wird der empfangene Signalanteil **72**. Somit ergibt sich im gezeigten Fall ein ansteigender Verlauf **74** des Signals S über der Zeitdifferenz td .

[0098] In Fig. 6(b) trifft der einfallende Lichtimpuls **75** ein und das Steuersignal C nimmt während der gesamten Zeit des Eintreffens den Zustand „1“ ein. Dadurch wird der einfallende Lichtimpuls als vollständig empfangener Lichtimpuls **76** empfangen. Solange dies der Fall ist, ergibt sich für das Signal S ein konstanter hoher Wert **77**.

[0099] In Fig. 6(c) trifft der einfallende Lichtimpuls **78** so ein, dass ein Signalanteil **79** des empfangenen Lichtimpulses vor der fallenden Flanke **81** des Steuersignals C liegt und empfangen wird, während ein anderer Signalanteil **80** hinter der fallenden Flanke **81** liegt und entsprechend nicht empfangen wird. Je später nun der einfallende Lichtimpuls **78** eintrifft, desto kleiner wird der empfangene Signalanteil **79** des einfallenden Lichtimpulses und desto größer wird der nicht empfangene Signalanteil **80**. Somit ergibt sich ein im gezeigten Fall ein fallender Verlauf **82** des Signals S über der Zeitdifferenz td .

[0100] In Fig. 6(d) trifft der einfallende Lichtimpuls **75** zu einer Zeit ein, zu der das Steuersignal durchgehend den Zustand „0“ annimmt. Dadurch wird der empfangene Lichtimpuls **84** vollständig unterdrückt. Solange dies der Fall ist, ergibt sich für das Signal S ein konstanter niedriger Wert **85**.

[0101] Daraus ergibt sich in Kombination der vorgenannten Fälle der in Fig. 6(e) gezeigte Signalverlauf **86** des Signals S über der Zeitdifferenz td , welches sich stückweise aus einer steigenden Flanke, einem

hohen konstanten Wert, einer fallenden Flanke und einem niedrigen konstanten Wert zusammensetzt.

[0102] Fig. 7(a) und (b) zeigen Diagramme mit Signalverläufen für das erste Ausführungsbeispiel. Im Einzelnen zeigt Fig. 7(a) die Signale S_0 , S_1 und S_2 und Fig. 7(b) den daraus ermittelte Wert für die Entfernung d .

[0103] Dementsprechend ergibt sich aus den in den Fig. 5(a) bis (d) gezeigten Verläufen der Steuersignale der in Fig. 7(a) dargestellte Verlauf für die Signale S_0 , S_1 und S_2 . Die Signale bewegen sich dabei zwischen einem Hintergrundsignal S_b , das sich nur aus dem Beitrag des empfangenen Umgebungslichts **58** zu den Signalen S_0 , S_1 und S_2 ergibt, und dem Spitzensignal S_p , das sich aus der Summe des Beitrags des empfangenen Umgebungslichts und der empfangenen Lichtimpulse **51** und **52** zu den Signalen S_0 , S_1 und S_2 ergibt.

[0104] Es lässt sich ein S -Raum definieren als Raum, der aus den Einheitsvektoren S_0 , S_1 und S_2 als Basis aufgespannt wird. Gleichermaßen lässt sich jeweils aus den Wertetripeln der Signale S_0 , S_1 und S_2 ein S -Vektor definieren, der als Komponenten die Werte der Signale S_0 , S_1 und S_2 aufweist.

[0105] Durch Größenvergleich der Signale in Fig. 7(a) lassen sich im S -Raum sechs verschiedene Bereiche für die Zeitdifferenz td unterscheiden, nämlich der Bereich **90** mit $S_2 \leq S_1 < S_0$, der Bereich **91** mit $S_2 < S_0 \leq S_1$, der Bereich **92** mit $S_0 \leq S_2 < S_1$, der Bereich **93** mit $S_0 < S_1 \leq S_2$, der Bereich **94** mit $S_1 \leq S_0 < S_2$ und der Bereich **95** mit $S_1 < S_2 \leq S_0$. Übersteigt die Zeitdifferenz td die Periode tp , so ergeben sich beispielsweise im Bereich **96** Werte für die Signale S_0 , S_1 und S_2 , die nicht von denen im Bereich **90** unterschieden werden können und im Bereich **97** Werte, die nicht von denen im Bereich **91** unterschieden werden können. Dieser Effekt wird als Tiefenaliasing bezeichnet. Blickt man entlang der Einheitsdiagonale auf den Ursprung des S -Raumes so entspricht diese Unterteilung einer Segmentierung entlang der Einheitsdiagonale mit 6 tortenstückförmigen Segmenten zu je 60° .

[0106] Es ist zu erkennen, dass in Fig. 7(a) immer genau eines der drei Signale S_0 , S_1 und S_2 einen steigenden oder fallenden Verlauf annimmt, während ein zweites der drei Signale einen konstanten hohen Wert und ein drittes der Signale einen konstanten tiefen Wert annimmt. Dabei wurde der in Fig. 5 gezeigte Verlauf der Steuersignale C_0 , C_1 und C_2 mit Bezug auf den Verlauf des Lichts L im ersten Ausführungsbeispiel mit Bedacht genau so gewählt, dass diese Bedingung erfüllt ist und sich der in Fig. 7(a) gezeigte Signalverlauf ergibt.

[0107] Dieser Signalverlauf bietet mehrere Vorteile. Zunächst ist es möglich, innerhalb eines Intervalls von $0 \leq t_d < t_p$ den Wert von den t_d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 eindeutig zu bestimmen. Dafür sind folgende Voraussetzungen erfüllt: Zu jedem Zeitpunkt sind mindestens zwei der Signale S_0 , S_1 und S_2 verschieden. Und zu jedem Zeitpunkt ändert sich mindestens eines der Signale S_0 , S_1 und S_2 auf eine andere Art und Weise als die anderen beiden der Signale S_0 , S_1 und S_2 in Abhängigkeit von der Zeitdifferenz t_d . Da sich jeweils nur ein Signal ändert und alle steigenden und fallenden Flanken der Steuersignale zur Erzeugung eines steigenden oder fallenden Signalverlaufs genutzt wurden, ist erkenntlich, dass sich so der größtmögliche Messbereich für die Zeitdifferenz t_d für eine gegebene Pulslänge t_l erzielen lässt.

[0108] Aus den in **Fig. 7(a)** gezeigten Signalen kann die in **Fig. 7(b)** gezeigte Entfernung d von Objekten **25**, **26** von der ToF-Kamera **20** in **Fig. 3** bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass sich der Messbereich so nah wie möglich an der ToF-Kamera **20** befindet und daher mit der Entfernung $d = 0$ startet. Wird eine Kombination der Signale S_0 , S_1 und S_2 gemessen, die einer Zeitdifferenz t_d von 0 entspricht, so entspricht dies einer Entfernung d von 0. Mit linear zunehmender Zeitdifferenz t_d ergibt sich ein erster Bereich **100** mit proportionaler Zunahme der Entfernung d , bis schließlich kurz vor der Zeitdifferenz $t_d = t_p$ fast ein maximaler Entfernungswert d_p gemessen wird. Ab dem Zeitpunkt t_p wiederholen sich die Signale S_0 , S_1 und S_2 periodisch, so dass die Kombination der Signale S_0 , S_1 und S_2 zum Zeitpunkt $t_d = t_p$ mit der Kombination der Signale S_0 , S_1 und S_2 zum Zeitpunkt $t_d = 0$ übereinstimmt und somit ein sprunghafter Abfall **101** zum Entfernungswert $d = 0$ erfolgt. Ab dem Zeitpunkt t_p folgt in einem zweiten Bereich **102** eine periodische Wiederholung der proportionalen Zunahme der Entfernung d . Dadurch kann die Entfernung d im Zeitraum $0 \leq t_d < t_p$ korrekt bestimmt werden. Sowohl der sprunghafte Abfall **101** als auch die periodische Wiederholung sind hingegen Messfehler durch Tiefenaliasing.

[0109] Der Proportionalitätsfaktor für die proportionale Zunahme im ersten Bereich **100** ergibt sich aus der Lichtgeschwindigkeit c und der Pulslänge t_l , wobei letztere nämlich die Steigung des innerhalb der Bereiche in **Fig. 7(a)** jeweils steigenden oder fallenden Signals beeinflusst. Der Proportionalitätsfaktor beträgt $c \cdot t_l / 2$.

[0110] **Fig. 8** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Ermittlung der Entfernung d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 . Durch die in **Fig. 7(a)** gezeigte Unterscheidung in die Bereiche **90** bis **95** ergibt sich innerhalb eines jeden Bereichs ein linearer Signalverlauf, so dass in jedem Bereich die Entfernung d mit einer linearen Gleichung bestimmt wer-

den kann. **Fig. 8** gibt eine Formel an, mittels der lineare Gleichungen für die Bereiche **90** bis **95** mittels einer Fallunterscheidung zu einer einzigen stückweise linearen Formel vereint werden können. Dabei ist d die zu messende Entfernung, c die Lichtgeschwindigkeit und t_l die Pulslänge. Die sechs Fallunterscheidungen durch Ungleichungen werden vorgenommen, um festzustellen, welchem der sechs Bereiche **90** bis **95** der S-Vektor angehört und mit welcher linearen Gleichung aus seinen Komponenten eine Entfernung errechnet werden soll. Für jeden Bereich ist eine lineare Gleichung angegeben. Durch die Addition der Zahlen 0, 1, 2, 3, 4, 5 wird eine Stetigkeit in der ermittelten Entfernung d erreicht. Der Ausdruck „NaN“ bedeutet „not a number“ und besagt, dass im Fall $S_0 = S_1 = S_2$ eine Entfernungsberechnung grundsätzlich nicht möglich ist, da in diesem Fall die drei Unbekannten nicht ermittelt werden können. Durch die in **Fig. 8** gezeigte Formel lässt sich aus den in **Fig. 7(a)** gezeigten Signalen ein Wert für die in **Fig. 7(b)** gezeigte Entfernung d korrekt bestimmen.

[0111] Die Werte der Signale S_0 , S_1 und S_2 werden also einem Operator zugeführt werden, der analog zu einem Hue-Operator aufgebaut ist und einen Drehwinkel um die Raumdiagonale des S_0 - S_1 - S_2 -Raumes ermittelt. Mittels einer Proportionalitätskonstante wird dieser dann in die Entfernungsinformation umgerechnet.

[0112] Durch das vorgeschlagene Verfahren lässt sich ein besonders großer Messbereich für eine gegebene Pulsbreite t_l erzielen. Der Messbereich reicht von einer Entfernung d von Null bis zu einer maximalen Entfernung d_p , die sich aus der Periode t_p ergibt durch die Formel $d_p = c/2 \cdot t_p$.

[0113] **Fig. 9(a)** und **(b)** zeigen eine Bahnkurve der S-Vektoren im S-Raum gemäß dem Stand der Technik bzw. gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.

[0114] Die anhand des ersten Ausführungsbeispiels gewonnene Erkenntnis lässt sich folgendermaßen visualisieren. In **Fig. 9** ist jeweils ein S-Raum als Würfel dargestellt und die Bahnkurve der S-Vektoren mit zunehmender Zeitdifferenz t_d eingezeichnet. Dabei zeigt **Fig. 9(a)** eine Bahnkurve gemäß dem Stand der Technik und **Fig. 9(b)** eine Bahnkurve gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel.

[0115] Eine Möglichkeit der Messung der Zeitdifferenz t_d mittels der drei Signale S_0 , S_1 und S_2 besteht darin, das Umgebungslicht als ein konstantes Signal S_2 zu messen, einen einfallenden Lichtimpuls teilweise zu empfangen und als ansteigendes Signal S_1 zu messen und das Umgebungslicht plus den vollständigen einfallenden Lichtimpuls als konstantes Signal S_0 zu messen. Daraus ergibt sich im S-Raum ein linearer Verlauf, wie er in beispielhafter Weise in

Fig. 9(a) dargestellt ist, wobei die hier eingezeichnete Bahnkurve ein Umgebungslicht von Null annimmt.

[0116] **Fig. 9(b)** zeigt die sich aus dem in **Fig. 7(a)** dargestellten Signalverlauf ergebende Bahnkurve der S-Vektoren im S-Raum unter der Annahme, dass die Intensität des Umgebungslichts Null beträgt. Im Vergleich zu **Fig. 9(a)** wird deutlich, dass durch das erste Ausführungsbeispiel eine 6-mal so lange Bahnkurve erzielt wird. Gleichzeitig wird ersichtlich, warum die gewählte Bahnkurve unter den gegebenen Randbedingungen eine maximale Länge aufweist. Die gegebenen Randbedingungen bestehen aus der Forderung, dass sich die Zeitdifferenz t_d und somit die Entfernung d unabhängig von der Intensität des Umgebungslichts und von der Intensität des einfallenden Lichtimpulses bestimmen lässt. Durch diese besonders lange Bahnkurve lässt sich ein besonders großer Messbereich erzielen.

[0117] In bestimmten Anwendungen kann es zweckmäßig sein, dass der Messbereich, der einen bestimmten, durch die Periode t_p gegebenen Entfernungsbereich aufweist, nicht in einer Entfernung d von der Kamera von Null beginnt, sondern in einer anderen, wählbaren Entfernung. Ein möglicher Grund dafür ist, dass Objekte, von denen Entfernungsbilder erstellt werden sollen, beispielsweise Paketsendungen auf einem Förderband, auf die eine darüber montierte Kamera von oben gerichtet ist, eine bestimmte Höhe nicht überschreiten können und der Messbereich optimal auf die tatsächlich vorkommenden Größen angepasst werden soll. Ein anderer möglicher Grund besteht darin, dass Objekte in zu großer Nähe durch die Eigenschaften des Bildsensors zu einer Sättigung der Signale führen und daher die Entfernung ohnehin nicht korrekt gemessen werden kann, so dass es vorteilhaft ist, den Messbereich auf korrekt messbare Entfernungen anzupassen. Dieser Umstand wird bei der Diskussion von **Fig. 14** näher erläutert.

[0118] **Fig. 10(a)** und **(b)** zeigen Signalverläufe bei einer Verschiebung des Messbereichs zu einer minimalen Entfernung d_{min} um 120° , als Beispiel für ein Vielfaches von 60° .

[0119] Da für die Verschiebung die Zeitsteuerung aus **Fig. 5(a)** bis **(d)** nicht verändert wurde, ist auch der Signalverlauf in **Fig. 10(a)** gegenüber dem Signalverlauf in **Fig. 7(a)** unverändert. Allerdings werden hier aus diesen gleichen Signalwerten die in **Fig. 7(b)** gezeigten verschobenen Entfernungswerte errechnet. Der Bereich der Entfernung reicht von einer minimalen Entfernung d_{min} , welche größer ist als Null, bis fast zu einer maximalen Entfernung d_{max} , welche auf vorteilhafte Weise größer ist als d_p . Die geringen Werte der Zeitdifferenz t_d , welche zu einem vor dem Messbereich liegenden ansteigenden Entfernungswert **103** gehören, unterliegen dann einem

Tiefenaliasing und kommen gemäß der veränderten Aufgabenstellung nicht vor. Innerhalb des Messbereichs in den Signalbereichen **92** bis **97** erfolgt eine korrekte Umsetzung der Signale in eine ansteigende Entfernung d in einem ersten Bereich **105**. Hinter der fallenden Flanke **106** der Entfernung d tritt ein weiteren Anstieg in einem zweiten Bereich **107** der Entfernung auf, der jedoch wiederum einem Tiefenaliasing unterliegt.

[0120] **Fig. 11** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Ermittlung der Entfernung d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 mit einem um die zwei Signalbereiche **90** und **91** verschobenen Messbereich. Die Formel gemäß **Fig. 11** kann mit dem in **Fig. 10** gezeigten verschobenen Messbereich realisiert werden. Im Vergleich zu **Fig. 7** ist erkennbar, dass die Signalbereiche **90** und **91** bei gleichen Signalen S_0 , S_1 und S_2 zu einer anderen Entfernungsinterpretation führen, die sich in der Formel in den Offsetwerten „6“ und „7“ wiederfindet. Generell gesprochen wurde für die von einer erhöhten Interpretation der Entfernung betroffenen Bereiche der Offsetwert jeweils um „6“ erhöht. Dieser Vorgang kann grundsätzlich auch mehrfach ausgeführt werden. Damit lässt sich auch eine minimale Entfernung d_{min} realisieren, die jenseits von d_p liegt.

[0121] **Fig. 12(a)** und **(b)** zeigen Signalverläufe bei einer Verschiebung des Messbereichs zu einer minimalen Entfernung d_{min} um 150° als Beispiel für einen von einem Vielfachen von 60° abweichenden Wert. Die gezeigten Signalverläufe sind dabei in Abhängigkeit einer Zeitdifferenz dargestellt, d. h. für jeden Wert von t_d muss ein eigenes Zeitdiagramm ablaufen und liefert dann als Ergebnis den Signalwert. Durch diese Verschiebung des Messbereichs können in verschiedenen Teilen eines Entfernungsbereiches verschiedene Entfernungsinterpretationen vorgenommen werden. Dazu wird hier der linke Teil des Signalbereichs **92** anders interpretiert als der rechte Teil und es ergibt sich in der Mitte des Signalbereichs **92** eine fallende Flanke **108** des Werts für die Entfernung d . Somit beginnt der korrekte Messbereich **109** innerhalb des Signalbereichs **92**.

[0122] **Fig. 13** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Ermittlung der Entfernung d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 mit einem um die zwei Signalbereiche **90** und **91** und einen Teil des Signalbereichs **92** verschobenen Messbereich. Diese Formel gibt die in **Fig. 12** gezeigte Entfernungsinterpretation an. Dabei wurde gegenüber der Formel in **Fig. 11** in die Bedingung der ersten Zeile zusätzlich zur bereits vorhandenen Ungleichung $S_0 \leq S_2 < S_1$ mit einem logischen UND die weitere Ungleichung $S_2 - S_0 \geq 0.5 \cdot (S_1 - S_0)$ aufgenommen. Durch diese weitere Ungleichung wird nur der rechte Teil des Bereichs **92** berücksichtigt und mit einem Offsetwert von „2“ versehen. Auf gleiche Weise wird in der vor-

letzten Zeile die dazu komplementäre Ungleichung $S_2 - S_0 < 0.5 \cdot (S_1 - S_0)$ aufgenommen, durch die der linke Teil des Bereichs **92** berücksichtigt und mit einem Offsetwert von „8“ versehen wird. Hierbei wird ein Faktor von „0.5“ verwendet, um eine Teilung des Bereichs **92** in der Mitte zu erzielen. Durch einen anderen Faktor zwischen „0“ und „1“ lässt sich auch eine Teilung an einer beliebigen anderen Stelle erzielen und zwar mit Werten für den Faktor, die kleiner als „0.5“, sind mehr auf der linken und mit Werten, die größer als „0.5“ sind, mehr auf der rechten Seite des Bereichs. Dies lässt sich direkt auch auf andere Bereiche betragen, wobei zu beachten ist, dass im gezeigten Fall in **Fig. 12(a)** im Signalbereich **92** ein Anstieg des Signals S_2 erfolgt, während die anderen Signale S_0 und S_2 jeweils konstant sind. Wird eine solche Teilung in einem anderen Bereich vorgenommen, in dem statt dessen ein fallendes Signal vorliegt, so sind die Ungleichungszeichen umzukehren und ferner entsprechen dann Werte für den Faktor, die kleiner als „0.5“ sind, der rechten Seite und Werte, die größer als „0.5“ sind, der linken Seite. Außerdem müssen die Signale S_0 , S_1 und S_2 so gegeneinander ausgetauscht werden, dass sich eine gleiche mathematische Bedeutung ergibt.

[0123] **Fig. 14** zeigt einen Signalverlauf für die Signale S_0 , S_1 und S_2 unter Würdigung des Abstandsgesetzes und ausgehend von den vorgenannten Erläuterungen. Hier ist der Signalverlauf für die Signale S_0 , S_1 und S_2 mit zunehmender Entfernung d dargestellt. Durch das Abstandsgesetz ist dem Signalverlauf aus **Fig. 10(a)** eine $1/r^2$ -Funktion überlagert. Das Signal bewegt sich zwischen dem Hintergrundsignal S_b und dem Sättigungssignal S_s . Letzteres ergibt sich aus dem Umstand, dass Bildsensoren üblicherweise nur ein endlich großes maximales Signal im Pixel speichern können, welches hier als Sättigungssignal S_s bezeichnet wird.

[0124] Dadurch ergibt sich zwischen einer Entfernung d von Null und der Sättigungsentfernung d_s ein Entfernungsbereich, in dem mindestens eines der Signale S_0 , S_1 oder S_2 gesättigt ist. In diesem Sättigungsbereich kann kein korrekter Entfernungswert ermittelt werden. Wo genau die Sättigungsentfernung d_s liegt, ist unter anderem von der Intensität der Lichtimpulse, den Reflektionseigenschaften des Objekts und der Zeit der Belichtung abhängig.

[0125] Da dieser Sättigungsbereich ohnehin nicht zur Bestimmung der Entfernung d genutzt werden kann, ist es vorteilhaft, auf eine Nutzung dieses Bereichs zu verzichten und stattdessen bis zu einer größeren maximalen Entfernung d_{max} messen zu können.

[0126] **Fig. 15** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens N_d , welches anhand der Formel gemäß **Fig. 8**

errechnet wurde. Dabei ist NS_0 das Rauschen des Signals S_0 , NS_1 das Rauschen des Signals S_1 , und NS_2 das Rauschen des Signals S_2 sowie t_l die Pulslänge und c die Lichtgeschwindigkeit. Der Operator $\max()$ bezeichnet einen Maximumoperator und $\min()$ einen Minimumoperator.

[0127] Zur Herleitung der Formel wurde nach dem Grundgedanken der bekannten Fehlerfortpflanzung vorgegangen. Eine experimentelle Überprüfung der Ergebnisse zeigte, dass zum Erzielen eines korrekten Ergebnisses nicht die Summe aus den Beträgen der partiellen Ableitungen der verschiedenen Eingangsgrößen jeweils multipliziert mit den Fehlern der verschiedenen Eingangsgrößen verwendet werden darf, sondern die Wurzel der Summe der Quadrate.

[0128] Die Rauschwerte NS_0 , NS_1 und NS_2 lassen sich entweder messen oder errechnen. Im letzteren Fall können beispielsweise die Formeln der Norm EMVA1288 Release A3.0 verwendet werden. Dort wird die Berechnung des zeitlichen Rauschens aus dem Dunkelrauschen des Bildsensors und aus dem Schrotrauschen (Shot Noise) der Ladungsträger und aus dem sogenannten Wandlungsgewinn (Conversion Gain) bestimmt. Sofern dies erforderlich ist, kann auch das Quantisierungsrauschen noch berücksichtigt werden.

[0129] Basierend auf der Formel gemäß **Fig. 15** ist zu erkennen, dass das mit dem ersten Ausführungsbeispiel erzielte Entfernungusrauschen N_d direkt proportional zur Pulslänge t_l ist. Ein einfacher Weg darin, eine qualitativ hochwertige Tiefenmessung mit einem geringen Rauschen vorzunehmen, besteht also darin, die Pulslänge t_l kurz zu wählen. Da die Länge des Messbereichs von „0“ bis d_p bzw. von d_{min} bis d_{max} seinerseits proportional zu t_l ist, verkürzt sich der Messbereich bei einer Verkürzung der Pulslänge t_l . Da, wie oben erwähnt, der Messbereich im ersten Ausführungsbeispiel besonders groß ist, ist dort eine besonders starke Verkürzung der Pulslänge t_l möglich, die ihrerseits dann wiederum zu einem besonders niedrigen Entfernungusrauschen führt.

[0130] Des Weiteren kann der Entfernungsbereich durch die Möglichkeit der Verkürzung der Pulslänge t_l und der damit erzielten Verringerung des Entfernungusrauschens N_d optimal angepasst werden, wie in **Fig. 10** bis **Fig. 13** erläutert wurde.

[0131] **Fig. 16** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Bestimmung der Gültigkeit von Entfernungswerten, die aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 errechnet werden.

[0132] Die Kenntnis des Rauschens kann dazu genutzt werden, über die Gültigkeit von aus Signalen S_0 , S_1 und S_2 errechneten Entfernungswerten d zu entscheiden. In der Formel gemäß **Fig. 16** sind S_0 ,

S1 und S2 die bereits erläuterten Signale als digitale Werte, o ist der Offsetwert der Kamera als digitaler Wert, N_d das Dunkelrauschen der Kamera, welches nach der EMVA1288 bestimmt werden kann und in Elektronen e^- angegeben wird, K der Conversion Gain nach EMVA 1288 in DN/e^- , t_l die Impulslänge in einer Zeiteinheit, c die Lichtgeschwindigkeit in einer Längeneinheit pro Zeit und Lim ein frei wählbarer Parameter zur Festsetzung eines Grenzwertes für das Tiefenrauschen in Längeneinheiten, z. B. Meter.

[0133] Die Formel gemäß **Fig. 16** ist aus Termen **210** bis **213** aufgebaut. Term **210** liefert einen Grenzwert, Term **211** einen Proportionalitätsfaktor, Term **212** ein Maß für die Signalqualität in digitalen Zahlen und Term **213** einen Schätzwert für das Rauschen. Somit lässt sich die Formel wie folgt erklären: Wenn die Signalqualität um einen einstellbaren Grenzwert höher ist als das Rauschen, ist der entsprechende Messwert gültig. Damit lässt sich zwischen gültigen und ungültigen Messwerten unterscheiden.

[0134] Zur Herleitung der Formel wurde eine nachfolgend im Zusammenhang mit **Fig. 17** erläuterte Vereinfachung verwendet.

[0135] Ein weiteres Kriterium für die Gültigkeit von Messwerten ist, dass alle drei Signale S0, S1 und S2 nicht gesättigt sind, also kleiner sind als das Sättigungssignal S_s .

[0136] **Fig. 17** zeigt ein Diagramm mit einer Approximation des Rauschens mittels einer vereinfachten Näherungsfunktion. Hier ist das Tiefenrauschen N_d über der Entfernung d als Graph **160** dargestellt. Dieser Verlauf wurde aus der Formel gemäß **Fig. 15** errechnet. Da die sich daraus ergebende Formel komplex ist und im praktischen Einsatz zu einem hohen Berechnungsaufwand führt, wurde ein alternativer Näherungsgraph **161** mit einer Näherungsformel errechnet. Diese Näherungsformel ergibt sich, wenn anstelle der drei Rauschwerte NS_0 , NS_1 und NS_2 nur ein Rauschwert für den Mittelwert der Signale S0, S1 und S2 verwendet wird. Dieser Näherungsansatz liegt der Formel gemäß **Fig. 16** zugrunde.

[0137] **Fig. 18** zeigt einen zeitlichen Verlauf eines idealen und eines realen Lichtimpulses. Der ideale Lichtimpuls **140** hat eine steile Einschaltflanke **141**, in der die Intensität von „0“ auf „1“ ansteigt und eine steile Ausschaltflanke **142**, in der die Intensität von „1“ auf „0“ abfällt, ohne dass dazu jeweils eine relevante Anstiegs- oder Abfallzeit benötigt würde. Im Gegensatz dazu besitzt der reale Lichtimpuls **143** eine stetige Einschaltflanke **144** und eine stetige Ausschaltflanke **145** und erzeugt somit einen nicht idealen zeitlichen Intensitätsverlauf, der von der Kurve des idealen Lichtimpulses **140** deutlich abweicht. Durch diese Abweichung kommt es zu Abweichungen des rea-

len Verlaufs der Signale S0, S1 und S2 in Abhängigkeit der Zeitdifferenz t_d von dem beispielsweise in **Fig. 7(a)** gezeigten Signalverlauf und folglich auch von der daraus ermittelten Entfernung d , welche in **Fig. 7(b)** gezeigt ist.

[0138] **Fig. 19** zeigt einen Kurvenverlauf einer real gemessenen Entfernung d in Abhängigkeit der Zeitdifferenz t_d . Ein solcher realer, durch Messung ermittelter Verlauf der gemessenen Entfernung d weist gegenüber der idealen proportionalen Zunahme im Bereich **100** in **Fig. 7(b)** nichtlineare Abweichungen auf. Die gemessene Entfernung kann aber mittels einer nichtlinearen Korrekturfunktion linearisiert werden. Dies kann beispielsweise in analytischer Form erfolgen, wobei eine analytische Funktion $f(d)$ herangezogen wird, deren Eingangsvariable die gemessene Entfernung d ist und die als Ergebnis eine linearisierte Entfernung f liefert. Eine solche Funktion kann beispielsweise durch mathematische Modellierung mittels einer periodischen Funktion ermittelt werden, bei der die wählbaren Parameter durch Fit angepasst werden. Die Bezeichnung "Fit" bezieht sich auf ein iteratives Näherungsverfahren.

[0139] Weiterhin kann auch eine numerische Korrekturfunktion verwendet werden, die der gemessenen Entfernung d eine korrekte, linearisierte Entfernung zuordnet. Dazu kann beispielsweise die Entfernung d für mehrere, bekannte Orte gemessen und aus den bekannten korrekten Entfernungen dieser Orte und den gemessenen Entfernungen eine Speichertabelle erstellt werden. Anhand dieser Tabelle kann dann die Recheneinheit **29** in **Fig. 3** für einen gemessenen Wert einer Entfernung d einen korrekten Entfernungswert auslesen. Auch kann bei diesem Auslesen eine Interpolation zwischen zwei Messpunkten vorgenommen werden, wobei die Interpolation beispielsweise linear, quadratisch, kubisch oder mit einer noch höheren Ordnung erfolgen kann.

[0140] Durch eine solche nichtlineare Korrekturfunktion können Messfehler korrigiert werden, die durch Abweichungen der Impulsform eines realen Lichtimpulses von der Impulsform eines idealen Lichtimpulses entstehen.

[0141] Da die Signale S0, S1 und S2 zyklisch verlaufen, ist es grundsätzlich möglich, das in **Fig. 5** gezeigte Timing dahingehend zu verändern, dass mit einem anderen Wert von ϕ_0 gearbeitet wird. Wenn dies der Fall ist, erhält man die Signale S0, S1 und S2 in einer anderen Phasenlage, als die in **Fig. 7** gezeigten. Die Formel gemäß **Fig. 8** kann dann an diese neue Phasenlage auf die in **Fig. 11** und **Fig. 13** beispielhaft gezeigte Weise angepasst werden, wobei dann die Anpassung nicht an eine neue minimale Distanz d_{min} , sondern an eine neue Phasenlage ϕ_0 erfolgt. Ebenso kann auch eine neue Phasenlage mit einer neuen minimalen Distanz kombiniert werden.

[0142] Fig. 20 zeigt Signalverläufe für eine Zeitsteuerung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel.

[0143] Diese Zeitsteuerung besitzt gegenüber der in Fig. 5 gezeigten Zeitsteuerung die gleiche Pulslänge t_l , die gleiche Öffnungszeit t_s und die gleichen Phasenverschiebungen ϕ_1 und ϕ_2 , wogegen die Totzeit t_0 , der Wert für die Phasenverschiebung ϕ_0 und die Periode t_p verändert sind.

[0144] Dabei werden die Werte für die Phasenverschiebung hier so verwendet, dass sich deren Werte in Grad weiterhin auf die ursprüngliche Definition im ersten Ausführungsbeispiel in Relation zur dortigen Periode t_p beziehen. Somit folgen die Lichtimpulse in diesem zweiten Ausführungsbeispiel mit dem erhöhten Wert für die Periode t_p mit mehr als 360° Abstand aufeinander, während die Dauer eines Lichtimpulses weiterhin 60° , die Öffnungszeit des Verschlusses weiterhin 180° und ϕ_1 und ϕ_2 weiterhin 120° betragen.

[0145] Fig. 21(a) und (b) zeigen aus der Zeitsteuerung des zweiten Ausführungsbeispiels resultierende Verläufe der Signale S_0 , S_1 und S_2 . Diese Signalverläufe weisen Signalbereich **220** bis **229** auf. Im Vergleich zu Fig. 7(a) entsprechen die Signalbereiche **223** bis **226** aus Fig. 21(a) qualitativ jeweils den Signalbereichen **90** bis **93** aus Fig. 7(a), sind jedoch entlang der Achse der Zeitdifferenz t_d verschoben. Zusätzlich zeigen sich neue Signalbereiche **220**, **221**, **222**, **227**, **228** und **229**, die einen grundsätzlich anderen Signalverlauf aufweisen.

[0146] Berechnet man nun aus diesen Signalen eine Entfernung, so erhält man die in Fig. 21(b) gezeigte Kurve für die Entfernung d . Diese Kurve weist zwei Bereiche **154** und **158** auf, in denen sich keine Entfernung berechnen lässt, weil die drei Signale S_0 , S_1 und S_2 dort konstant und identisch sind, so dass sich auf deren Grundlage keine Gleichung nach der Entfernung auflösen lässt. Die Kurve weist weiterhin zwei Bereiche **155** und **157** mit einem stückweise konstanten Wert für die Entfernung d auf, sowie einen Bereich **156**, in dem der Wert für die Entfernung linear mit einer zunehmenden Zeitdifferenz t_d ansteigt und in dem die Zeitdifferenz t_d korrekt in einen Wert für die Entfernung d umgesetzt werden kann.

[0147] Fig. 22 zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Entfernungsberechnung für das zweite Ausführungsbeispiel. Die Formel ist weitgehend identisch mit der in Fig. 8 angegebenen, es wurde jedoch ein weiterer Offsetwert d_{\min} addiert, der sich aus dem Wert von ϕ_0 ergibt, welcher in der Darstellung von Fig. 20 erheblich von der in Fig. 5 abweicht. Weiterhin wurde in Fig. 22 gegenüber Fig. 5 auf einen Term für den Fall $S_1 < S_2 \leq S_0$ und für

den Fall $S_1 \leq s_0 < S_2$ verzichtet, da diese Fälle in Fig. 21(a) nicht auftreten.

[0148] Das zweite Ausführungsbeispiel weist gegenüber dem ersten die nachfolgenden Vorteile auf. Da die Periode t_p in Fig. 20 deutlich größer ist als in Fig. 5 tritt eine Periodizität des Wertes der Entfernung d , wie sie beispielsweise in Fig. 7 gezeigt ist, erst bei deutlich höheren Werten für die Zeitdifferenz t_p auf und somit erst in deutlich größeren Entfernungen zwischen der Kamera **20** und den Objekten **25** und **26** gemäß Fig. 3 auf. Praktisch ist es sogar möglich, den Wert für die Periode t_p so groß zu wählen, dass praktisch gar kein Tiefenaliasing mehr auftritt, weil dieses zu so großen Zeitdifferenzen t_d mit so großen Entfernungen verschoben wird, dass aufgrund des Abstandsgesetzes aus dieser Entfernung praktisch kein messbares Licht mehr zur Kamera **20** zurückkehrt oder so stark geschwächt ist, dass die daraus ermittelten Werte als ungültig erkannt werden können, beispielsweise durch Nutzung der in Fig. 16 gezeigten Formel.

[0149] Weiterhin wird durch die Ausgestaltung des Verlaufs mit den Bereichen **154**, **155**, **157** und **158** in Fig. 21(b) eine Eindeutigkeit der im linearen Wertebereich **156** ermittelten Entfernungswerte erzielt. Das heißt, wenn einer der Werte für die Entfernung aus dem Wertebereich von **156** gemessen wird, kann sichergestellt werden, dass dieser Wert für die Entfernung auch korrekt ist. Wird ein Wert aus dem Wertebereich **155** oder **157** gemessen, ist erkennbar, dass der Messwert außerhalb des linearen Wertebereiches für die Entfernung **156** liegt und es ist sogar erkennbar, ob er im Wertebereich **155** vor oder im Wertebereich **157** hinter dem linearen Wertebereich **156** liegt.

[0150] Nachteilig hingegen ist, dass im zweiten Ausführungsbeispiel der lineare Wertebereich mit der korrekt ermittelten Entfernung d , welcher die vier Signalbereiche **223** bis **226** umfasst, kürzer ist als im ersten Ausführungsbeispiel, wo er die sechs Signalbereiche **90** bis **95** umfasst.

[0151] Fig. 23(a) und (b) zeigen Signalverläufe mit Spitzen- und Mittelwert eines Pulsfrequenzmodulierten Signals bei verschiedenen Pulsfrequenzen. Aus diesen Signalverläufen ist ein weiterer Vorteil des ersten Ausführungsbeispiels gegenüber dem Stand der Technik und des zweiten Ausführungsbeispiels gegenüber dem ersten Ausführungsbeispiel entnehmbar. Dort ist für ein pulsbreiten- oder puls-frequenzmoduliertes Signal die Relation zwischen Spitzen- und Mittelwert dargestellt. Der Spitzenwert P_{\max} und der Mittelwert P_{mean} eines solchen Signals sind über das Puls-Pausen-Verhältnis (Duty Cycle) verknüpft. Bei einem Puls-Pausen-Verhältnis von 50% wie in Fig. 23(a) beträgt der Mittelwert 50% des Spitzenwertes, bei einem Puls-Pausen-Verhält-

nis von $1/6$ wie in **Fig. 23(b)** beträgt der Mittelwert $1/6$ des Spitzenwertes.

[0152] Lichtquellen für ToF Kameras arbeiten meist mit Lichtquellen, welche für das menschliche Auge unsichtbare Wellenlängen aus dem nahen Infrarotbereich (NIR) aussenden. Dabei kommt wahlweise kohärente oder nichtkohärente Strahlung zum Einsatz. Um eine Gefährdung des menschlichen Auges auszuschließen ist die dabei verwendbare Leistung jeweils begrenzt, beispielsweise durch die in der Richtlinie 2006/25/EG genannten Vorgaben. Im üblichen Zeitbereich der für ToF-Kameras benutzten Lichtimpulse, zumeist mehrere Nanosekunden, ist dabei vor allem der Mittelwert ausschlaggebend. Das heißt, die Lichtquelle **23** darf eine gewisse mittlere Leistung nicht überschreiten.

[0153] Andererseits ist dagegen wünschenswert, eine möglichst hohe Lichtleistung auszusenden, damit das durch die Lichtquelle **23** ausgestrahlte Licht heller ist oder sich zumindest in der gleichen Größenordnung bewegt, wie das Umgebungslicht. Haben die Lichtimpulse hingegen auf den Objekten deutlich weniger Intensität als das Umgebungslicht, so führt das in dem Umgebungslicht aufgrund der Photonenstatistik vorhandene Rauschen zu einem schlechten bis sehr schlechten Signal-Rausch-Verhältnis, so dass die Entfernung d nicht mehr mit einer hinreichenden Genauigkeit ermittelt werden kann.

[0154] Da sich die Grenzwerte in erste Linie auf die mittlere Leistung, das Verhältnis zum Umgebungslicht hingegen auf die Spitzenleistung beziehen, kann die Leistungsfähigkeit einer ToF Kamera dadurch gesteigert werden, dass ein niedriges Puls-Pausen-Verhältnis gewählt wird. Dadurch werden in der Lichtintensität gleichzeitig ein hoher Spitzenwert und ein niedriger Mittelwert erzielt, wodurch sich beide vorgenannten Forderungen auf vorteilhafte Weise gemeinsam realisieren lassen.

[0155] Durch das zweite Ausführungsbeispiel lässt sich im Vergleich zum ersten Ausführungsbeispiel ein besonders hoher Spitzenwert für die Intensität bei einem gleichzeitig besonders niedrigen Mittelwert erzielen. Insbesondere eignet sich dieses Ausführungsbeispiel für den Einsatz sogenannter Puls-laserdioden, welche üblicherweise für ein Puls-Pausenverhältnis von $1/1000$ optimiert sind. Dies stellt insbesondere auch gegenüber allen ToF-Kameras mit Demodulationsbildsensoren einen großen Vorteil dar. Der Vorteil kommt besonders dort zu tragen, wo eine hohe Intensität des Umgebungslichts vorliegt, beispielsweise bei starker Sonneneinstrahlung oder starken Studioscheinwerfern.

[0156] **Fig. 24** zeigt Signalverläufe für eine Zeitsteuerung gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel. Hier handelt es sich um eine Modifikation des ersten

Ausführungsbeispiels gemäß **Fig. 5 ff** dahingehend, dass die Dauer der Lichtimpulse von 60° auf 180° verlängert ist, während im Gegenzug die Impulse der Steuersignale C_0 , C_1 und C_2 von 180° auf 60° verkürzt sind und ϕ_0 auf 0° eingestellt ist. Die Phasenverschiebungen ϕ_1 und ϕ_2 betragen weiterhin jeweils 120° . Durch Anwendung dieser Zeitsteuerung ergibt sich ein identischer Signalverlauf wie im ersten Ausführungsbeispiel in **Fig. 7**, so dass zur Ermittlung der Entfernung d die gleichen Formeln und Maßnahmen mit den gleichen Ausführungsoptionen angewandt werden können.

[0157] Der Vorteil des dritten Ausführungsbeispiels liegt darin, dass ein größeres Verhältnis zwischen der Pulslänge t_l und der Periode t_p realisiert werden kann. Um mit dem ersten Ausführungsbeispiel einen kurzen Messbereich mit einer hohen Genauigkeit zu realisieren, war es notwendig, eine kurze Pulslänge t_l zu wählen. Nun ist es allerdings so, dass die üblichen pulsbaaren Lichtquellen, beispielsweise Leuchtdioden, Laserdioden oder sogar Puls-laserdioden eine endliche Einschalt- und eine endliche Ausschaltzeit besitzen, so dass ihre Pulslänge nicht bis unter ein gewisses Maß reduziert werden kann. Somit kann mit dem ersten Ausführungsbeispiel auch eine gewisse Mindestgröße eines Messbereichs nicht unterschritten und somit auch nur eine begrenzte Messgenauigkeit erreicht werden. Das dritte Ausführungsbeispiel erlaubt jedoch, den Messbereich weiter um einen Faktor drei zu verkleinern und dabei auch eine weitere Steigerung der Messgenauigkeit zu erzielen.

[0158] **Fig. 25** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens N_d bei dem dritten Ausführungsbeispiel.

[0159] Im Vergleich zu **Fig. 15** ist zu erkennen, dass der erste Faktor im Nenner eine „6“ statt einer „2“ aufweist und somit das Rauschen grundsätzlich um einen Faktor „3“ kleiner ist. Die real erzielbare Verminderung des Rauschens fällt bei gleicher Belichtungszeit allerdings etwas kleiner aus, da durch die im Vergleich zu den Lichtimpulsen kurzen Öffnungszeiten des Verschlusses nur einen Signalanteil des Lichts empfangen werden kann und somit die Signale S_0 , S_1 und S_2 kleiner ausfallen, als im ersten Ausführungsbeispiel. Demgegenüber steht jedoch der teilweise kompensierende Effekt, dass durch die kürzere Öffnungszeit auch nur ein geringerer Teil des Umgebungslichts empfangen wird.

[0160] **Fig. 26** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Bestimmung der Gültigkeit von anhand der Signale S_0 , S_1 und S_2 des dritten Ausführungsbeispiels gewonnenen Entfernungswerten.

[0161] Ebenso wie die Formel in **Fig. 15** ist diese Formel aus der Formel für das Tiefenrauschen N_d un-

ter Verwendung einer Vereinfachung hergeleitet. Die unterschiedlichen Faktoren in der Formel des Tiefenrauschens, nämlich der Wert „6“ in **Fig. 25** und der Wert „2“ in **Fig. 15** ergeben in **Fig. 26** einen unterschiedlichen Faktor im Zähler des Terms **171**, nämlich „108“ statt „12“. Mit dieser Formel kann die Gültigkeit von Messwerten auch für das dritte Ausführungsbeispiel ermittelt werden. Natürlich kann ebenso wie im ersten Ausführungsbeispiel auch die Sättigung als Kriterium herangezogen werden.

[0162] **Fig. 27** zeigt Signalverläufe für eine Zeitsteuerung gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel.

[0163] Ebenso wie das zweite Ausführungsbeispiel sich aus dem ersten durch Vergrößerung der Periode t_p ableiten lässt, lässt sich durch die gleiche Maßnahme das vierte aus dem dritten ableiten. Es ergeben sich die gleichen Signalformen, wie im zweiten Ausführungsbeispiel, sodass auch für das vierte Ausführungsbeispiel die gleichen Formeln und Maßnahmen angewandt werden können. Das vierte Ausführungsbeispiel weist gegenüber dem dritten die gleichen Vorzüge auf, wie das zweite gegenüber dem ersten.

[0164] **Fig. 28** zeigt Signalverläufe für eine Zeitsteuerung gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel.

[0165] Hier betragen sowohl die Pulslänge t_l als auch die Öffnungszeiten der Kontrollsignale C_0 , C_1 und C_2 jeweils 180° , ϕ_0 beträgt 0° und ϕ_1 und ϕ_2 jeweils 120° .

[0166] Beim dritten und vierten Ausführungsbeispiel wurde zur Erzielung einer hohen Messgenauigkeit mit einem geringen Tiefenrauschen eine besonders kurze Öffnungszeit des Verschlusses verwendet. Es gibt jedoch Kameras mit Bildsensoren, bei denen diese besonders kurze Öffnungszeit des Verschlusses nicht realisiert werden kann. Dort ist es vorteilhaft, mit einer längeren Öffnungszeit des Verschlusses arbeiten zu können. Beim fünften Ausführungsbeispiel ist im Vergleich zum dritten und vierten Ausführungsbeispiel die Öffnungszeit des Verschlusses um einen Faktor „3“ verlängert.

[0167] Dadurch kann auch ein größerer Anteil des ausgesandten Lichtes empfangen werden, wodurch sich eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit ergibt.

[0168] **Fig. 29** zeigt Verläufe der Signale S_0 , S_1 und S_2 für die Zeitsteuerung gemäß dem fünften Ausführungsbeispiel.

[0169] Der Verlauf der Signale ergibt sich aus der Zeitsteuerung gemäß **Fig. 28** mit den bei der Diskus-

sion von **Fig. 6** genannten Überlegungen und unterscheidet sich deutlich von dem in **Fig. 7**.

[0170] **Fig. 30(a)** und **(b)** zeigt die Bahnkurve der S-Vektoren im S-Raum für das fünfte Ausführungsbeispiel aus verschiedenen Blickwinkeln.

[0171] Dem fünften Ausführungsbeispiel liegt die Überlegung zugrunde, den Signalverlauf im S-Raum auf einer Polygonlinie zu führen, die einer Kreisbahn um die Einheitsdiagonale möglichst nahe kommt. Ein S-Raum mit einer solchen Polygonlinie bestehend aus Linien **130** bis **135** ist in **Fig. 30(a)** und **(b)** gezeigt. Dabei zeigen **Fig. 30(a)** und **(b)** dieselbe Polygonlinie zum besseren Verständnis des dreidimensionalen Verlaufs aus einem um 90° gegeneinander gedrehten Blickwinkel. Die Linien verbinden dabei jeweils Punkte auf den Außenflächen des Würfels, der den S-Raum darstellt. Ebenso wie in **Fig. 9** wird bei dieser Darstellung davon ausgegangen, dass kein Umgebungslicht vorhanden ist.

[0172] **Fig. 31** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Ermittlung der Entfernung d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 für das fünfte Ausführungsbeispiel.

[0173] Bis auf einen Faktor $1/3$ zeigt sich eine Übereinstimmung mit der Formel aus **Fig. 8** für das erste Ausführungsbeispiel. Somit können unter Beachtung dieses anderen Faktors alle weiteren Erkenntnisse und Ausführungsoptionen zum ersten Ausführungsbeispiel, beispielsweise auch nach **Fig. 10** bis **Fig. 13**, auf das fünfte Ausführungsbeispiel übertragen werden.

[0174] **Fig. 32** zeigt einen Kurvenverlauf einer real gemessenen Entfernung d in Abhängigkeit der Zeitdifferenz t_d für das fünfte Ausführungsbeispiel.

[0175] Analog zu **Fig. 19** zeigt **Fig. 32** einen durch Messung ermittelten Verlauf der gemessenen Entfernung d in Abhängigkeit der Zeitdifferenz t_d für das fünfte Ausführungsbeispiel. Dabei tritt ein besonderer Vorteil des fünften Ausführungsbeispiels zutage. Hier sind nämlich die nichtlinearen Abweichungen besonders klein. Das liegt daran, dass sich hier die Wirkung der Abweichungen der realen Einschaltflanke von der idealen Einschaltflanke und der realen Ausschaltflanke von der idealen Ausschaltflanke auf besonders günstige Weise gegenseitig kompensieren. Die verbleibende nichtlineare Abweichung kann mit den gleichen Mitteln korrigiert werden, wie sie für das erste Ausführungsbeispiel vorgeschlagen wurden.

[0176] Das Rauschen für das fünfte Ausführungsbeispiel kann nach der Formel gemäß **Fig. 25** bestimmt werden. Da gegenüber dem dritten Ausführungsbeispiel durch die längere Öffnungszeit des Verschlusses mehr Licht empfangen werden kann, fällt der

Nenner im Allgemeinen größer aus, so dass das Rauschen im Ergebnis meist kleiner ausfällt.

[0177] Da sich für das Rauschen die gleiche Formel anwenden lässt wie im dritte Ausführungsbeispiel, kann auch die Gültigkeit von Entfernungswerten auf die gleiche Weise ermittelt werden wie für das dritte Ausführungsbeispiel in **Fig. 26** dargelegt ist.

[0178] **Fig. 33** zeigt Signale einer Zeitsteuerung gemäß einem sechsten Ausführungsbeispiel.

[0179] Ebenso wie im zweiten und vierten Ausführungsbeispiel wurde auch hier die Periodendauer gegenüber dem fünften Ausführungsbeispiel verlängert. Es ergeben sich gegenüber dem fünften Ausführungsbeispiel gleiche oder ähnliche Vorteile, wie im zweiten gegenüber dem ersten und im vierten gegenüber dem dritten Ausführungsbeispiel.

[0180] **Fig. 34** zeigt einen Verlauf der Signale S_0 , S_1 und S_2 entsprechend der Darstellung in **Fig. 12** bei einer Zeitsteuerung gemäß dem sechsten Ausführungsbeispiel.

[0181] Hier ergibt sich ein Bereich **230**, in dem die Signale S_1 und S_2 gleich sind und eine exakte Bestimmung einer Entfernung d nicht möglich ist. Jedoch lässt sich dort, wo $S_0 > S_1$, $S_0 > S_2$ und $S_1 = S_2$ schließen, dass die Entfernung geringer ist als in den nachfolgenden Bereichen **231** bis **237**. In den Bereichen **231** bis **236** ist eine Bestimmung der Entfernung möglich. Im Bereich **237** dagegen wiederum nicht, doch lässt sich hier anhand der Relation $S_2 > S_1$, $S_2 > S_0$ und $S_0 = S_1$ feststellen, dass die Entfernung d größer ist als in den Bereichen **231** bis **236**. Im Bereich **238** lässt sich wegen $S_0 = S_1 = S_2$ keine Entfernung ermitteln und gleichzeitig lässt sich die Aussage treffen, dass sich dort keine Entfernung ermitteln lässt. Ab Bereich **239** folgt eine periodische Wiederholung des Bereichs **230**.

[0182] **Fig. 35** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Bestimmung der Entfernung d im sechsten Ausführungsbeispiel.

[0183] Diese Formel gibt an, wie aus den in **Fig. 34** gezeigten Signalen eine korrekten Entfernung d ermittelt werden kann. Im Vergleich zu der Formel in **Fig. 31** zeigen sich sowohl in den bereichsdefinierenden Bedingungen als auch in den innerhalb der Bereiche geltenden linearen Termen deutliche Unterschiede, die dem Signalverlauf aus **Fig. 34** geschuldet sind. Es ist ersichtlich, dass mit dem sechsten Ausführungsbeispiel im Vergleich zu dem zweiten und vierten Ausführungsbeispiel ein besonders großer Messbereich bei besonders guter Linearität abdeckbar ist, ohne Verlust der dort aufgeführten Vorteile.

[0184] **Fig. 36** zeigt Signalverläufe einer Zeitsteuerung gemäß einem siebten Ausführungsbeispiel.

[0185] Hier betragen die Pulslänge sowie die Länge der Öffnungszeiten des Verschlusses jeweils 120° , ϕ_1 und ϕ_2 ebenfalls 120° und ϕ_0 wird hier mit 0° gewählt.

[0186] **Fig. 37** zeigt Verlauf der Signale S_0 , S_1 und S_2 bei einer Zeitsteuerung gemäß dem siebten Ausführungsbeispiel.

[0187] Aus der Zeitsteuerung gemäß **Fig. 36** ergibt sich für das siebte Ausführungsbeispiel auf Grundlage der anhand **Fig. 6** diskutierten Überlegungen der in **Fig. 37** gezeigte Signalverlauf. Im Gegensatz zu den vorherigen Ausführungsbeispielen ergeben sich hier nur drei verschiedene Signalbereiche **200**, **201** und **202**. Der vierte Signalbereich **203** stellt bereits eine periodische Wiederholung des ersten Signalbereichs **200** dar. Durch die geringere Anzahl an Bereichen reduziert sich die Anzahl an Fallunterscheidungen und somit auch der Berechnungsaufwand in der Recheneinheit **29** gemäß **Fig. 3** zum Ermitteln der Entfernung.

[0188] **Fig. 38(a)** und **(b)** zeigt eine Bahnkurve der S -Vektoren im S -Raum für das siebte Ausführungsbeispiel aus verschiedenen Blickwinkeln.

[0189] Dem siebten Ausführungsbeispiel liegt die Überlegung zugrunde, den Signalverlauf im S -Raum auf einer Polygonlinie zu führen, die eine mathematisch möglichst einfach beschreibbare Bahnkurve aufweist. Eine solche Bahnkurve bildet beispielsweise ein Dreieck, welches gemeinsam mit den Basisvektoren des S -Raumes eine Dreieckspyramide aufspannt. Dieses ist in **Fig. 38(a)** und **(b)** gezeigt und die Linien **190**, **191** und **192** bilden das Dreieck. **Fig. 38(a)** und **(b)** zeigen beide zum besseren räumlichen Verständnis genau dieselbe Polygonlinie aus einem um 90° gegeneinander gedrehten Blickwinkel. Ebenso wie in **Fig. 9** und in **Fig. 30** wird bei dieser Darstellung davon ausgegangen, dass kein Umgebungslicht vorhanden ist.

[0190] **Fig. 39** zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Ermittlung der Entfernung d aus den Signalen S_0 , S_1 und S_2 bei einer Zeitsteuerung gemäß dem siebten Ausführungsbeispiel.

[0191] Im Vergleich zu **Fig. 8**, **Fig. 11**, **Fig. 13**, **Fig. 22** und **Fig. 31** fällt auf, dass diese Formel einfacher strukturiert ist und insbesondere bei der Realisierung der Hardware der Recheneinheit **29** gemäß **Fig. 3**, beispielsweise in einem Field-Programmable Gated Array (FPGA), einen besonders geringen Ressourcenaufwand benötigt.

[0192] Fig. 40 zeigt eine in der Recheneinheit **29** verwendete Formel zur Berechnung des Tiefenrauschens N_d anhand der Signale S_0 , S_1 und S_2 für das siebte Ausführungsbeispiel.

[0193] Auch hier kennzeichnen die Parameter NS_0 , NS_1 und NS_2 die Rauschwerte der Signale S_0 , S_1 und S_2 , welche direkt gemessen oder auch nach den Formeln der Norm EMVA 1288 berechnet werden können. Aus dieser Formel lässt sich mit den gleichen Überlegungen, die im Zusammenhang mit Fig. 16 und Fig. 17 diskutiert wurden, ein Kriterium für die Gültigkeit von Messwerten herleiten.

[0194] Fig. 41 zeigt Signalverläufe für eine Zeitsteuerung gemäß einem achten Ausführungsbeispiel.

[0195] Hier wird auch das siebte Ausführungsbeispiel durch Erhöhung der Periode t_p dahingehend weiterentwickelt, dass die Vorteile des zweiten, vierten und sechsten Ausführungsbeispiels erhalten werden.

[0196] Fig. 42 zeigt Verläufe der Signale S_0 , S_1 und S_2 bei einer Zeitsteuerung gemäß dem achten Ausführungsbeispiel.

[0197] Wird die in Fig. 41 gezeigte Zeitsteuerung angewandt, so wird der in Fig. 42 dargestellte Signalverlauf in Abhängigkeit der Zeitdifferenz t_d erhalten. Dabei ist die Entfernung d innerhalb der Bereiche **241** und **242** korrekt bestimmbar, innerhalb der Bereiche **240** und **243** als vor bzw. hinter dem Messbereich bestimmbar, und im Bereich **244** nicht bestimmbar. Ab dem Bereich **245** findet eine periodische Wiederholung statt. Für die innerhalb der Bereiche linear verlaufenden Signale kann ebenso wie in den vorhergegangenen Beispielen eine Formel formuliert werden.

[0198] Fig. 43 zeigt eine solche in der Recheneinheit **29** verwendete Formel für das achte Ausführungsbeispiel.

[0199] Ebenso wie im siebten Ausführungsbeispiel ist auch hier die Formel sehr kompakt und erfordert bei einer Realisierung in Hardware besonders wenig Ressourcenaufwand.

[0200] Den geschilderten Ausführungsbeispielen ist gemeinsam, dass als Bildsensor **28** in Fig. 3 nunmehr ein konventioneller Bildsensor eingesetzt werden kann, welcher über nur einen Signalpfad pro Pixel verfügt. Dadurch kann der Bildsensor **28** besonders einfach und damit kostengünstig hergestellt werden und ist lichtempfindlich oder rauscharm. Ferner kann eine besonders hohe laterale Auflösung aufweisen oder sich besonders schnell auslesen lassen. Da am Markt erheblich mehr konventionelle Bildsensoren verfügbar sind als Demodulationsbildsen-

soren, ist es einfach, einen entsprechenden Bildsensor zu finden, der den entsprechenden Vorteil aufweist. Schließlich kann auch ein Farbbildsensor verwendet werden, sodass mit nur mit einem einzigen Bildsensor Entfernung und Farbe von Objekten erfasst werden können.

[0201] In den vorgenannten Ausführungsbeispielen wurden jeweils drei Signale erfasst, zu deren Aufnahme jeweils Licht ausgesandt und ein Verschluss mit gegebener und jeweils verschiedener Phasenlage zum ausgesandten Licht geöffnet und geschlossen wird. Die Dauer t_s der Öffnung des Verschlusses für die Gewinnung der drei Signale wurde jeweils gleich gewählt. Auch wurden jeweils Phasenverschiebungen $\phi_2 = \phi_3$ gewählt.

[0202] Die vorgestellten Lösungsalternativen gemäß den Ausführungsbeispielen können im Zusammenhang mit verschiedensten Bildaufnahmegeäten und Kameras nach dem TOF-Prinzip eingesetzt werden.

[0203] Zusammenfassend wurden eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Steuerung einer Lichtlaufzeitkamera beschrieben, bei der eine Entfernungsinformation für ein dreidimensionales Bild aus einem Laufzeitunterschied oder einer Phasenverschiebung zwischen einem von einer Lichtquelle der Laufzeitkamera emittierten Lichtsignal und einem von einem Bildsensor der Laufzeitkamera durch Streuung oder Reflexion des emittierten Lichtsignals empfangen Lichtsignal ermittelt wird. Es werden zumindest drei Subbilder aufgenommen. Dabei wird zumindest ein Lichtpuls ausgesendet und eine Verschlusseinrichtung (Shutter) wird mittels zumindest dreier Steuersignale so getaktet, dass die Phasenverschiebung zwischen Lichtimpuls und Shutter durch die verschiedenen Phasenlagen der Steuersignale zwischen den Subbildern variiert wird. Dadurch werden pro Pixel drei Messwerte erhalten. Diese können einem Operator zugeführt werden, der analog zu einem Hue-Operator aufgebaut ist und einen Drehwinkel um die Raumdiagonale des S_0 - S_1 - S_2 -Raumes ermittelt. Mittels einer Proportionalitätskonstante kann dieser dann in die Entfernungsinformation umgerechnet werden.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 4131919 A [0002]
- EP 2367360 A2 [0002]
- US 4194213 A [0005]
- US 4656519 A [0005]
- EP 2150039 A1 [0005]
- US 5471515 A [0006]
- US 5841126 [0006]
- US 6667768 [0006, 0009]
- US 2012/0193516 A [0008]
- US 3971065 [0010]
- DE 102011089636 A1 [0013]
- DE 19704496 C2 [0015, 0019]
- US 8115158 [0015]
- US 20120176476 A1 [0015]
- US 5081530 [0019]
- EP 1040366 B1 [0019, 0020]
- US 5081530 A [0019]
- US 8576319 A [0021]
- EP 2109306 A2 [0021]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Norm EMVA1288 Release A3.0 [0128]
- Richtlinie 2006/25/EG [0152]
- Norm EMVA 1288 [0193]

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Steuerung einer Lichtlaufzeitkamera (20), bei der eine Entfernungsinformation für ein dreidimensionales Bild aus einem Laufzeitunterschied oder einer Phasenverschiebung zwischen einem von einer Lichtquelle (23) der Laufzeitkamera (20) emittierten Lichtsignal und einem von einem Bildsensor (28) der Laufzeitkamera (20) durch Streuung oder Reflektion des emittierten Lichtsignals empfangenen Lichtsignal ermittelt wird, wobei die Vorrichtung (21) ausgestaltet ist:

- zum Steuern der Lichtquelle (23) zur Abgabe von zumindest einem Lichtimpuls;
- zum Steuern des Bildsensors (28) zur Demodulation des empfangenen Lichtsignals mittels einer jedem Bildpunkt des Bildsensor zugeordneten elektrischen Verschlusseinrichtung; und
- zum Öffnen bzw. Schließen der elektrischen Verschlusseinrichtung mittels eines Steuersignals mit mindestens drei verschiedenen impulsförmigen Signalformen (C0, C1, C2) mit fester Phasenbeziehung zu dem zumindest einen Lichtimpuls, um mindestens drei Signale (S0, S1, S2) zu erfassen;
- wobei die zeitliche Dauer (tl) der impulsförmigen Steuersignale (C1, C2, C3) für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung jeweils gleich ist; und
- wobei die Phasenverschiebung (ϕ_1) zwischen dem ersten Steuersignal (C0) und dem zweiten Steuersignal (C1) gleich der Phasenverschiebung (ϕ_2) zwischen dem zweiten Steuersignal (C1) und dem dritten Steuersignal (C2) ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die Phasenverschiebung (ϕ_1) zwischen dem ersten Steuersignal (C0) und dem zweiten Steuersignal (C1) und die Phasenverschiebung (ϕ_2) zwischen dem zweiten Steuersignal (C1) und dem dritten Steuersignal (C2) in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses jeweils 120° beträgt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die Phasenverschiebung (ϕ_0) zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste (C0) der drei Steuersignale (C1, C2, C3) und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses -60° beträgt.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die Phasenverschiebung (ϕ_0) zwischen dem Zeitpunkt des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung durch das erste (C0) der drei Steuersignale (C1, C2, C3) und dem Zeitpunkt der Abgabe des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses 0° beträgt.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die zeitliche Dauer (tl) der impulsförmigen Steuersignale (C1, C2, C3) für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 60° entspricht und dass die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entspricht.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die zeitliche Dauer (tl) der impulsförmigen Steuersignale (C1, C2, C3) für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entspricht und dass die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entspricht.

7. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die zeitliche Dauer (tl) der impulsförmigen Steuersignale (C1, C2, C3) für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 120° entspricht und dass die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 120° entspricht.

8. Vorrichtung nach Anspruch 3, wobei die Vorrichtung (21) so ausgestaltet ist, dass die zeitliche Dauer (tl) der impulsförmigen Steuersignale (C1, C2, C3) für das Öffnen der elektrischen Verschlusseinrichtung in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 180° entspricht und dass die Dauer des Lichtimpulses in Bezug auf die Periodendauer des Lichtimpulses einem Phasenwinkel von 60° entspricht.

9. Lichtlaufzeitkamera (20) mit einer Lichtquelle (23), einem Bildsensor (28) und einer Vorrichtung (21) nach einem der Ansprüche 1 bis 8.

10. Lichtlaufzeitkamera nach Anspruch 9, mit einer Recheneinrichtung (29) zur Berechnung der Entfernungsinformation des dreidimensionalen Bilds anhand der Werte der drei Signale (S0, S1, S2) basierend auf einer Fallunterscheidung für verschiedene durch gegenseitige Größenverhältnisse der Werte der drei Signale (S0, S1, S3) festgelegte Bereiche (90–97).

11. Lichtlaufzeitkamera nach Anspruch 10, wobei die Recheneinrichtung (29) ausgestaltet ist, die Gültigkeit der berechneten Entfernungsinformation anhand eines Verhältnisses zwischen Signalqualität und Rauschen zu bestimmen.

12. Lichtlaufzeitkamera nach Anspruch 10 oder 11, wobei die Recheneinrichtung (29) ausgestaltet ist, über die Gültigkeit der berechneten Entfernungsinformation anhand des Sättigungsgrades der drei Signale (S0, S1, S2) zu entscheiden.

13. Verfahren zum Steuern einer Lichtlaufzeitkamera (20), bei der eine Entfernungsinformation für eine dreidimensionalen Bilddarstellung aus einem Laufzeitunterschied oder einer Phasenverschiebung zwischen einem von einer Lichtquelle (23) der Laufzeitkamera (20) emittierten Lichtsignal und einem von einem Bildsensor (28) der Laufzeitkamera (20) durch Streuung oder Reflektion des emittierten Lichtsignals empfangen Lichtsignal ermittelt wird, wobei das Verfahren die nachfolgenden Schritte umfasst:

- Steuern der Lichtquelle (23) zur Abgabe von zumindest einem Lichtimpuls;
- Steuern des Bildsensors (28) zur Demodulation des empfangenen Lichtsignals mittels einer jedem Bildpunkt des Bildsensor zugeordneten elektrischen Verschlusseinrichtung; und
- mindestens dreimaliges Öffnen und Schließen der elektrische Verschlusseinrichtung mit fester Phasenbeziehung zu dem zumindest einen Lichtimpuls, um mindestens drei Signale (S0, S1, S2) zu erfassen;
- wobei die zeitliche Dauer (tl) des Öffnens der elektrischen Verschlusseinrichtung jeweils gleich ist; und
- wobei die Phasenverschiebung (ϕ_1) zwischen dem ersten Öffnen und dem zweiten Öffnen gleich der Phasenverschiebung (ϕ_2) zwischen dem zweiten Öffnen und dem dritten Öffnen ist.

14. Computerprogramm zum Speichern auf einem Datenträger und zum Veranlassen einer Computervorrichtung zum Ausführen des Steuerverfahrens nach Anspruch 13, wenn das Computerprogramm auf der Computervorrichtung ausgeführt wird.

Es folgen 26 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

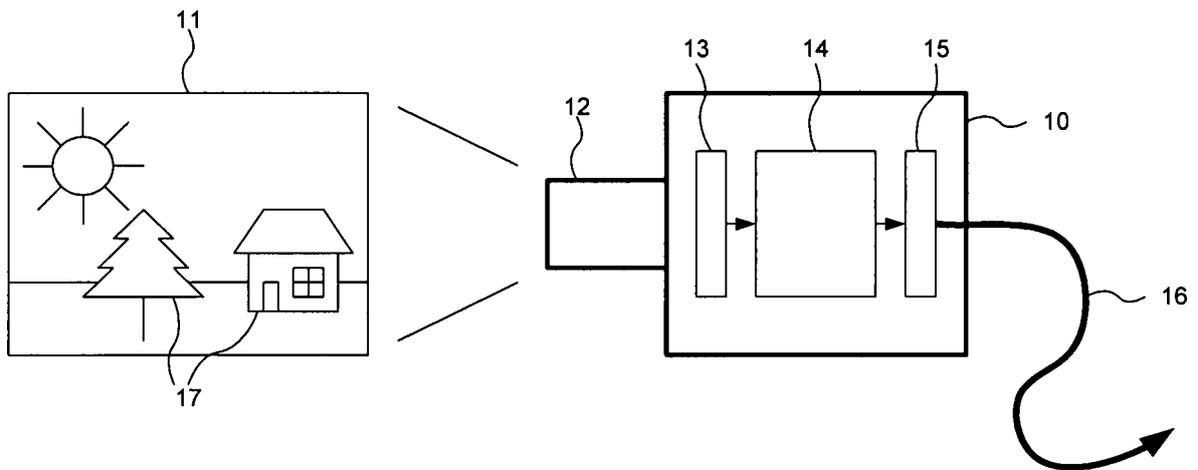


Fig. 1

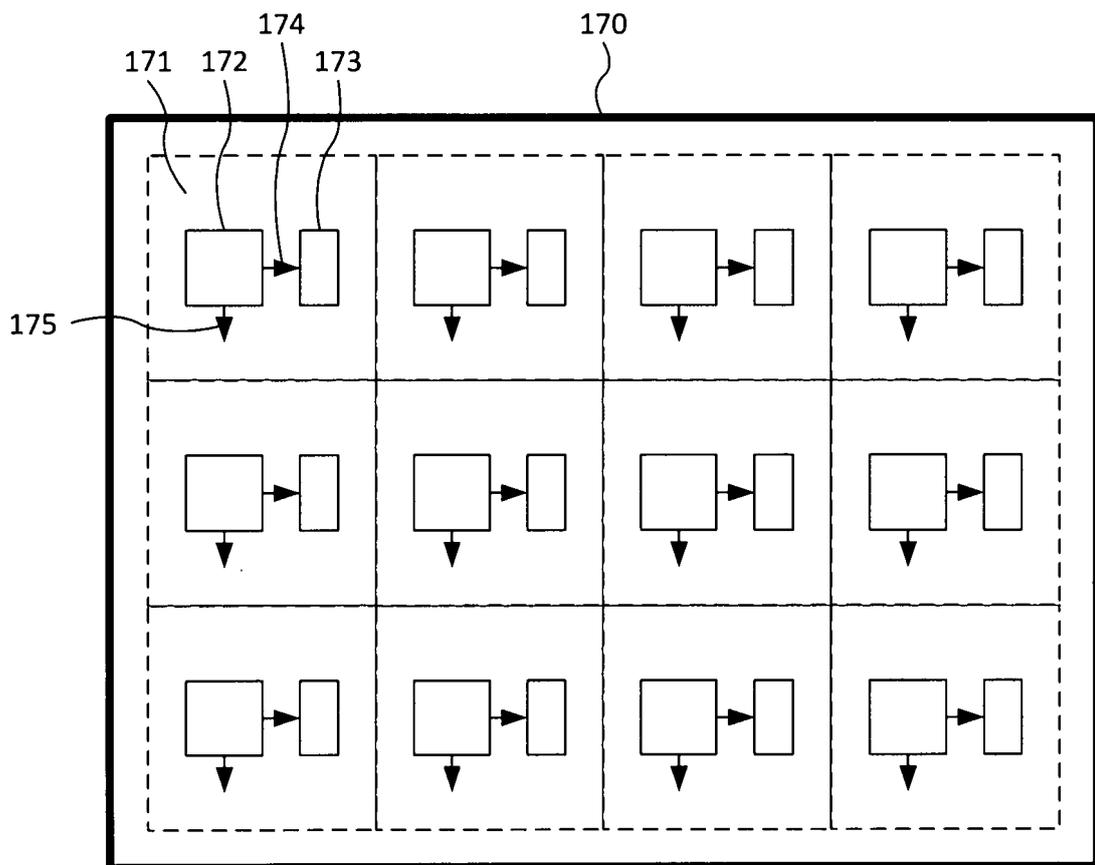


Fig. 2

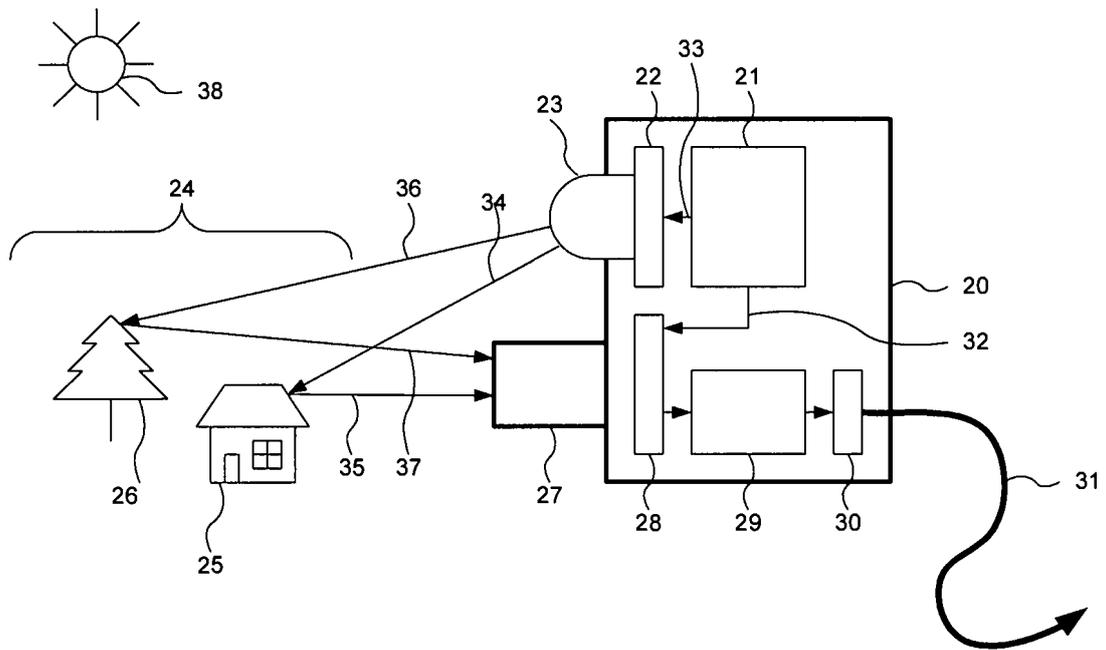


Fig. 3

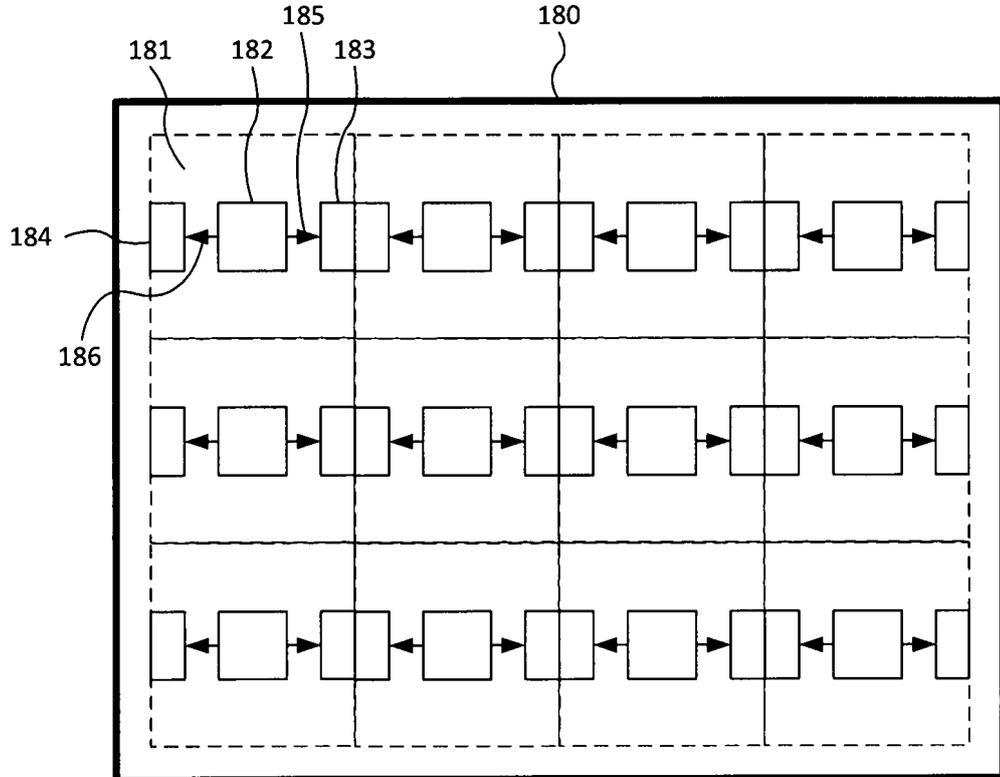


Fig. 4

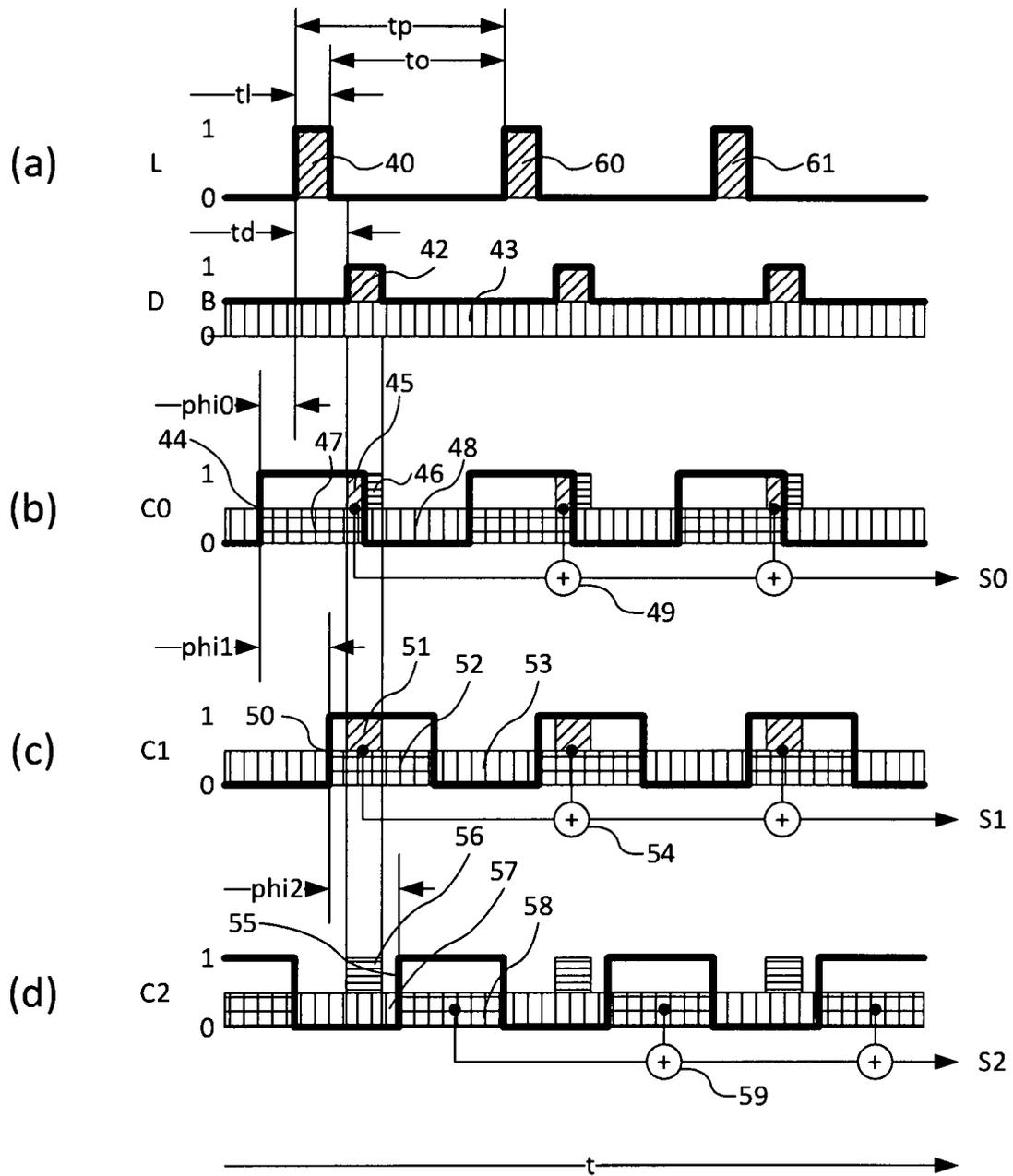


Fig. 5

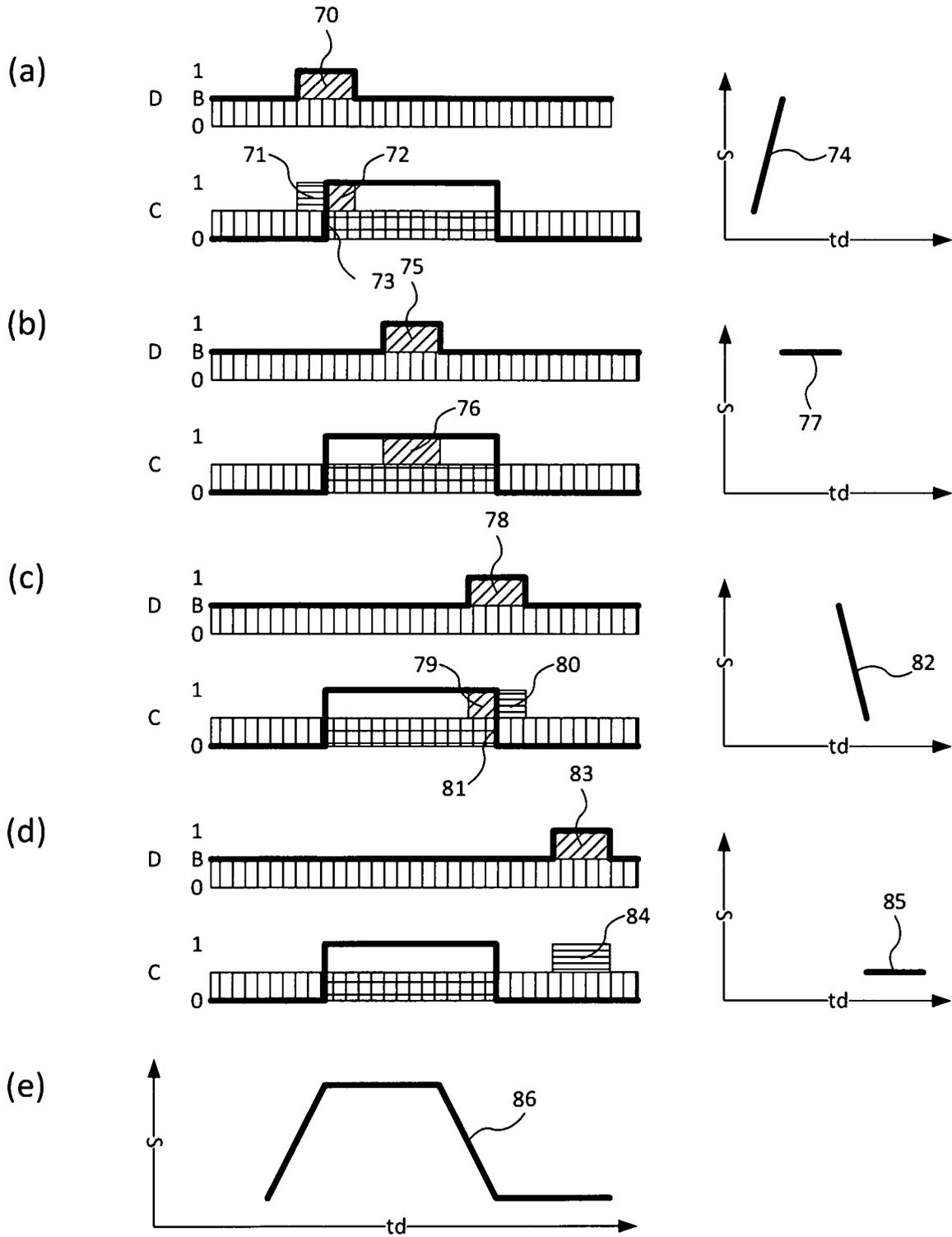


Fig. 6

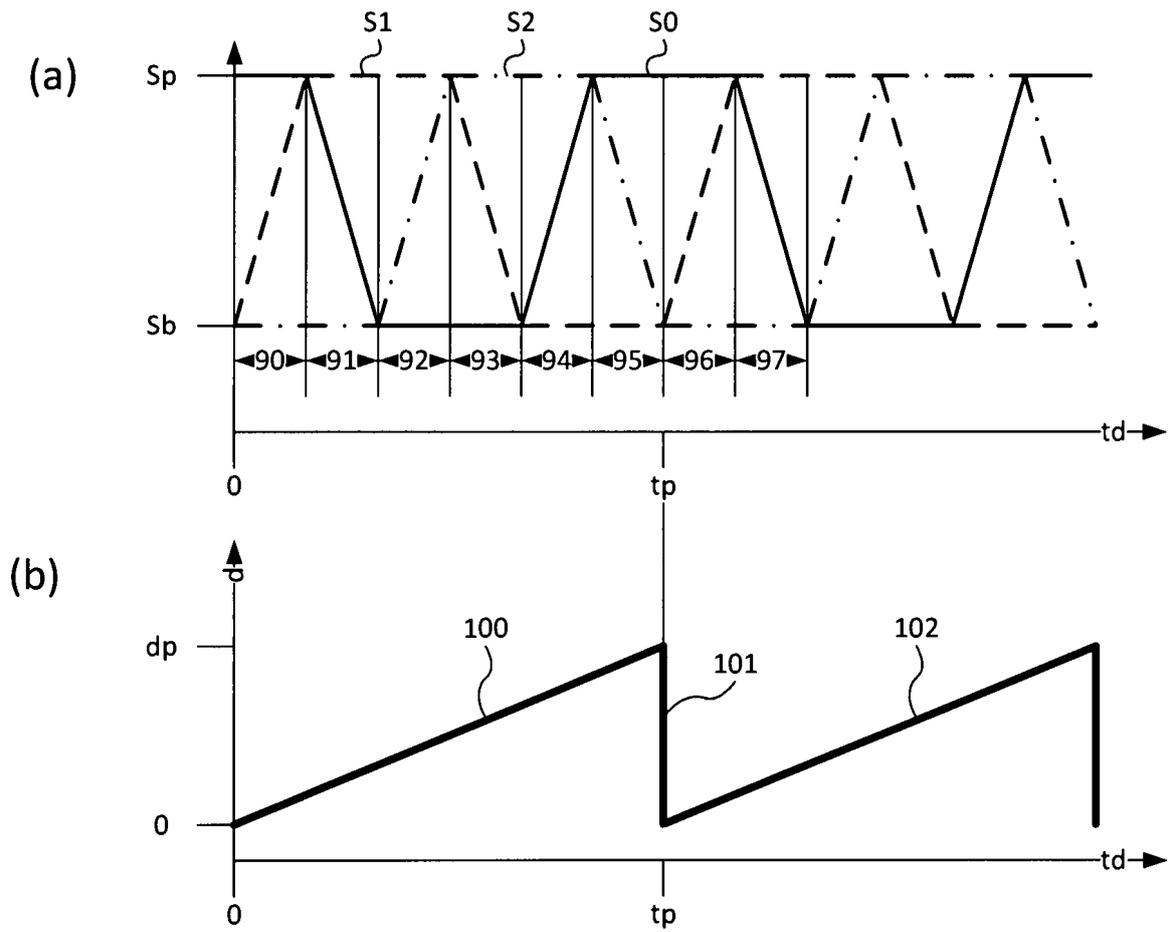


Fig. 7

$$d = \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} S2 \leq S1 < S0 : 0 + \frac{S1-S2}{S0-S2} \\ S2 < S0 \leq S1 : 1 + \frac{S1-S0}{S1-S2} \\ S0 \leq S2 < S1 : 2 + \frac{S2-S0}{S1-S0} \\ S0 < S1 \leq S2 : 3 + \frac{S2-S1}{S2-S0} \\ S1 \leq S0 < S2 : 4 + \frac{S0-S1}{S2-S1} \\ S1 < S2 \leq S0 : 5 + \frac{S0-S2}{S0-S1} \\ S0 = S1 = S2 : NaN \end{array} \right.$$

Fig. 8

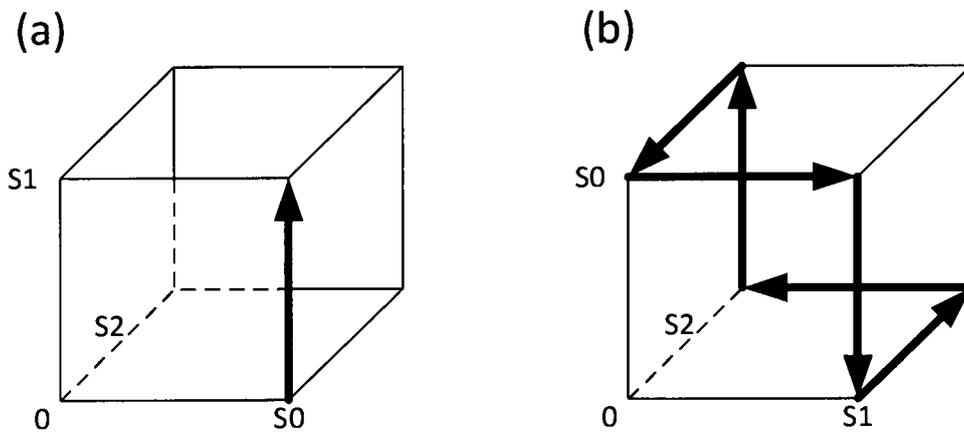


Fig. 9

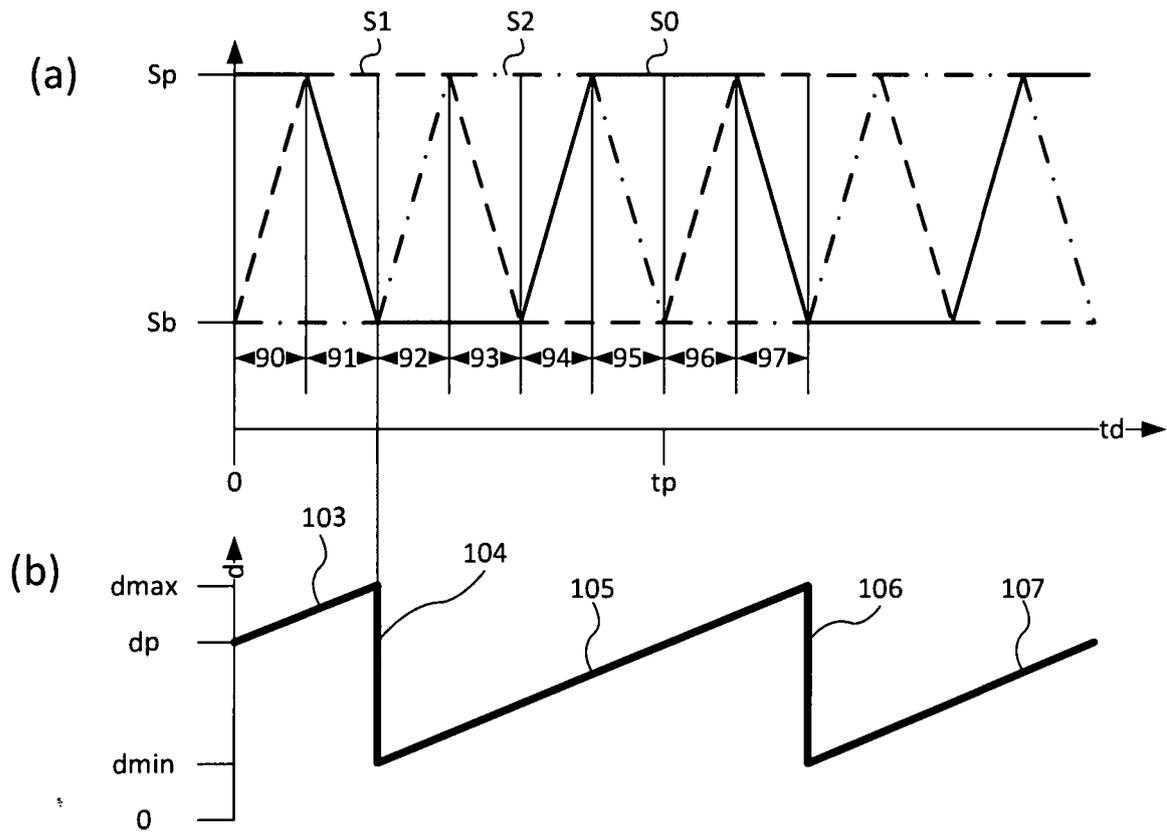


Fig. 10

$$d = \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} S_0 \leq S_2 < S_1 : 2 + \frac{S_2 - S_0}{S_1 - S_0} \\ S_0 < S_1 \leq S_2 : 3 + \frac{S_2 - S_1}{S_2 - S_0} \\ S_1 \leq S_0 < S_2 : 4 + \frac{S_0 - S_1}{S_2 - S_1} \\ S_1 < S_2 \leq S_0 : 5 + \frac{S_0 - S_2}{S_0 - S_1} \\ S_2 \leq S_1 < S_0 : 6 + \frac{S_1 - S_2}{S_0 - S_2} \\ S_2 < S_0 \leq S_1 : 7 + \frac{S_1 - S_0}{S_1 - S_2} \\ S_0 = S_1 = S_2 : \text{NaN} \end{array} \right.$$

Fig. 11

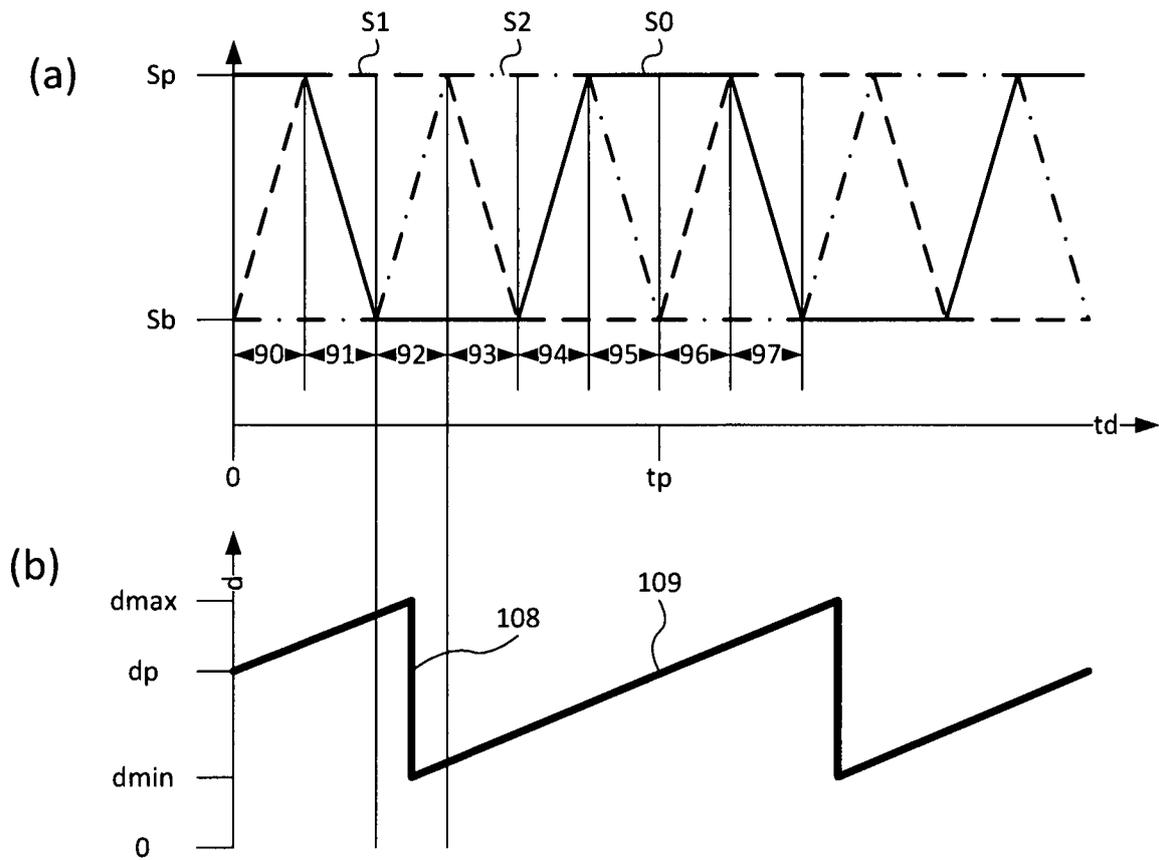


Fig. 12

$$d = \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \begin{array}{l} S_0 \leq S_2 < S_1 \\ \& \\ S_2 - S_0 \geq 0.5 \cdot (S_1 - S_0) \end{array} : 2 + \frac{S_2 - S_0}{S_1 - S_0} \\ \\ \begin{array}{l} S_0 < S_1 \leq S_2 \end{array} : 3 + \frac{S_2 - S_1}{S_2 - S_0} \\ \\ \begin{array}{l} S_1 \leq S_0 < S_2 \end{array} : 4 + \frac{S_0 - S_1}{S_2 - S_1} \\ \\ \begin{array}{l} S_1 < S_2 \leq S_0 \end{array} : 5 + \frac{S_0 - S_2}{S_0 - S_1} \\ \\ \begin{array}{l} S_2 \leq S_1 < S_0 \end{array} : 6 + \frac{S_1 - S_2}{S_0 - S_2} \\ \\ \begin{array}{l} S_2 < S_0 \leq S_1 \end{array} : 7 + \frac{S_1 - S_0}{S_1 - S_2} \\ \\ \begin{array}{l} S_0 \leq S_2 < S_1 \\ \& \\ S_2 - S_0 < 0.5 \cdot (S_1 - S_0) \end{array} : 8 + \frac{S_2 - S_0}{S_1 - S_0} \\ \\ S_0 = S_1 = S_2 : \text{NaN} \end{array} \right.$$

Fig. 13

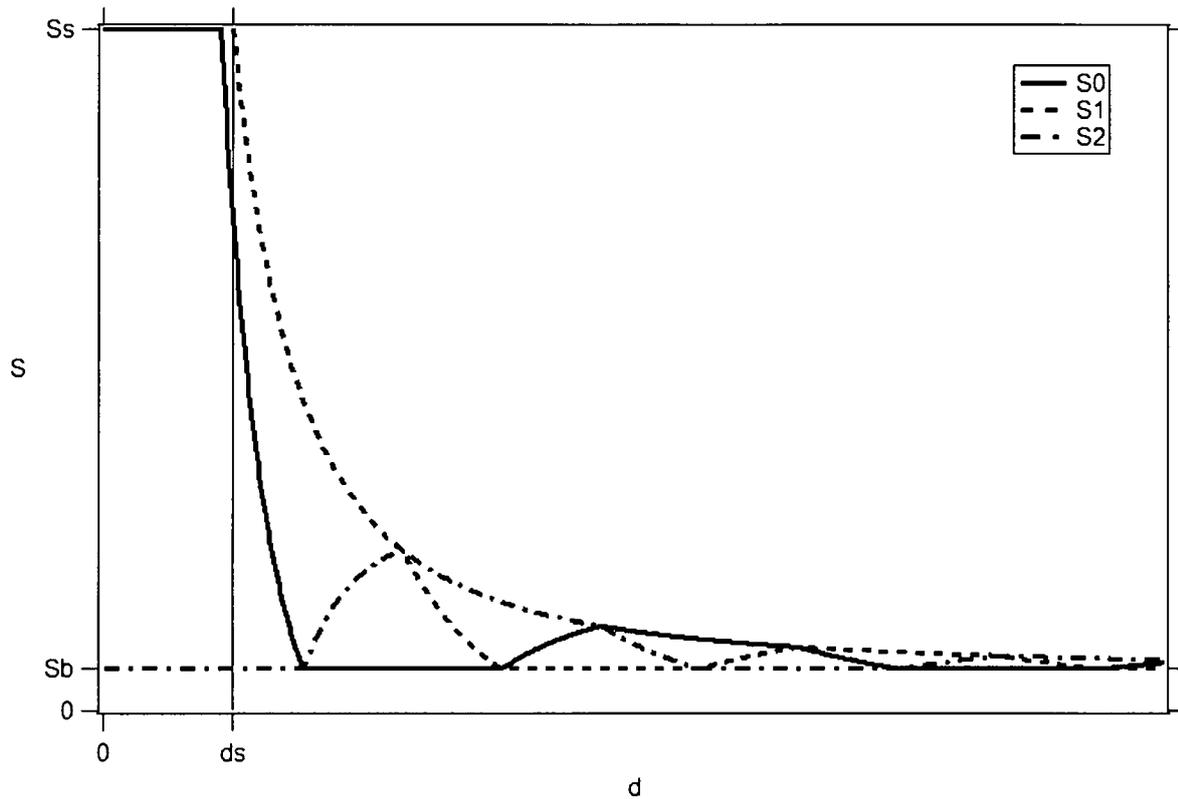


Fig. 14

$$Nd = \frac{c \cdot tl}{2} \cdot \frac{\sqrt{NS0^2 (S1-S2)^2 + NS1^2 (S2-S0)^2 + NS2^2 (S0-S1)^2}}{(\max(S0, S1, S2) - \min(S0, S1, S2))^2}$$

Fig. 15

$$\underbrace{\text{Lim}^2}_{210} \cdot \underbrace{\frac{12}{K \cdot c^2 \cdot tl^2}}_{211} \cdot \underbrace{(|S0-S1|+|S1-S2|+|S2-S0|)^2}_{212} \geq \underbrace{3(K \cdot Nd^2 - o) + S0+S1+S2}_{213}$$

Fig. 16

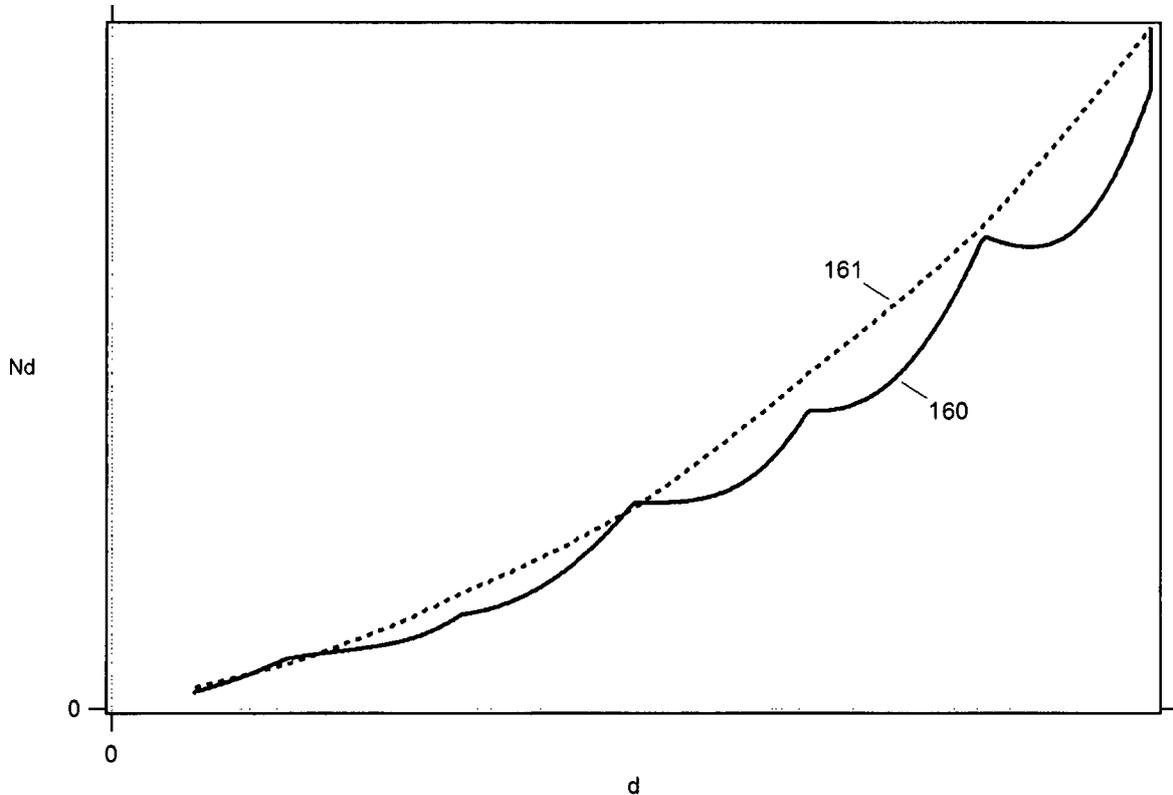


Fig. 17

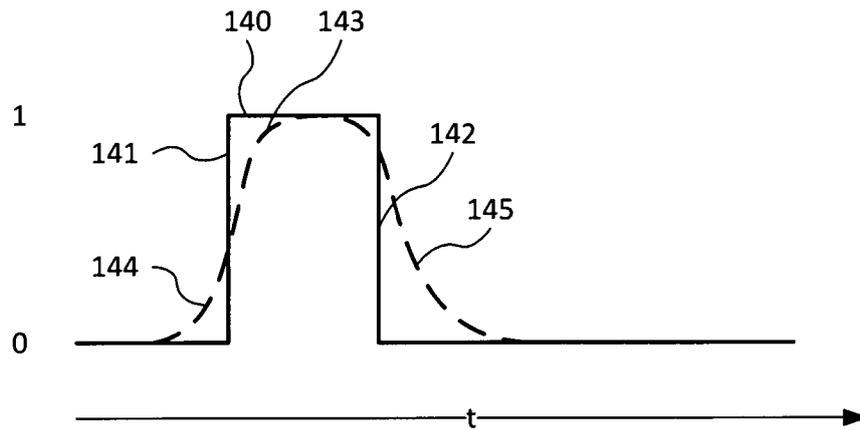


Fig. 18

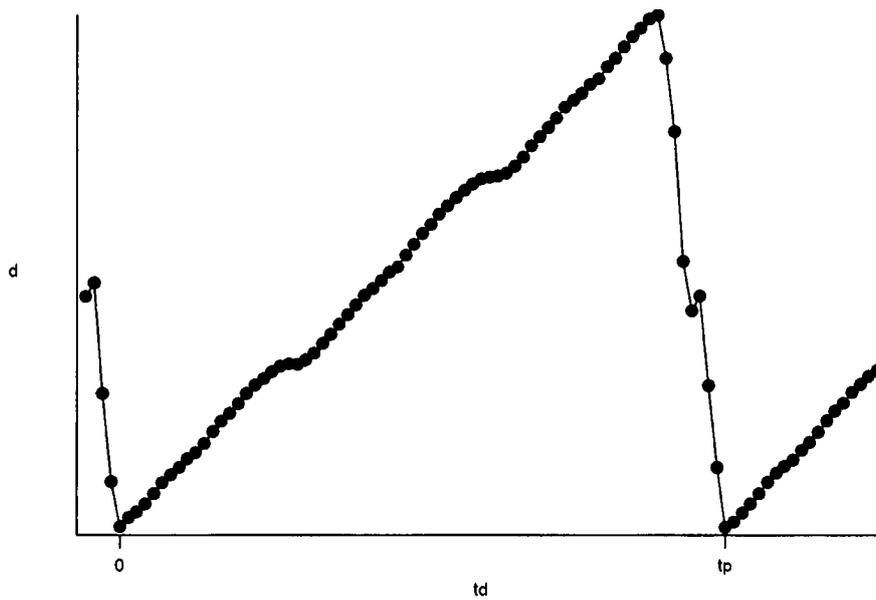


Fig. 19

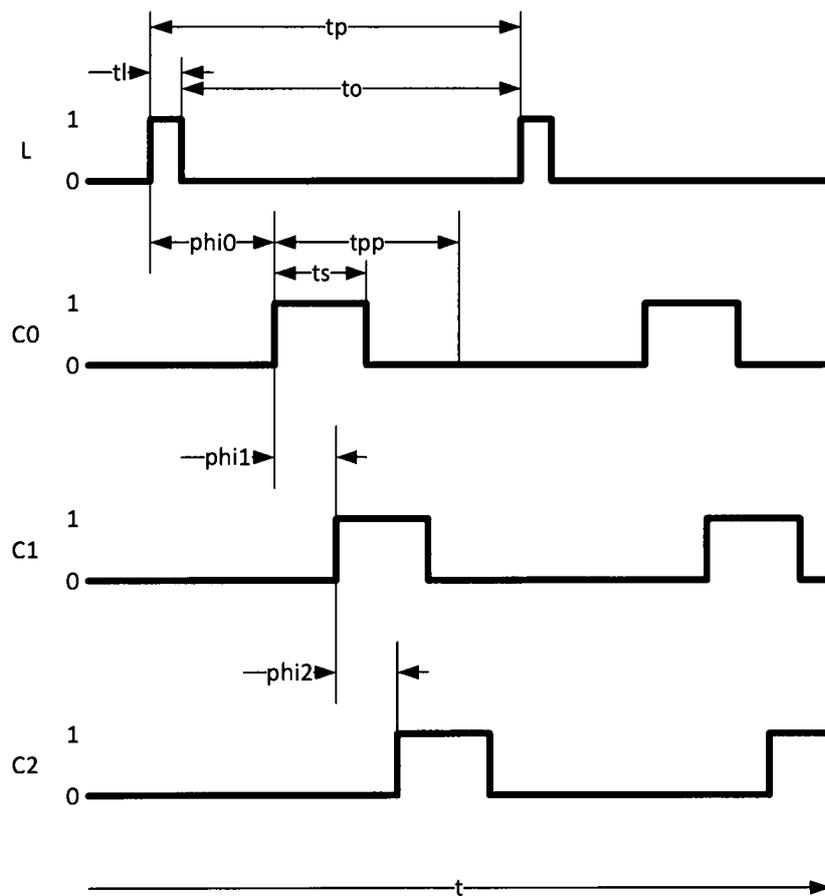


Fig. 20

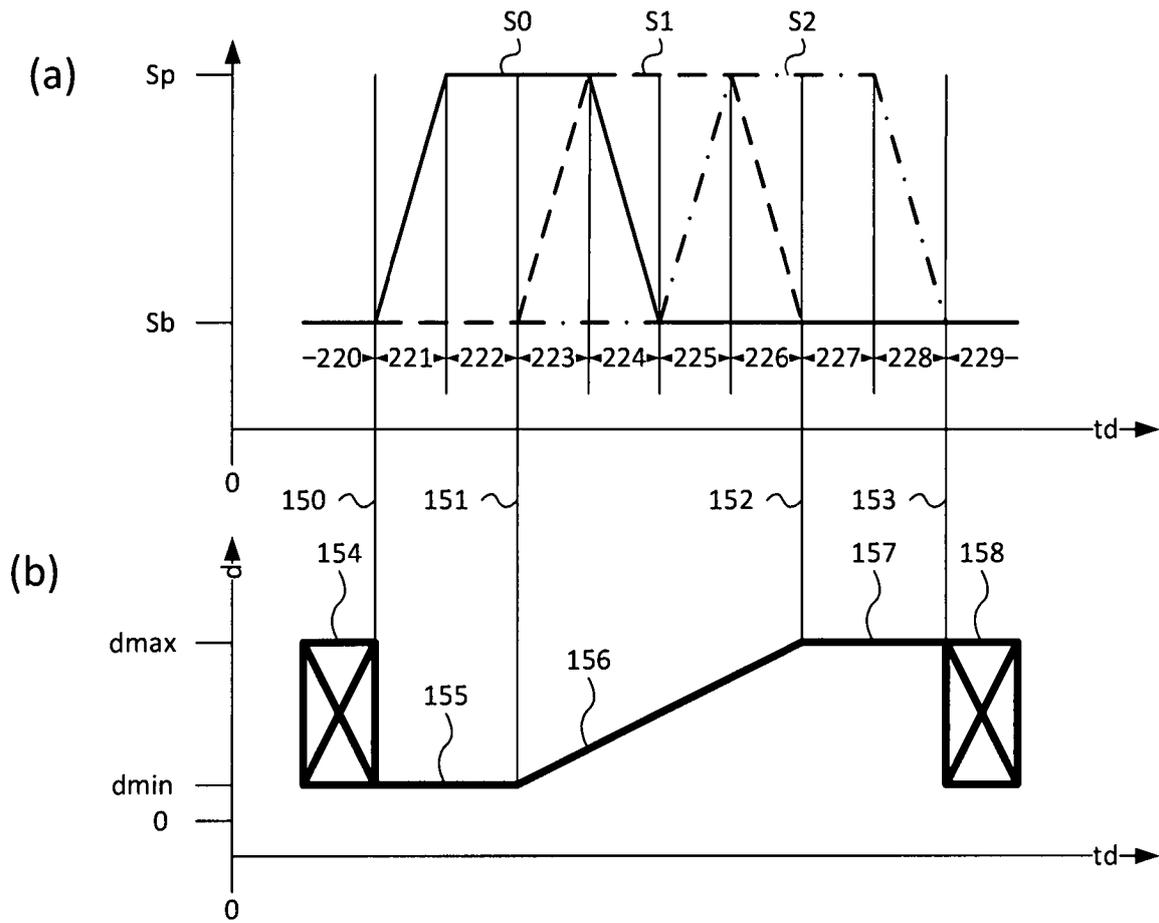


Fig. 21

$$d = d_{\min} + \frac{c \cdot t_l}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} S2 \leq S1 < S0 : 0 + \frac{S1-S2}{S0-S2} \\ S2 < S0 \leq S1 : 1 + \frac{S1-S0}{S1-S2} \\ S0 \leq S2 < S1 : 2 + \frac{S2-S0}{S1-S0} \\ S0 < S1 \leq S2 : 3 + \frac{S2-S1}{S2-S0} \\ S0 = S1 = S2 : \text{NaN} \end{array} \right.$$

Fig. 22

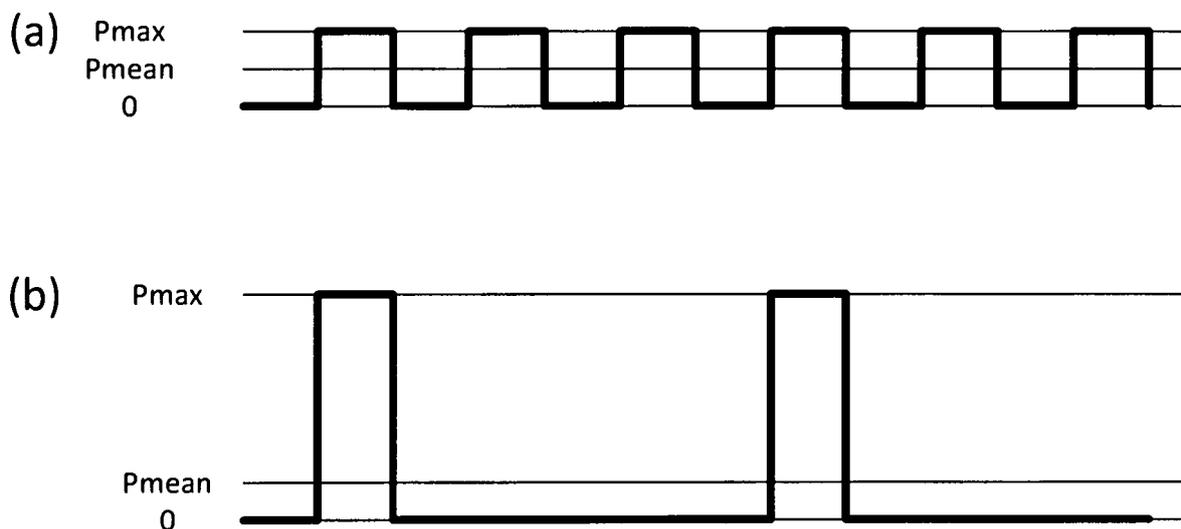


Fig. 23

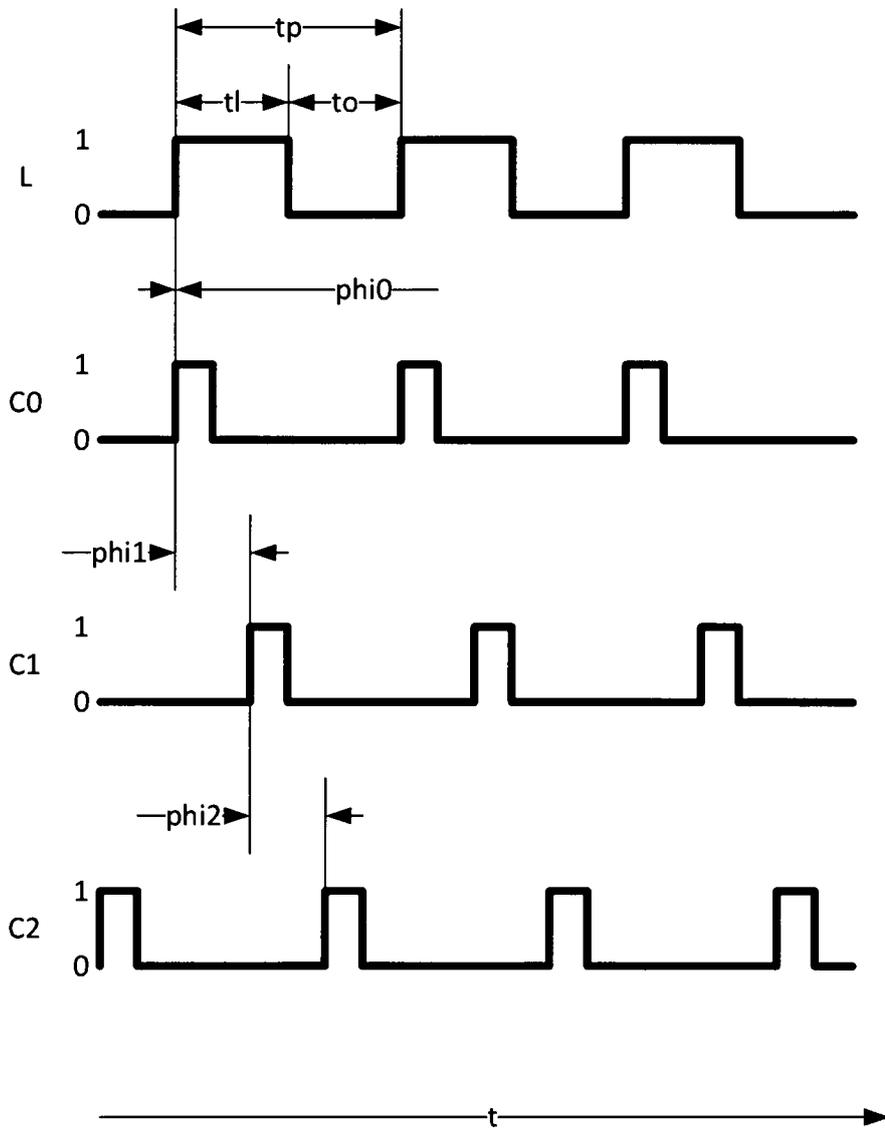


Fig. 24

$$N_d = \frac{c \cdot t_i}{6} \cdot \frac{\sqrt{NS_0^2 (S_1 - S_2)^2 + NS_1^2 (S_2 - S_0)^2 + NS_2^2 (S_0 - S_1)^2}}{(\max(S_0, S_1, S_2) - \min(S_0, S_1, S_2))^2}$$

Fig. 25

$$\underbrace{\text{Lim}^2}_{170} \cdot \underbrace{\frac{108}{K c^2 t_i^2}}_{171} \cdot \underbrace{(|S_0-S_1|+|S_1-S_2|+|S_2-S_0|)^2}_{172} \geq \underbrace{3(K \cdot n d^2 - o) + S_0+S_1+S_2}_{173}$$

Fig. 26

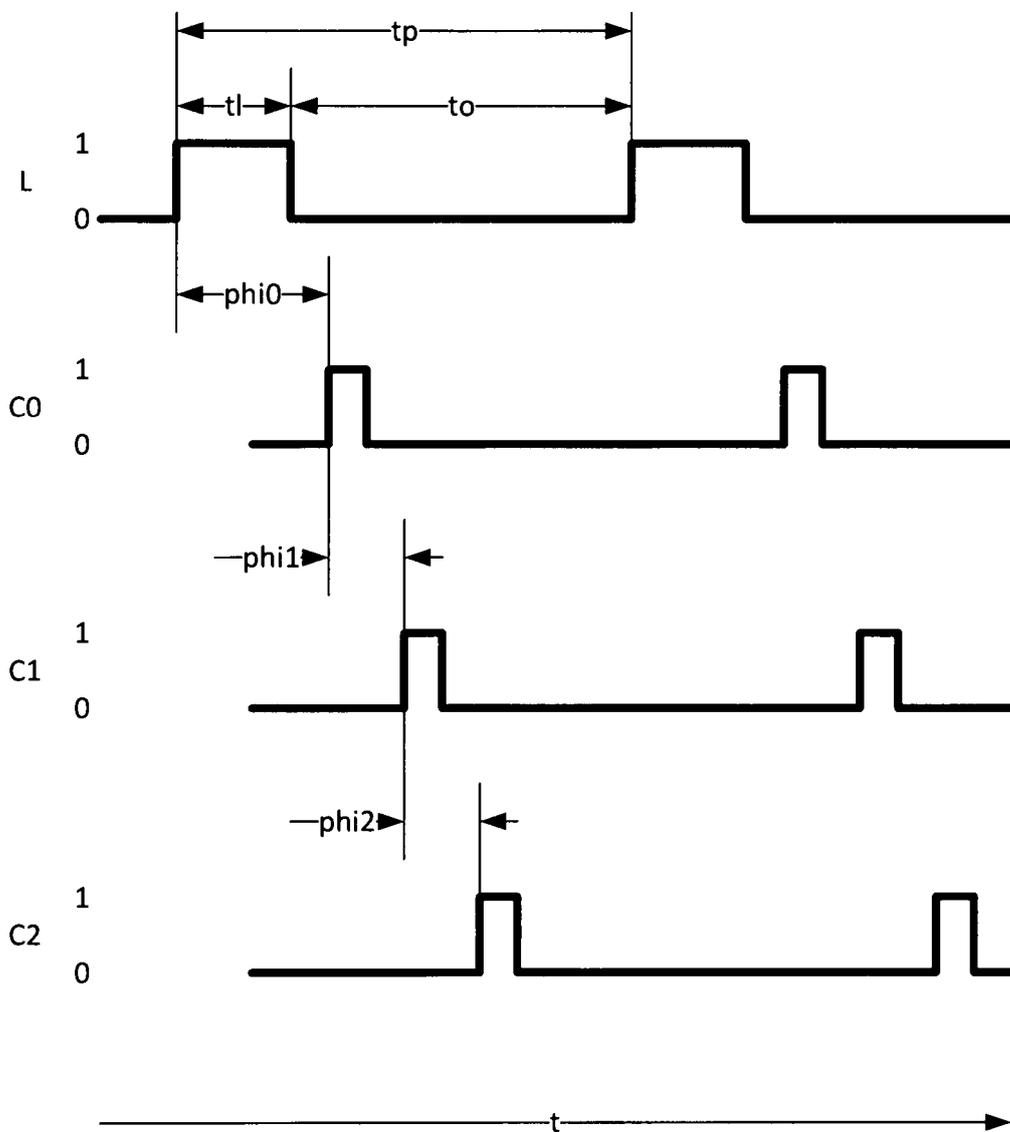


Fig. 27

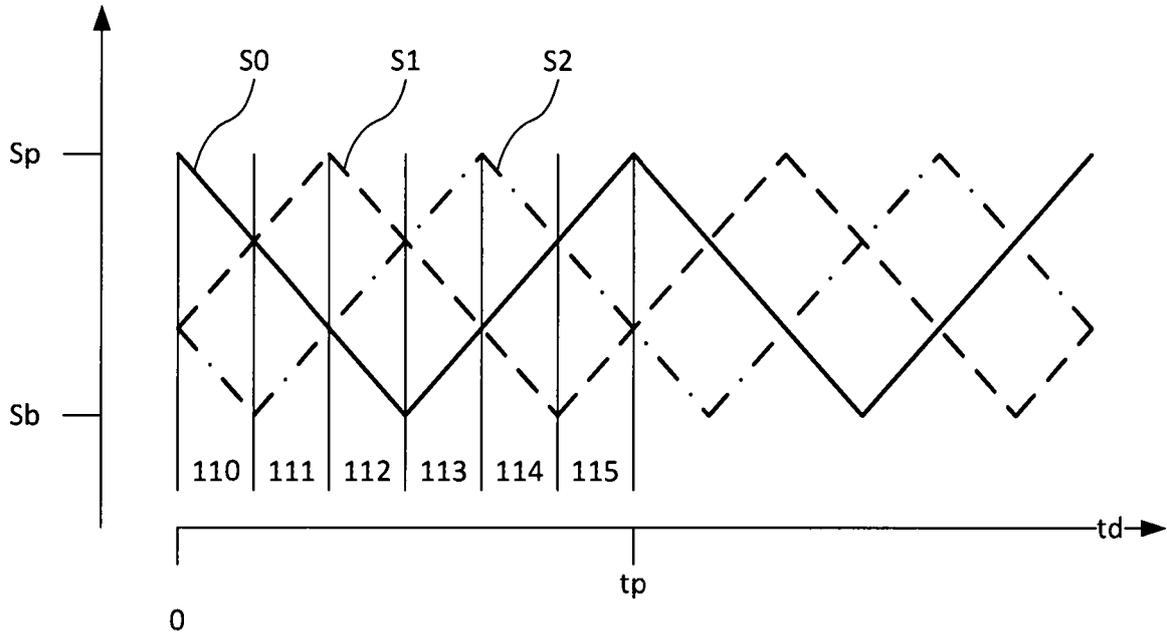


Fig. 29

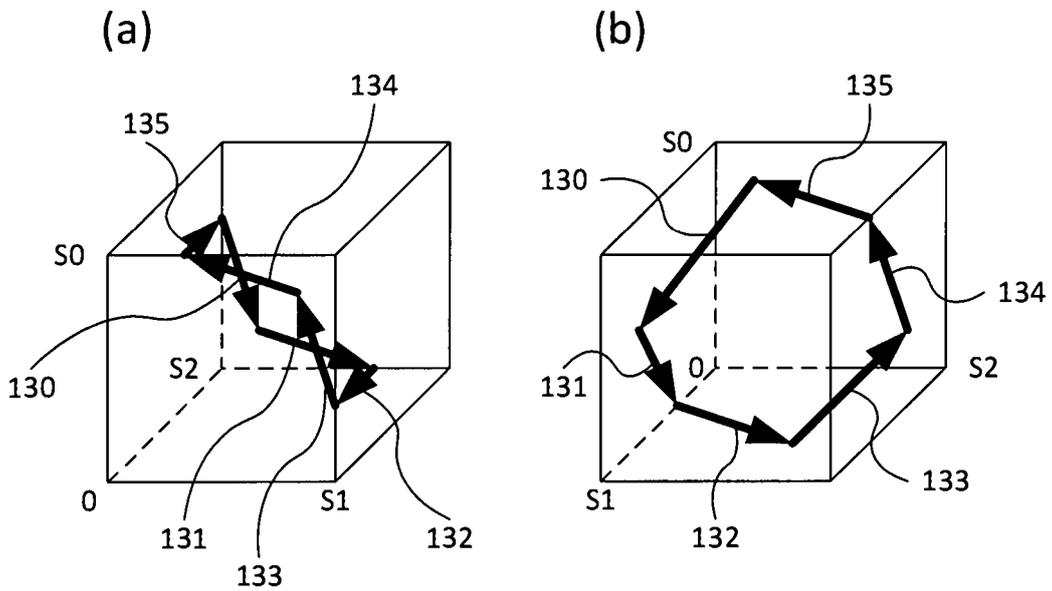


Fig. 30

$$d = \frac{c \cdot t_1}{6} \cdot \left\{ \begin{array}{l} S2 \leq S1 < S0 : 0 + \frac{S1-S2}{S0-S2} \\ S2 < S0 \leq S1 : 1 + \frac{S1-S0}{S1-S2} \\ S0 \leq S2 < S1 : 2 + \frac{S2-S0}{S1-S0} \\ S0 < S1 \leq S2 : 3 + \frac{S2-S1}{S2-S0} \\ S1 \leq S0 < S2 : 4 + \frac{S0-S1}{S2-S1} \\ S1 < S2 \leq S0 : 5 + \frac{S0-S2}{S0-S1} \\ S0=S1=S2 : \text{NaN} \end{array} \right.$$

Fig. 31

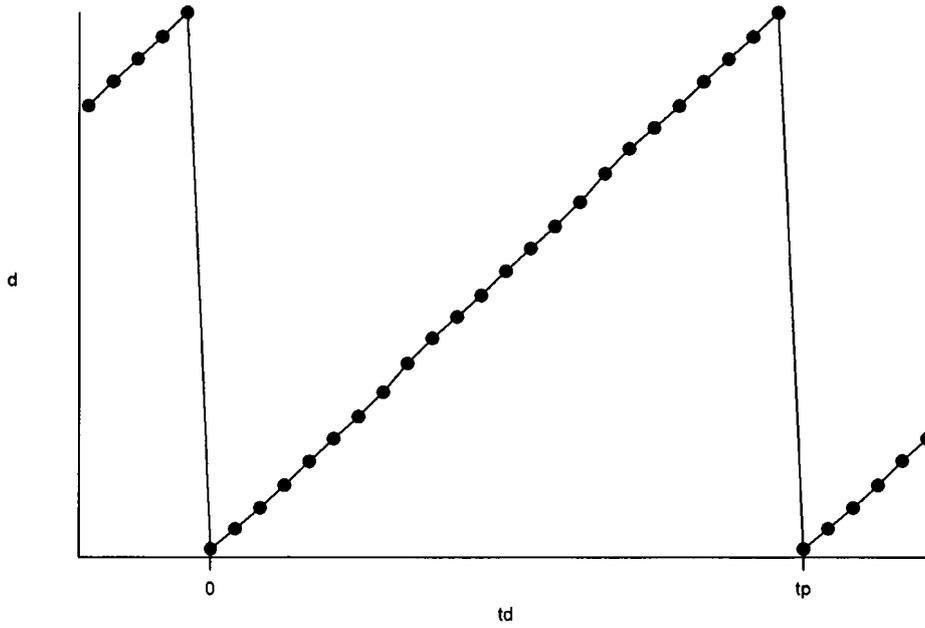


Fig. 32

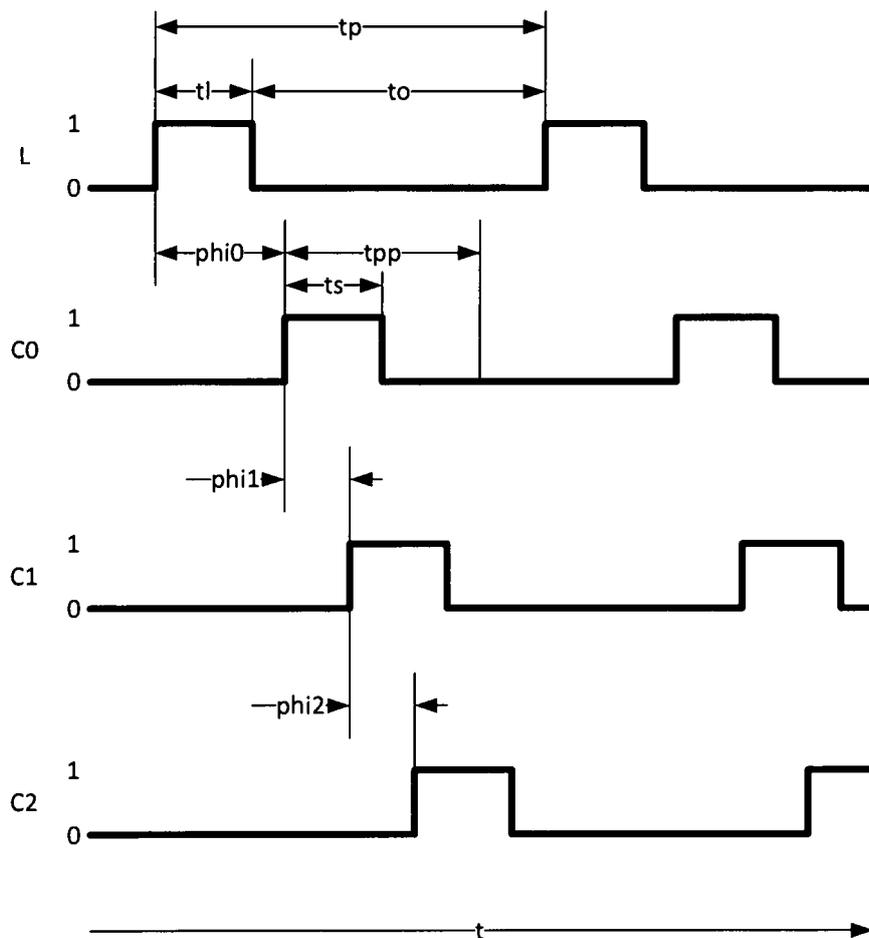


Fig. 33

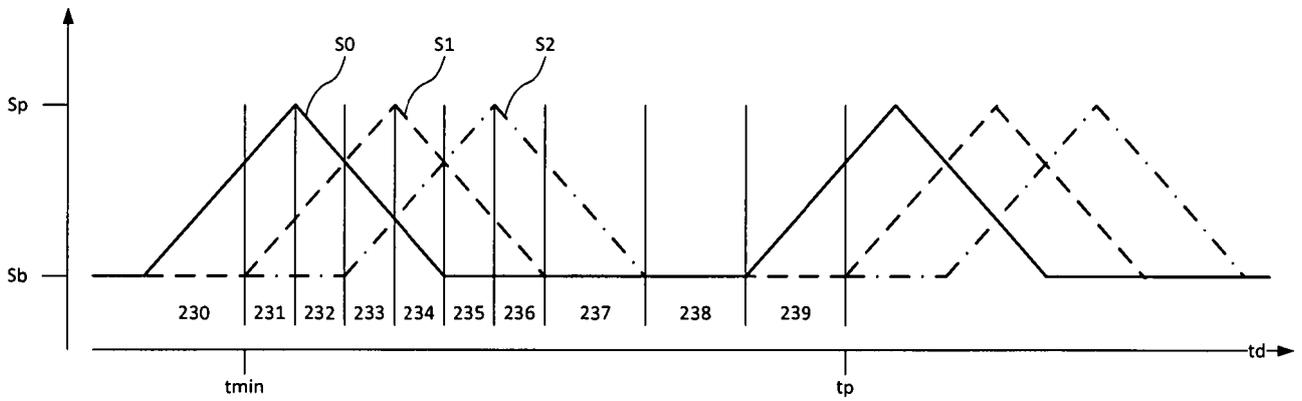


Fig. 34

$$d = \frac{c}{2} \cdot \left(t_{dmin} + \frac{t_i}{3} \cdot \left\{ \begin{array}{l} (S0 > S1) \ \& \ (S0 > S2) \ \& \ (S0 - S2 > 3 \cdot (S1 - S2)): \quad 0+ \quad 2 \cdot \frac{S1 - S2}{S0 - S1} \\ (S0 > S1) \ \& \ (S0 > S2) \ \& \ (S0 - S2 \leq 3 \cdot (S1 - S2)): \quad 2+ \quad 2 \cdot \frac{S1 - S0}{S0 + S1 - 2 \cdot S2} \\ (S1 > S0) \ \& \ (S1 > S2) \ \& \ (S0 > S2): \quad 3+ \quad \frac{S2 - S0}{S1 - S2} \\ (S1 > S0) \ \& \ (S1 > S2) \ \& \ (S0 \leq S2): \quad 3+ \quad \frac{S2 - S0}{S1 - S0} \\ (S2 > S0) \ \& \ (S2 > S1) \ \& \ (S2 - S0 \leq 3 \cdot (S1 - S0)): \quad 4+ \quad 2 \cdot \frac{S2 - S1}{S2 + S1 - 2 \cdot S0} \\ (S2 > S0) \ \& \ (S2 > S1) \ \& \ (S2 - S0 > 3 \cdot (S1 - S0)): \quad 6+ \quad 2 \cdot \frac{S0 - S1}{S2 - S1} \end{array} \right. \right)$$

Fig. 35

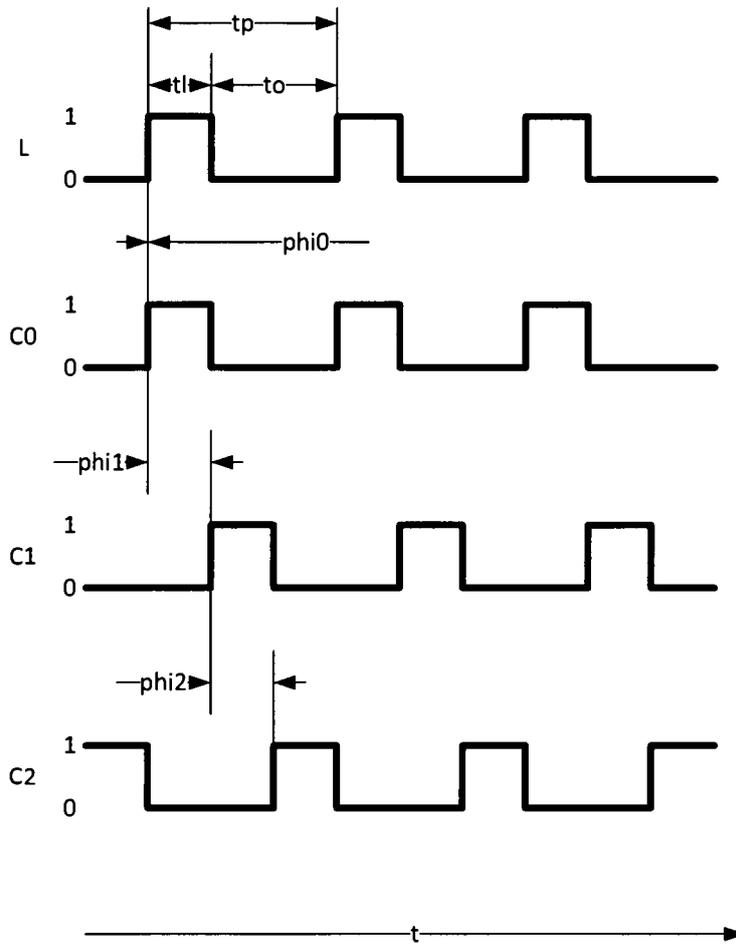


Fig. 36

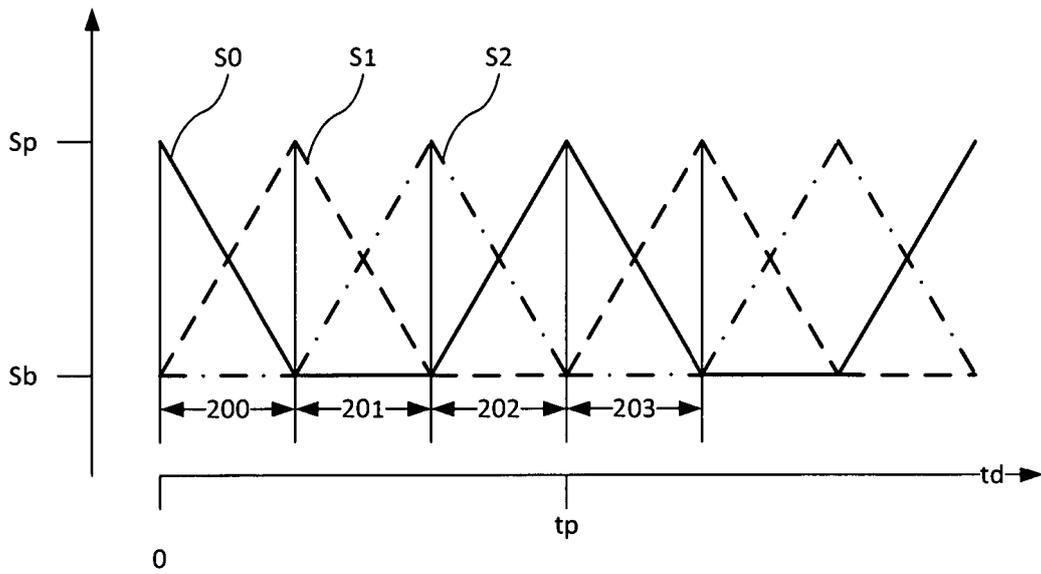


Fig. 37

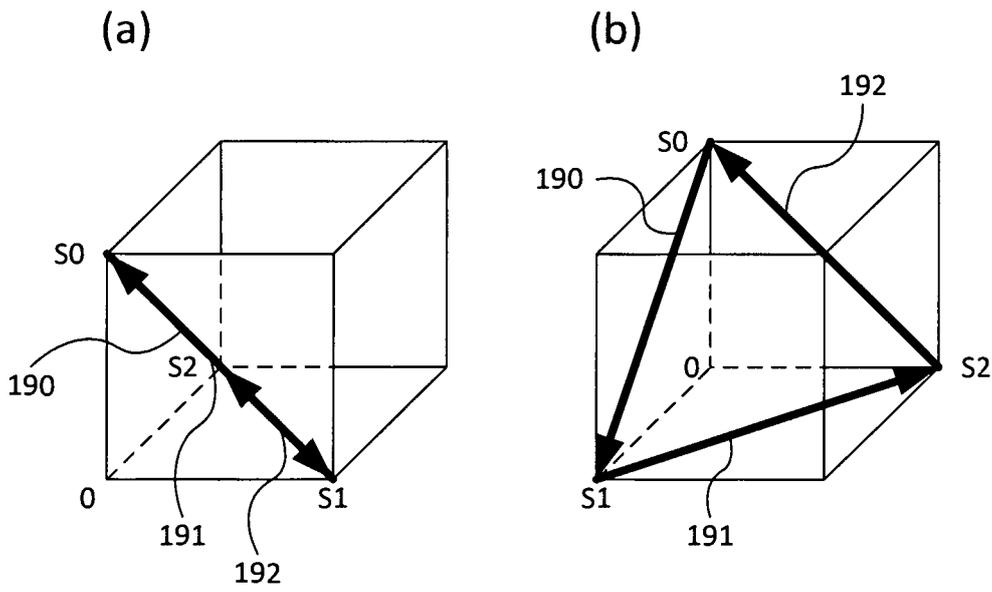


Fig. 38

$$d = \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} (S2 < S0) \ \& \ (S2 < S1): \ 0 + \frac{S1 - S2}{S0 + S1 - 2 \cdot S2} \\ (S0 < S1) \ \& \ (S0 < S2): \ 1 + \frac{S2 - S0}{S1 + S2 - 2 \cdot S0} \\ (S1 < S0) \ \& \ (S1 < S2): \ 2 + \frac{S0 - S1}{S2 + S0 - 2 \cdot S1} \end{array} \right.$$

Fig. 39

$$Nd = \frac{c \cdot t_i}{2} \cdot \frac{\sqrt{NS0^2 (S1 - S2)^2 + NS1^2 (S2 - S0)^2 + NS2^2 (S0 - S1)^2}}{(S0 + S1 + S2 - 3 \cdot \min(S0, S1, S2))^2}$$

Fig. 40

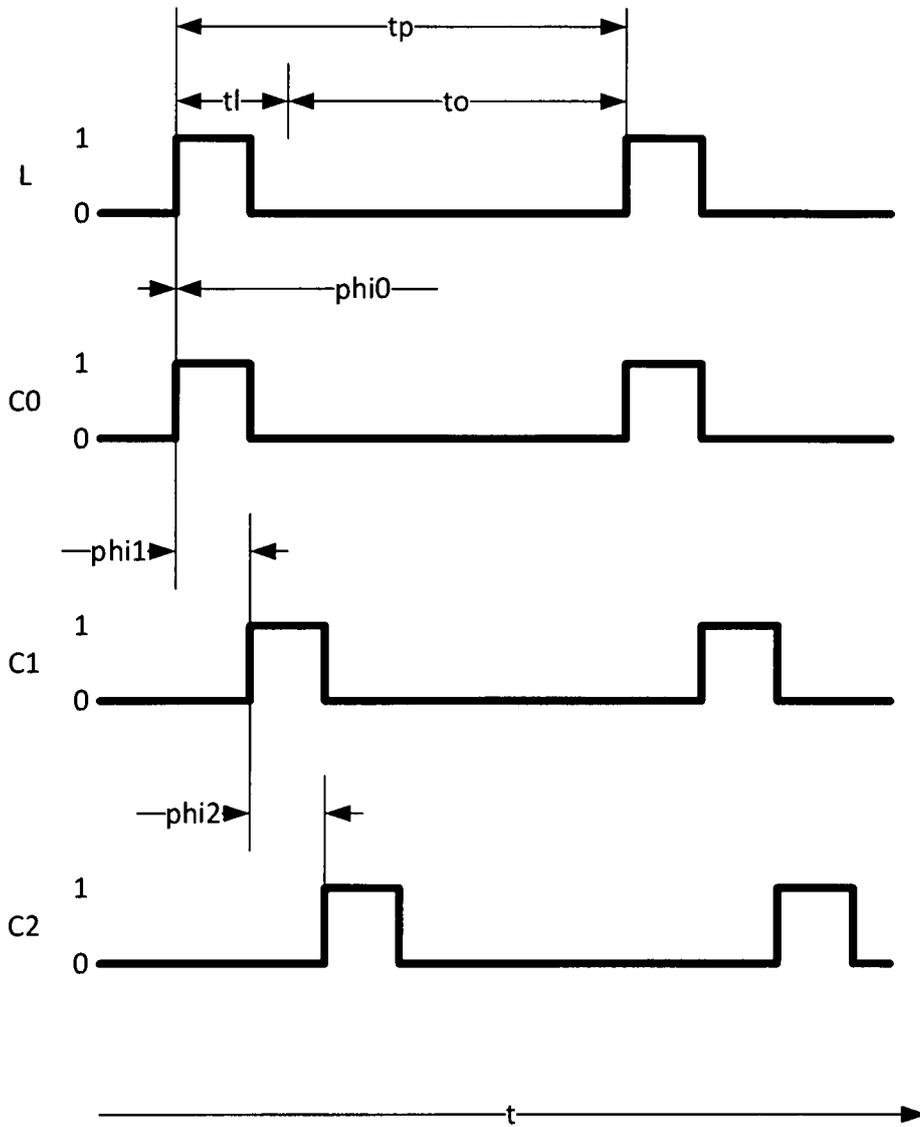


Fig. 41

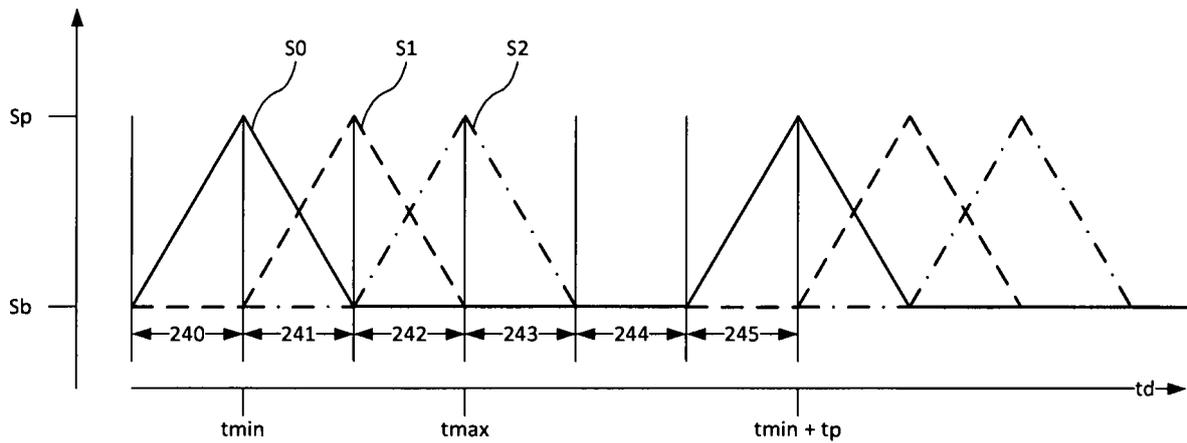


Fig. 42

$$d = \frac{c}{2} \cdot \left(t_{dmin} + \frac{t_i}{3} \cdot \left\{ \begin{array}{l} (S0 > S2): 1 + \frac{S1 - S0}{S0 + S1 - 2 \cdot S2} \\ (S0 \leq S2): 3 + \frac{S2 - S1}{S1 + S2 - 2 \cdot S0} \end{array} \right\} \right)$$

Fig. 43