

Range Imaging: 3D-Punktwolken in Echtzeit

Wilfried Karel, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

‘Range Imaging’ (*RIM*) bezeichnet die bildweise Erfassung von dreidimensionalen Punktwolken aus simultanen Laufzeitmessungen. Diese relativ junge Technik verbindet und ergänzt wesentliche Stärken von Photogrammetrie und Laserscanning, den beiden derzeit am weitesten verbreiteten Methoden zur automatisierten Massenpunktbestimmung. *RIM* spielt damit potenziell eine wesentliche Rolle in der weiteren Entwicklung des Vermessungswesens. Der vorliegende Artikel beschreibt die verwendeten Messprinzipien, den gegenwärtigen Entwicklungsstand und mögliche Anwendungen.

Schlüsselwörter: Range Imaging, optische 3D-Messtechnik, 3D-Objekterfassung, 3D-Punktwolke, Echtzeit, Einzelphotonen-Lawinendiode, SPAD, Mehrfache Doppel-Kurzzeitbelichtung, MDSI, Photomischdetektor, PMD, lock-in Pixel, Photogrammetrie, Laserscanning

Abstract

‘Range Imaging’ (*RIM*) denotes the image-wise capture of three-dimensional point clouds employing simultaneous time-of-flight measurements. This relatively new technique combines and supplements essential strengths of Photogrammetry and Laserscanning, the most widely used methods for automated bulk point acquisition today. This way, *RIM* potentially plays a major role in the further evolution of surveying engineering. The present article outlines the measurement principles, the state-of-the-art and possible applications.

Keywords: Range Imaging, Optical 3D-Measurement Technique, 3D-Object Capture, 3D-Point Cloud, Real-Time, Single Photon Avalanche Diode, SPAD, Multiple Double Short Time Integration, MDSI, Photonic Mixer Device, PMD, Lock-In Pixel, Photogrammetry, Laserscanning

1. Einleitung

Die massenweise Erfassung von (3D-) Objektpunkten zählt zu den Hauptaufgaben der Photogrammetrie. Mehrfach und aus unterschiedlichen Blickrichtungen in Schwarzweiß-, Farb-, oder auch Infrarotbildern abgelenkte Punkte werden dabei mittels Vorwärtsschnitt rekonstruiert. Die Photogrammetrie liefert zwar in sich stabile Strahlenbündel, benötigt für diese Aufgabe aber grundsätzlich mehrere Aufstellungspunkte und ist auf kontrastreiche Oberflächen angewiesen, welche gegebenenfalls durch Markierungen oder Lichtprojektionen hergestellt werden müssen. Die Aufnahme bewegter Szenen erfordert zeitgleiche Abbildungen des Objektraums. Ursprünglich nur manuell, kann heute die Auswertung unter gewissen Bedingungen automatisch erfolgen. Die automatische Bestimmung von Punktkorrespondenzen ist jedoch rechenintensiv und mitunter fehleranfällig.[13]

Auch aus diesen Gründen hat sich in den letzten Jahren immer mehr das Laserscanning als Methode zur automatisierten Bestimmung von Massenpunkten durchgesetzt. Bei dieser Technik

wird die Distanzinformation unmittelbar aus Laufzeitmessungen gewonnen. Es entfällt somit zwar die Suche nach homologen Punkten, aber auch das Laserscanning birgt eine wesentliche Schwäche: die Erfassung der Punkte erfolgt sequenziell, die einzelnen Punkte beziehen sich also auf unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte. Deshalb muss auf bewegten Plattformen (z.B. luftgestützt) die äußere bzw. relative Orientierung jedenfalls extern beobachtet werden (direkte Georeferenzierung), typischerweise geschieht dies durch Satellitennavigations- und Inertialmesssysteme [23]. Weiters schränkt die Asynchronität der Punktmessungen die Erfassung bewegter Szenen ein bzw. erschwert sie den mobilen Einsatz dieser Technik. Die Verwendung von Laserscannern auf vibrierendem oder schwingendem Untergrund ist zumindest problematisch. Schließlich umfasst ihre Konstruktion hochpräzise bewegliche Komponenten, die einen wesentlichen Teil der Produktionskosten verursachen [26].

RIM scheint die Vorteile der beiden etablierten Methoden optimal zu kombinieren: die Distanzmessung erfolgt einerseits wie beim Laserscanning direkt über die Laufzeit, andererseits jedoch

nicht sequenziell, sondern simultan an tausenden Pixeln (px) einer Bildmatrix. Die Messung benötigt keine Oberflächentextur und pro Punkt nur einen Sehstrahl, was die Anzahl nötiger Aufstellungen bei komplex geformten Oberflächen minimiert und auch bei engen räumlichen Verhältnissen einen wesentlichen Vorteil darstellt. Die in sich stabilen Strahlenbündel der Photogrammetrie werden somit durch Vektorbündel ersetzt. Auf Grund der bildweisen Erfassung können gesamte Blickfelder in sich bewegter Objekträume detailreich zum gleichen Zeitpunkt bestimmt werden und die direkte Beobachtung der äußeren Orientierung auch auf bewegten Plattformen entfallen. Die kompakten Ausmaße der Kameras steigern ihre Eignung für mobile Anwendungen noch weiter. Die ohne mechanische Komponenten auskommende, miniaturisierte Konstruktion verringert den Energieverbrauch im Betrieb und ermöglicht niedrige Verkaufspreise, vergleichbar zu jenen digitaler Spiegelreflex-Kameras. Mit Raten von (typisch) bis zu 30 Bildern pro Sekunde (f_{ps}) liefert *RIM* 3D-Punktwolken in Echtzeit.

Abschnitt 2 erläutert die den verschiedenen *RIM*-Techniken gemeinsamen Prinzipien, Abschnitt 3 beschreibt die verwendeten Signalformen. Abschnitt 4 widmet sich sodann den einzelnen Methoden zur Laufzeitmessung und, soweit vorhanden, den jeweiligen kommerziell erhältlichen Realisierungen von *RIM*-Kameras. Abschnitt 5 listet gegenwärtige Anwendungen dieser noch relativ jungen Technik auf, Abschnitt 6 schlägt schließlich Verwendungen im Bereich des Vermessungswesens vor.

2. Grundprinzip

Im *RIM* werden derzeit unterschiedliche Signalformen und Laufzeitmessmethoden eingesetzt (s. Abschnitte 3 und 4). In jedem Fall aber wird Licht in Richtung Objekt emittiert (aktives System), dort teilweise zurück Richtung Kamera reflektiert und schließlich durch die Kameraoptik auf den Sensor projiziert. Die Lichtquelle moduliert die ausgesandte Trägerwelle mit einem je nach *RIM*-Technik unterschiedlichen Signal, das am Sensor wieder demoduliert wird, um auf die Laufzeit rückzuschließen. Aus dieser wiederum wird die Objektdistanz wie folgt gewonnen:

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t \quad (1)$$

Wobei t die detektierte Laufzeit und c die Gruppengeschwindigkeit der Trägerwelle in der durchlaufenen Atmosphäre bezeichnet.

Um Abschattungen zu vermeiden, wird das Licht nahe der Optik oder koaxial ausgesandt. Die Lichtquelle beleuchtet das gesamte Sichtfeld der Kamera und dient sämtlichen Pixeln gleichzeitig. Als Beleuchtung dient langwelliges sichtbares oder nahes Infrarotlicht aus Leuchtdioden (*light-emitting diodes*, LED) oder Lasern, entsprechend wird Licht eines gewissen Frequenzbandes oder auch monochromatisches Licht ausgesandt.

Optische Frequenzbandfilter sind jedenfalls zwischen Objektiv und Sensor angebracht, um Hintergrundlicht weitestgehend zu unterdrücken und nur Licht der emittierten Wellenlänge(n) bis zum Sensor durchdringen zu lassen.

Die für viele Anwendungen geforderte Einhaltung der Augensicherheit auch nahe der Lichtquelle beschränkt ihre zulässige Strahlungsleistung nach oben hin. Diese verteilt sich am Objekt über das gesamte Blickfeld, was zu einer im Vergleich zu Laserscannern und Tachymetern schwächeren maximalen Bestrahlungsstärke führt und daher den Distanzmessbereich grundsätzlich stärker limitiert.

3. Signalformen

Obwohl für die Übertragung des Messsignals auch andere Verfahren denkbar wären (bspw. Frequenz- oder Phasenmodulation), erfolgt diese durch Modulation der Amplitude der Trägerwelle. Wie auch bei der elektronischen Distanzmessung in Tachymetern und Laserscannern können grundsätzlich zwei Signalformen unterschieden werden:

1. Pulsierende Modulation (Lichtblitze): hierbei wird die Trägerwelle nur innerhalb kurzer Zeitintervalle ausgesandt, zwischen denen deutlich längere Pausen liegen. Der Übergang zwischen ein- und ausgeschaltetem Zustand der Lichtquelle sollte möglichst rasch erfolgen, bzw. sollten sich möglichst steile Flanken der Amplitudenkurve ergeben. Eine Messung beginnt mit der Emission eines Pulses und endet mit dessen Detektion, es wird i.A. über mehrere Messungen gemittelt. Siehe dazu die Abschnitte 4.1 und 4.2.
2. Kontinuierliche (CW-) Modulation: auch hier wird die emittierte Trägerwelle in ihrer Amplitude moduliert. Diese variiert jedoch symmetrisch um einen mittleren Wert, das Verhältnis von ein- und ausgeschalteten Zuständen der Lichtquelle ist ausgewogen (Rechtecksfunktion) bzw. ist der Übergang kontinuierlich (sinusoidale Modulation). Eine Messung er-

streckt sich über beliebig viele Perioden des Signals. Siehe dazu Abschnitt 4.3.

Bzgl. Augensicherheit ist die pulsierende Modulation im Vorteil, da die Retina zwischen den sehr kurzen Blitzen abkühlen kann. Dies lässt hohe Pulsamplituden zu, wodurch wiederum große Distanzen messbar sind bzw. stärkere Hintergrundbeleuchtung bewältigt werden kann.

Andererseits stellt die CW-Modulation niedrigere Ansprüche an die Elektronik, für die nicht die Lichtgeschwindigkeit selbst, sondern nur die Modulationsfrequenz maßgeblich ist. Für Frequenzen bis zu 20 – 30 MHz können statt Lasern kostengünstigere Leuchtdioden verwendet werden [25].

4. Laufzeitmessung

Für die Bestimmung der Laufzeit werden derzeit drei verschiedene Ansätze verfolgt. Diese unterscheiden sich grundlegend in der Methode der Modulation an der Lichtquelle und der darauf folgenden Demodulation am Sensor. Folglich ist auch die Signalamplitude verschiedentlich abzuleiten. Die Verfahren ermöglichen nur teilweise die Bestimmung mehrerer Objektdistanzen am Abtastfleck eines Pixels. Vor allem für die Robotik interessant ist die gleichzeitige Verwendung mehrerer Kameras im gleichen Objektraum, die je nach Verfahren mit unterschiedlich hohem Mehraufwand realisiert werden kann.

4.1 Echodetektion mittels einzelner Photonen

Bei dieser Technik wird der Objektraum mit sehr kurzen Laserpulsen beleuchtet, deren Laufzeit pixelweise an Hand eines ihrer Photonen durch speziell dotierte Lawinenphotodioden (*single-photon avalanche diodes*, SPAD) bestimmt wird. Durch Anbringung einer überkritischen Sperrvorspannung werden diese Dioden in einen instabilen Zustand versetzt (Geiger-Modus). Trifft ein Photon auf die photosensitive Oberfläche der Diode auf, so löst es in dieser mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Lawine von Elektronen-Loch-Paaren und somit einen leicht messbaren elektrischen Stromstoß aus. Danach benötigt die Diode eine gewisse Zeitspanne, bevor das nächste Photon detektiert werden kann (*dead time*). [2]

Die Reaktionszeit von SPAD ist sowohl sehr gering, als auch äußerst präzise. SPAD weisen gegenüber konventionellen, unter der kritischen Sperrvorspannung betriebenen Lawinenphotodioden (*avalanche photo diodes*, APD) außerdem

eine höhere Sensitivität und eine beinahe unendlich hohe interne Verstärkung auf. Deshalb hängt der erzeugte Strom praktisch nicht von Anzahl und Energie der auslösenden Photonen ab, und der generierte Strom kann unmittelbar als digitales Zeitsignal verwendet werden. Im Gegensatz zu den ähnlich hoch verstärkenden 'Photomultiplier'-Elektronenröhren (*photomultiplier tubes*, PMT) können SPAD mit Ausmaßen im Sub- μm -Bereich gefertigt und sehr kompakt auf Platinen angeordnet werden [20] [22].

Die Lichtquelle initialisiert beim Aussenden eines Pulses eine hochgenaue Stoppuhr, welche beim Eintreffen eines Detektionssignals die Zeitdifferenz ausgibt. Sollen Distanzen auf mm aufgelöst werden, so muss die Laufzeit mit einer Auflösung von 7ps ($7 \cdot 10^{-12}\text{s}$) bestimmt werden. Dies wird trotz äußerst geringer Pulsbreiten im Bereich von 100ps , genauer Uhren und der Präzision von SPAD nicht erreicht. Außerdem addieren sich am Sensor zum eigentlichen Echo (aktives Licht) das Hintergrundlicht und interne Effekte (bspw. thermisch generierte Lawinen, *dark count*), was zu grob falschen Beobachtungen führt. Die Messungen können jedoch mit einigen MHz wiederholt, in einem Histogramm akkumuliert und zur Steigerung der Präzision gemeinsam evaluiert werden.

Die Auswertung des Histogramms kann relativ einfach implementiert werden, eingehendere Analysen lassen jedoch auch die Detektion mehrerer Objektdistanzen innerhalb des Pixelabtastflecks zu, z.B. an Objektkanten. Anwendbar wären hier sogar die raffinierten Analysemethoden des Full-Waveform-Laserscanning, wo das eintreffende Signal nicht im Scanner, sondern erst in der Nachbearbeitung ausgewertet wird [30] [31].

Da die *dead time* von SPAD länger als die Breite der emittierten Pulse ist, detektieren SPAD pro Puls höchstens ein Photon. Die Detektion eines bestimmten Photons bedingt daher, dass vorher eingetroffene Photonen nicht detektiert wurden, die Detektionswahrscheinlichkeit sinkt also zum Ende des Echos hin. Treffen pro Echo mehrere Photonen auf ein Pixel, so verschiebt sich die Verteilung der Detektionszeiten im Histogramm in Richtung Beginn der Echos und die Objektdistanzen werden systematisch zu kurz bestimmt [26].

Liegt die Anzahl der im Mittel detektierten Photonen pro Pixel und Echo deutlich unter eins, so ist sichergestellt, dass nur sehr selten mehr als ein Photon pro Echo auf ein Pixel trifft. Die

obengenannte systematische Verschiebung wird damit weitgehend vermieden, und der Restbetrag kann statistisch geschätzt und korrigiert werden. Da i.A. stark unterschiedliche Distanzen und Reflektivitäten im Blickfeld zu erwarten sind, ist die niedrige Detektionsrate durch Dämpfung der eintreffenden Energie sensorseitig und pixelweise zu gewährleisten. Die Nachsteuerung erhöht jedoch die Komplexität des Systems. Bei Verwendung von ausreichend kurzen Pulsen (Femtosekundenlaser) würde die systematische Verschiebung innerhalb der Echobreite irrelevant und könnte vernachlässigt werden.

Da wie oben erwähnt der von SPAD erzeugte Detektionsstrom kaum von der Energie des auslösenden Photons abhängt, erlaubt dieser keine Aussage über die Amplitude des empfangenen optischen Signals. Die Amplitude lässt sich jedoch ableiten aus dem Verhältnis von emittierten Pulsen und als von aktivem Licht stammend klassifizierten Photonen.

Die gepulste Modulation der Beleuchtung lässt die zeitgleiche Verwendung mehrerer Kameras am gleichen Objekt nur dann zu, wenn deren Trägerwellen auf unterschiedlichen Frequenzen liegen.

Speziell bei transparenten und stark gerichtet reflektierenden Oberflächen ist die hohe Sensitivität von SPAD vorteilhaft, da hier nur ein sehr geringer Teil des Signals den Sensor erreicht [32]. Der Vorteil der höheren Sensitivität von SPAD im Vergleich zu gewöhnlichen Lawinenphotodioden relativiert sich jedoch bei Vorhandensein von Hintergrundlicht. Auch beim Einsatz von SPAD muss ein minimales Signal-Rausch-Verhältnis gewährleistet werden, die nötige Pulsenergie steigt zumindest linear mit der Hintergrundstrahlung [26].

RIM-Kameras mit SPAD-Technik liegen bisher nur als Prototypen vor. Es konnten Kameras mit Auflösungen von bis zu $4 \times 12 \text{ px}^2$ realisiert werden, wobei die niedrige Zeilenanzahl von 4 als frei erhöhbar angegeben wird. Bei einer Belichtungszeit von 0.2 s wurden Distanzen von 3 m mit einer Präzision (1σ) von 1.8 mm bestimmt [19]. Umfangreichere Untersuchungen der äußeren Genauigkeit der Distanzmessung bzw. ihrer Sensitivität z.B. gegenüber Hintergrundlicht und Temperaturschwankungen sind bisher nicht bekannt.

4.2 Ablichtung unterschiedlicher Bruchteile von Echos

Herkömmliche Photo- und Videokameras integrieren an jedem ihrer Pixel den eintreffenden Strahlungsfluss über die Dauer der Belichtungszeit. Wird eine gepulste Lichtquelle zusammen mit einem schnellen, elektronischen Verschluss eingesetzt, so erlauben deren Bilder u.U. den Rückschluss auf die Laufzeit bzw. die Objektdistanz (mehrfache Kurzzeit-Doppelbelichtung, *multiple double short time integration*, MDSI). Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen eingetretener Energie und sich ergebendem Grauwert, welche durch Kalibrierung gewonnen werden muss. Da dieser Zusammenhang ohnehin immer bijektiv ist, werden die beiden Begriffe im Folgenden der sprachlichen Vereinfachung wegen gleichgesetzt, die Grauwerte bei konstanter Beleuchtung also als proportional zur Belichtungszeit angenommen.

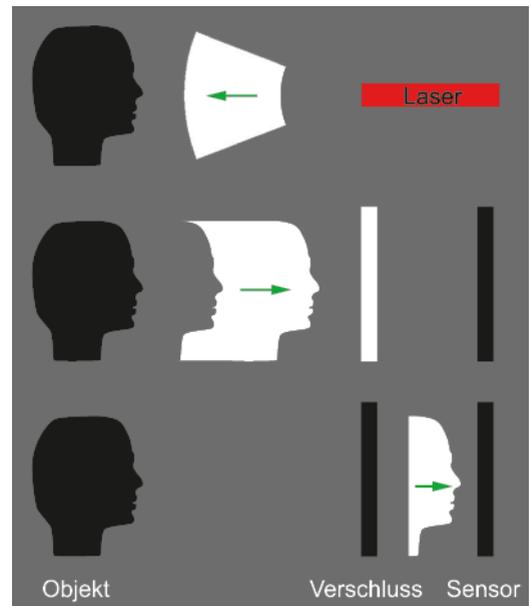


Abb. 1: Ein stark divergenter Laserstrahl bewegt sich Richtung Objekt (oben), wird an diesem reflektiert und das Echo besitzt nun an Bug und Heck die Form eines Abdrucks des Objekts (mittig). Während das Echo die Blende passiert, wird diese geschlossen, sodass sich die Objektdistanz in der Dicke des verbliebenen Echos widerspiegelt (unten), was wiederum zu entsprechenden Energien am Sensor bzw. Grauwerten im Bild führt.

Der Messvorgang ist in Abb. 1 in einem Profil skizziert. Ein Puls verlässt die Lichtquelle und breitet sich Richtung Objektraum aus. Nach

seiner Reflexion am Objekt besitzt das Echo die Form eines Abdrucks desselben. Wird nun die Blende geschlossen, während das Echo sie passiert, so spiegeln sich die Objektdistanzen in der Dicke des vorderen Echoteils und sodann im Bild wider: nahe Abtastflecken ergeben potentiell hellere Pixel.

Der Einfluss des Hintergrundlichts auf das Grauwertbild kann eliminiert werden, indem ein zweites Photo mit gleicher Belichtungszeit, aber deaktivierter Lichtquelle belichtet und subtrahiert wird (*reduzierte Aufnahme*).

In die um das Hintergrundlicht reduzierten Grauwerte fließt jedoch immer noch die lokale, richtungsabhängige Reflektivität des Objekts ein. Stärker reflektierende Oberflächen ergeben einen mit zunehmender Belichtungszeit steileren Anstieg der Grauwerte. Da der registrierte Grauwert aber stets proportional zur Länge des belichteten Teils des Echos ist, kann der Einfluss der Reflektivität durch eine Wiederholung des Vorgangs mit anderer Belichtungszeit und anschließender Quotientenbildung eliminiert und die Laufzeit quantifiziert werden.

Um die Rekonstruktion der Laufzeit t_0 des Echobugs zu ermöglichen, müssen die Verschlusszeiten $t_{1,2}$ unterschiedlich sein und beide reduzierten Aufnahmen zumindest teilweise das Echo ablichten. Daraus folgt, dass im kürzer belichteten Bild die Blende nicht vor dem Eintreffen des Echos geschlossen werden darf. Beim länger belichteten Bild sind zwei Fälle zu unterscheiden: Schließen der Blende (i) vor dem Zeitpunkt des Durchlaufs des Echohecks und (ii) danach. Diese beiden Fälle sind an Hand der Beobachtungen nicht unterscheidbar, jedoch entscheidend für die Berechnung der Laufzeit.

Um das Eintreten von (i) sicherzustellen, muss die Pulsbreite t_P sehr groß im Vergleich zur Belichtungszeit t_2 gewählt werden, für (ii) erfolgt die Wahl umgekehrt. Mit Rücksicht auf den Stromverbrauch der Lichtquelle und die Augensicherheit des Messverfahrens ist auf Grund der geringeren Pulsenergie i.A. (ii) vorzuziehen. Graphisch dargestellt ist diese Konfiguration in Abb. 2.

Im Fall (i) gelten die Beziehungen $g_1 \sim t_1 - t_0$ und $g_2 \sim t_2 - t_0$, wobei $g_{1,2}$ die Grauwerte der beiden reduzierten Aufnahmen bezeichnen. Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich Formel (2) zur Bestimmung der Laufzeit t_0 (vgl. [17]). Im anderen Fall (ii) wird in der zweiten Aufnahme das gesamte Echo abgebildet, sodass $g_2 \sim t_P$ gilt.

Wählt man $t_1 = t_P$, so kann die Laufzeit mittels (3) berechnet werden (vgl. [6]).

$$t_0 = \frac{g_2 t_1 - g_1 t_2}{g_2 - g_1} \tag{2}$$

$$t_0 = t_P \cdot \left(1 - \frac{g_1}{g_2}\right) \tag{3}$$

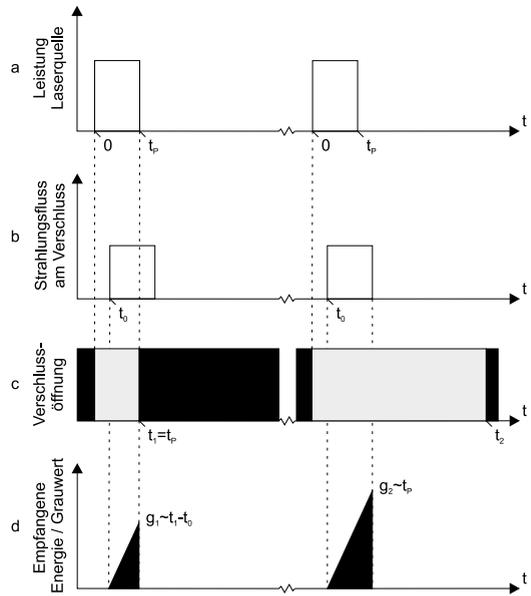


Abb. 2: Linke Seite: ein Puls wird an der Laserquelle bis zum Zeitpunkt t_P emittiert (a). Er wird am Objekt reflektiert und der Bug des Echos erreicht den Verschluss verzögert um die Laufzeit t_0 (b). Da die Belichtung bereits zum Zeitpunkt t_1 beendet wird (c), trifft nur ein Teil der Echoenergie den Sensor (d). Der Vorgang wird wiederholt (rechts), dieses Mal wird die Blende aber erst wesentlich später, zum Zeitpunkt t_2 geschlossen, wodurch die gesamte Echoenergie den Sensor erreicht. Es handelt sich also um den im Text beschriebenen Fall (ii).

Durch die Quotientenbildung wird der Erwartungswert der Distanz unabhängig von der Energie des eintreffenden Echos. Dadurch werden die Beobachtungen neben der reflektivitätsabhängigen Reduktion der Pulsenergie am Objekt auch frei von Einflüssen durch die laterale Expansion des Laserstrahls im Zuge seiner Ausbreitung im Raum, die Absorption in der Atmosphäre und die Leistung der Laserquelle. Systematische Einflüsse auf die Distanzmessung, die von einer eventuell inhomogenen Ausleuchtung des Objektraums und vom Lichtabfall zum Objektiv- / Bildrand hin herrühren, werden somit ebenfalls vermieden [17] [6].

Auch Laserquellen erzeugen Pulse mit nur endlich steilem Anstieg / Abfall der Leistung an

Bug und Heck. Weiters kommt es bei der Reflexion von Pulsen i.A. zu einer Vergrößerung der Pulsbreite bzw. Veränderung der Energieverteilung, hervorgerufen durch gewölbte oder zum Strahl geneigte Oberflächen [30]. Es entstehen dadurch Abweichungen vom Modell der Proportionalität von Grauwerten und Belichtungszeit. Bei der beschriebenen Quotientenbildung aus reduzierten Aufnahmen wirkt sich dies i.A. auf die Distanzbestimmung aus.

Mehrere Distanzen am Abtastfleck eines Pixels, wie dies an Objektkanten oder bei teiltransparenten Materialien der Fall ist, können mit diesem Verfahren nicht getrennt werden. Es ergibt sich ein Mittel der Objektdistanzen, das von der Wahl der Belichtungszeiten abhängt.

Die beiden Doppelaufnahmen benötigen gemeinsam weniger als 1 ms [6]. Eine zwischenzeitliche Variation des Hintergrundlichts und der Reflektivität und Distanz der Abtastflecken kann daher i.A. vernachlässigt werden.

Die Energie des Echos kann im Fall (i) aus den beiden reduzierten Aufnahmen und den zugehörigen Belichtungszeiten extrapoliert werden bzw. gibt im Fall (ii) das zweite reduzierte Bild diese unmittelbar wieder.

Da das Verfahren konstantes Hintergrundlicht voraussetzt, ist der gleichzeitige Einsatz mehrerer Kameras im gleichen Objektbereich nur dann möglich, wenn diese Licht verschiedener Frequenzen verwenden.

Umfangreiche Untersuchungen zur Qualität der Distanzmessung und zur Robustheit gegenüber den üblichen Einflussfaktoren liegen nicht vor. Es wird aber zumindest von einer Auflösung der Distanz besser als 1 cm über einen Distanzbereich von 8 m bei Bildraten von 195 fps berichtet [6]. 3DV systems (מֶטְרִי /Yoqne'am, Israel) bietet Realisierungen dieser Technik kommerziell an.

4.3 Phasenverschiebung

Bei dieser Methode wird die Trägerwelle permanent emittiert und ihre Amplitude bspw. sinusoidal mit der Periode T_{mod} moduliert. Dies bildet sich im Raum durch eine periodische Variation der Intensität der Länge $\lambda_{mod} = c \cdot T_{mod}$ ab, welche das Messsignal darstellt. Proportional zum Verhältnis von λ_{mod} und Objektdistanz d gelangt das am Objekt reflektierte Signal um den Phasenwinkel φ gegen das emittierte Signal verschoben zum Sensor. Werden die Auslenkungen $A(\tau)$ des eintreffenden Signals an den

Punkten $\tau_{0,3}$ der Phasenwinkel $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ des emittierten Signals abgetastet, so ist die Phasenverschiebung φ mittels (4) ableitbar, woraus wiederum durch (5) auf die Distanz rückgeschlossen werden kann.

Am Weg durch die Atmosphäre und v.a. bei der Reflexion am Objekt addiert sich die Hintergrundstrahlung, und die mittlere Intensität steigt. Außerdem wird die Trägerwelle samt Signal gedämpft, beides führt zur Reduktion des Signal-Rausch-Verhältnisses, s. Abb. 3. Die Amplitude der reflektierten Welle stellt einen wesentlichen Qualitätsparameter der Distanzmessung dar und kann mit Hilfe der Auslenkungen $A(\tau_i)$ mittels (6) ebenfalls quantifiziert werden.

$$\varphi = \arctan \frac{A(\tau_0) - A(\tau_2)}{A(\tau_1) - A(\tau_3)} \quad (4)$$

$$d = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{mod} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (5)$$

$$A = \frac{\sqrt{(A(\tau_0) - A(\tau_2))^2 + (A(\tau_1) - A(\tau_3))^2}}{2} \quad (6)$$

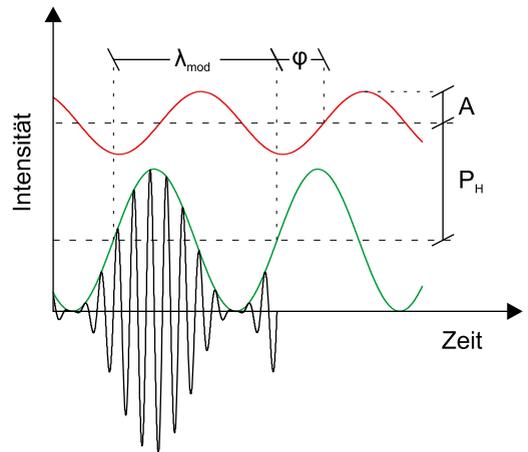


Abb. 3: Diese Graphik zeigt die Intensitäten an Lichtquelle und Sensor einer phasenwinkelbasierten RIM-Kamera als Funktionen der Zeit. Die von der Lichtquelle emittierte Trägerwelle ist symmetrisch zur Zeitachse in schwarz dargestellt. Sie trägt das Messsignal als Hüllkurve (grün), für die sich die räumliche Periode λ_{mod} ergibt. Am Weg durch die Atmosphäre und bei der Reflexion am Objekt wird die Trägerwelle gedämpft und es addiert sich die Hintergrundstrahlung P_H , weshalb die Hüllkurve der eintreffenden Welle (rot) eine geringere Amplitude A aufweist und um ein größeres Mittel variiert. Proportional zum Verhältnis von Objektdistanz und λ_{mod} erfährt das Messsignal außerdem eine Verschiebung um den Phasenwinkel φ .

Die Auslenkungen $A(\tau_i)$ können jedoch nicht direkt bestimmt werden, sondern lediglich op-

tische Energien als Integrale des Strahlungsflusses über Bruchteile der Modulationsperiode (natürliche Abtastung, *natural sampling*). Dies lässt sich mit äußerst klein implementierbaren sog. Photomischdetektoren (*photonic mixer devices, lock-in pixels*) verwirklichen, welche die in ihrer photosensitiven Schicht ausgelösten Elektronen je nach angelegter Steuerspannung an eines von zwei Ausleseregister weiterleiten. Wird als Steuerung das Modulationssignal der Beleuchtungseinheit verwendet, so landen je nach Phasenverschiebung des reflektierten Signals unterschiedliche Anzahlen an Elektronen in den beiden Registern. Die Integrationsdauer erstreckt sich für $A(\tau_0)$ dann über die erste Hälfte der Modulationsperiode bzw. über die zweite Hälfte für $A(\tau_2)$, wobei über zahlreiche Perioden gemittelt wird. Wird die Messung mit dem um $T_{mod}/4$ verzögerten Modulationssignal wiederholt, so lassen sich die beiden für (4) bzw. (6) noch fehlenden Auslenkungen $A(\tau_1)$ und $A(\tau_3)$ gewinnen. Aufgrund der endlich langen Integrationsdauer muss an die berechnete Amplitude jedoch ein Korrekturfaktor angebracht werden. [15]

Konstante Hintergrundstrahlung füllt beide Ausleseregister gleichermaßen auf, deren Kapazitäten mit Rücksicht auf die einhergehende Steigerung der thermischen Störquellen nicht beliebig erweiterbar sind. Deshalb ist für den Einsatz von phasenbasierten RIM-Kameras unter Sonnenlicht die Unterdrückung von Hintergrundlicht bereits im Pixel erforderlich [4]. Aktuelle Photomischdetektoren subtrahieren zu diesem Zweck in einem Zwischenschritt die Anzahl der an beiden Ausgängen eines Pixels vorhandenen Ladungsträger [28]. Vorhandenes Hintergrundlicht führt zwar trotzdem zusätzliches Rauschen in die Distanzbeobachtungen ein, aber die Reduktion bewahrt den Sensor vor Sättigung durch Hintergrundlicht, ohne die Rekonstruktion von Phasenwinkel und Amplitude zu verfälschen. Die Qualität der Distanzbestimmung steigt somit grundsätzlich mit der Belichtungszeit, solange eine eventuelle Bewegungsunschärfe vernachlässigbar ist.

Die zu lange Integration des Signals führt dennoch zur Sättigung der Pixel und damit zu falschen Beobachtungen. Da die Belichtungszeit in gegenwärtigen Implementierungen nur für den gesamten Sensor gewählt werden kann, muss die Integrationsdauer gemäß den Distanzen und Reflektivitäten im Blickfeld sorgfältig gewählt werden [24]. Von einer Lösung für pixelweise angepasste Belichtungszeiten berichtet [4].

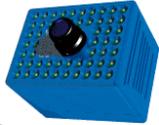
Aus (4) wird ersichtlich, dass φ jedenfalls im Intervall $[0, 2\pi[$ rekonstruiert wird. Übertragen auf (5) bedeutet das, dass nur Distanzen bis maximal $d_{max} = \lambda_{mod}/2$ korrekt bestimmt werden. Abhilfe bietet hier die Verwendung von verschiedenen Modulationsfrequenzen in aufeinanderfolgenden Aufnahmen: größere Wellenlängen zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten, die kleinste Wellenlänge zur Erzielung der höchsten Auflösung [7].

4.3.1 Simultane Verwendung mehrerer Kameras

Die gleichzeitige Verwendung mehrerer Kameras am gleichen Objekt ist bei Verwendung der sinusoidalen Modulation nicht möglich, da sich die einzelnen Signale zu neuen Sinuswellen überlagern, deren Phase nicht proportional zur Objektdistanz ist. Diese Überlagerung kann jedoch durch Verwendung von Binärsequenzen minimiert werden, deren Codemuster pseudozufällig und zueinander orthogonal sind (Code-multiplexverfahren, CDMA) [3]. Diese Sequenzen werden zwar unter Vorgabe einer bestimmten Länge deterministisch gewonnen, die Verteilung der Binärwerte ist aber ideal zufällig, weshalb die Kreuzkorrelation verschiedener Codes stets minimal ist. Ihre Autokorrelationsfunktion fällt bis ein Bit vor und nach ihrem Maximum bei Null linear ab und beträgt ansonsten Null.

Emittiert also jede Kamera ihr eigenes, binäres Codesignal und verwendet dieses auch für die Steuerung der Photomischdetektoren, so können praktisch beliebig viele Sensoren mit minimaler Interferenz gleichzeitig arbeiten. Voraussetzung dafür sind lediglich die Festlegung der Sequenzlänge und die Zuordnung unterschiedlicher Codes, nicht aber die Synchronisation der Kameras. Die Sequenzlänge gibt dann die minimale Korrelationsdauer bzw. Belichtungszeit und die Maximalanzahl an verwendbaren Kameras vor. Die Präzision der Distanzmessung hängt weiter von der Modulationswellenlänge, also der Dauer eines Bits ab. Innerhalb der halben Sequenzlänge entfallen jedoch die Mehrdeutigkeiten bei der Rekonstruktion der Phasenverschiebung, da die Korrelation des emittierten und eintreffenden Signals beim Überschreiten von d_{max} Null ergibt.

Unabhängig vom Modulationssignal kann pro Pixel nur eine Phasenverschiebung rekonstruiert werden, mehrfache Objektdistanzen am Abtastfleck werden stets gemittelt.

				
		SR-3000	19k	DP200 ^a
Bildmatrix	$[px^2]$	144×176	120×160	64×64
Blickfeld	$[deg^2]$	39.6×47.5	22.6×30 ^b	21.5×21.5 / 40.5×40.5 / 70×70
max. Bildrate (Vollbilder)	$[fps]$	25	15	30
Beleuchtung	$[W]$	1	3	1
Trägerwellenfrequenz	$[THz]$	353	345	382
Trägerwellenlänge	$[nm]$	850	870	785
Modulationsfrequenz	$[Mhz]$	5–30	20	13–104
Eindeutigkeitsbereich	$[m]$	30–5	7.5	11.5–1.4
Abmessungen	$[mm^3]$	50×67×42.3	208×53×209	125×60×63
Gewicht	$[g]$	162	1400	?

^a Für das aktuelle Modell DP300 sind keine Angaben erhältlich

^b Objektiv wechselbar, daher variabel

Tab. 1: Vergleich der höchstauflösenden Modelle der drei Markführer im Bereich der phasenwinkelbasierten RIM-Kameras: Swissranger™ SR-3000 von MESA Imaging (Zürich), PMD[vision]® 19k der Firma PMDTechnologies (Siegen, Deutschland) und DP200 von Canesta™ (Sunnyvale, Kalifornien). In den Abbildungen sind tlw. die zur Beleuchtung eingesetzten Leuchtdioden-Verbünde erkennbar.

4.3.2 Kommerzielle Implementierungen

Tab. 1 zeigt eine Gegenüberstellung der höchstauflösenden Modelle der drei kommerziellen Anbieter von phasenwinkelbasierten RIM-Kameras. Diese weisen bereits beachtliche Eigenschaften auf, u.a. Auflösungen und Bildraten bis zu $144 \times 176 px^2$ bzw. 30 fps bei sehr kompakten Ausmaßen und geringem Gewicht. Die Präzision der Distanzmessung wird nicht angegeben, da hierfür vergleichbare Werte fehlen. Unter guten Bedingungen kann aber eine Wiederholgenauigkeit im Bereich weniger cm genannt werden.

4.3.3 Datenqualität & Kalibrierung

Für einen Teil dieser Modelle bzw. ihrer Vorgänger liegen bereits Genauigkeitsuntersuchungen der inneren Orientierung und Distanzmessung vor. Es wird von systematischen Fehlern berichtet, die auch bei anderen Kameratypen bzw. in viel kleinerem Ausmaß v.a. bei älteren Modellen von Tachymetern und Laserscannern beobachtet werden können.

[16] untersucht neben der Optik der PMD[vision]® 3k-S auch die Distanzmessung an Hand mehrerer Aufnahmen einer homogen

reflektierenden Platte. Es werden Abweichungen von bis zu 30 cm, repräsentativ um die 15 cm festgestellt. Der zyklische, distanzabhängige Fehler wird an Hand von B-splines, der Rest pixelweise korrigiert.

[10] führt sehr umfangreiche Untersuchungen an Swissranger™ SR-2 und SR-3000 durch. Es zeigen sich neben einem zyklischen, distanzabhängigen Fehler auch Abhängigkeiten der beobachteten Distanz von der Amplitude des reflektierten Signals. Die ebenfalls belegten Einflüsse der Betriebszeit und der Umgebungstemperatur könnten sich möglicherweise als indirekt über die Temperatur des Sensors wirkend herausstellen. Selbiges könnte für die entdeckten Einflüsse von Belichtungszeit, Inzidenzwinkel des Strahls und die Distanz, Reflektivität und Bestrahlungsstärke des Abtastflecks bzgl. der Amplitude des Signals gelten. Auch hier werden Abweichungen bis zu 30 cm beobachtet. Die Kalibrierungsansätze reichen von der Bestimmung eines rein datengetriebenen polynomialen 3D Vektorfeldes bis hin zu komplexen modellgetriebenen Kalibrierungen.

Zu diesen Fehlerquellen kommt noch die hohe Korrelation benachbarter Pixel hinzu. Diese wird

durch kamerainterne Reflexionen zwischen Sensor und Objektiv/Filter hervorgerufen, kann jedoch in Echtzeit minimiert werden [18].

Die beschriebenen Experimente und Kalibrierungen der Distanzmessung konzentrieren sich auf einzelne Fehlerquellen, ohne ihr Zusammenwirken unter natürlichen Bedingungen zu untersuchen. Ein dahin gehender erster Versuch wird in [12] beschrieben.

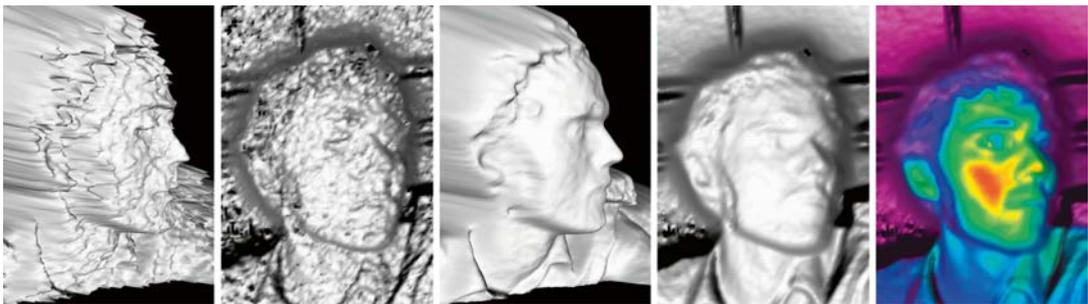
5. Anwendungen

Die Anwendungen von *RIM* sind potenziell sehr weit gestreut. Mit Rücksicht auf den gegenwärtigen Entwicklungsstand werden im Folgenden jedoch beispielhaft nur solche angeführt, die entsprechend niedrige Anforderungen an die Datenqualität stellen und bereits untersucht wurden.

- **Automobilbranche:** Anpassung der Explosion von Airbags an die momentane Position des Kopfes bzw. Deaktivierung bei entgegen der Fahrtrichtung montierten Kindersitzen; Warnung vor Kollisionen und vor dem Verlassen des Fahrstreifens; Automatisierte Verfolgung des vorderen Fahrzeuges im Stau, an der Ampel; Einparkhilfen bzw. schnelles, automatisiertes Einparken [34]
- **Industrie:** Sichereres Zugreifen von Montage Robotern [14]; Flexible Festlegung von Sicherheitszonen im Arbeitsbereich von Maschinen und Robotern [9]
- **Logistik:** Erkennung von Paketanzahl, -form und -größe auch bei stark texturierten Verpackungen; Feststellung der Belegung von Plätzen in halbautomatischen Lagern [25]

- **Baubetrieb:** Vermeidung der Kollision von Bauwerk, Kränen, anderen Baumaschinen, Material und Arbeitern [29]
- **Film und Fernsehen:** Erweiterung der Blue-Box-Technik: distanzbasierte Segmentierung von Videostreamen durch Kombination von RGB- und *RIM*-Kamera, Einspiegelung von Graphiken in natürliche Umgebung (Wettervorhersage im Freien) [8]
- **PC:** Steuerung von Präsentationen mittels Gesten [21]; Ersetzen von physischen Tastaturen durch Projektion eines Bildes und Erfassung der Fingerbewegung [5]; sportliche Betätigung bei Computerspielen durch Erfassung von Körperbewegungen [33]
- **Medizin:** Robuste Körperoberflächenmodelle für die Orthopädie [21]
- **Robotik:** Navigation von Robotern [27]
- **Biometrie und Sicherheit:** Verbesserte Gesichtserkennung durch robuster bestimmte Gesichtsoberflächenform [21], Personenverfolgung [11]
- **Militär:** Verbesserte Fahrzeugerkennung trotz Tarnnetzen und -anstrichen bei minimaler Beleuchtung (SPAD-Anwendung) [1]

Zwei Abbildungen sollen einen Eindruck vom Potenzial des *RIM* an Hand von Aufnahmen mit der Kamera Swissranger™ SR-3000 vermitteln: Abb. 4 zeigt schattierte und farbkodierte Triangulierungen von Punktwolken eines menschlichen Kopfes. Abb. 5 stellt eine Folge von Distanzbildern dar, die ein vorbeifahrendes Fahrzeug wiedergeben.



(a) Einzelbild, Seite (b) Einzelbild, Kamera (c) gemittelt, Seite (d) gemittelt, Kamera (e) Signalamplitude

Abb. 4: Frontale Aufnahme eines Kopfes. (a) und (b) zeigen Perspektiven von Schattierungen der Triangulierung der Punkte eines einzelnen Distanzbildes: (a) zeigt den Kopf von der Seite, (b) aus der Kameraperspektive. (c) und (d) verwenden für diese Darstellungen eine Triangulierung, deren Punkte aus 100 aufeinanderfolgenden Distanzbildern gemittelt wurden, die Steigerung der Präzision ist offensichtlich. (e) überlagert die Schattierung aus (d) mit einer aus der mittleren Signalamplitude abgeleiteten Farbkodierung.

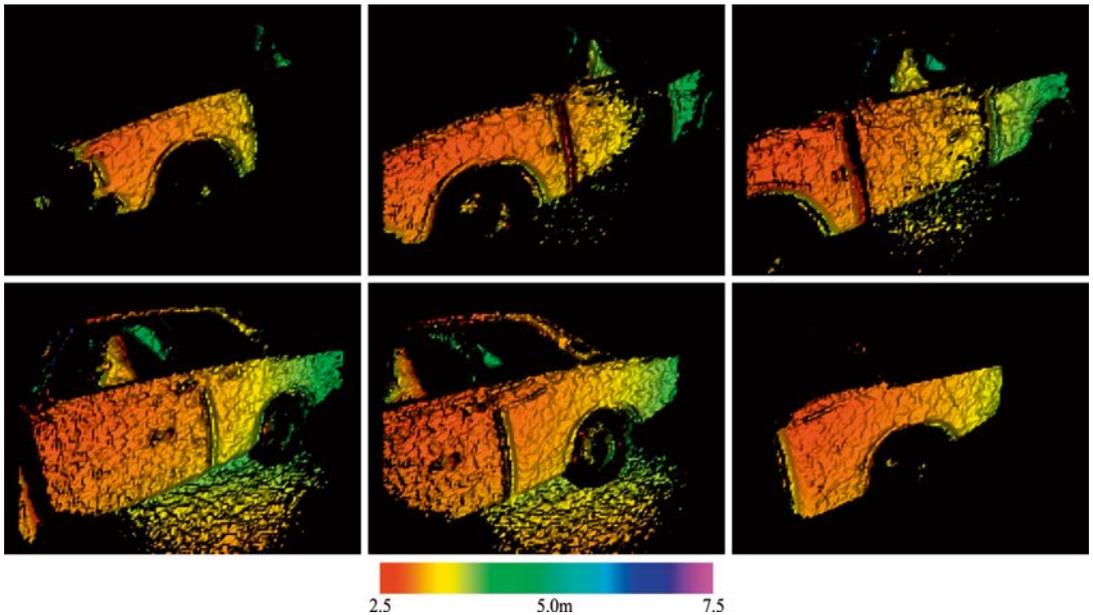


Abb. 5: Eine Folge von Distanzbildern, die ein vorbeifahrendes Fahrzeug wiedergeben. Die zeitliche Reihenfolge beginnt links oben und verläuft zeilenweise. Dargestellt sind Schattierungen der Triangulierung, in der Perspektive der Kamera. Die Farbkodierung leitet sich aus den Objektdistanzen ab. Punkte und zugehörige Flächen mit besonders hohen bzw. niedrigen Signalamplituden wurden ausgeblendet. Das Objekt ist einerseits bewegt, andererseits besitzt es nur geringe Textur und wäre aus diesen Gründen für die (flächenhafte) Aufnahme mit Laserscannern oder Photogrammetrie nur bedingt geeignet.

6. Anwendungen im Vermessungswesen, ein Ausblick

RIM eignet sich bzgl. vieler Kriterien ideal für die 3D-Objekterfassung. Durch die simultane, berührungslose, schnelle und fortlaufende Messung von Punktwolken scheint *RIM* in unmittelbare Konkurrenz zum Laserscanning treten zu können. V.a. die Möglichkeit der handgeführten Messung, der Erfassung von in sich bewegten Szenen und die geringeren Produktionskosten durch den Wegfall der Scanmechanik stellen bestechende Vorteile dar. Im Vermessungswesen wird für die Mehrzahl der Anwendungen jedoch eine äußere Genauigkeit zumindest im *cm*-Bereich gefordert, was mit gegenwärtigen Geräten unter natürlichen Bedingungen nur eingeschränkt erfüllbar ist. Die Technik steht jedoch noch am Anfang, und die Messungen stabilisierende Verbesserungen, wie z.B. interne Referenzlichtwege, wurden im Falle der phasenwinkelbasierten Kameras von Herstellern bereits angekündigt. Außerdem ist mit einer weiteren Steigerung von Sensitivität und Präzision zu rechnen.

Sehr schnell vor sich gehende Bewegungen, bei denen Textur nur bedingt verwendbar ist und keine Markierungen angebracht werden können,

scheinen prädestiniert für die Aufnahme mit *RIM*-Kameras. Soll Augensicherheit gewährleistet sein, so sind der Technik bei der maximalen Messdistanz jedoch Grenzen gesetzt, auch wenn diese v.a. von SPAD-basierten Kameras noch weit gedehnt werden könnten. Die sich grundsätzlich anbietende Erfassung von Felsstürzen, Muren- und Lawinenabgängen liegt daher derzeit nicht im Bereich des Möglichen.

RIM könnte aber v.a. im kurzen bis mittleren Nahbereich zur Alternative werden, sobald entsprechende Kalibrierungen vorliegen. *RIM* wird dann v.a. im Verbund mit Inertialmesssystemen zur Modellierung kleinerer Objekte verwendbar, z.B. von Kunstgegenständen. Auch die Erfassung von Innenräumen ist dann möglich, potenziell günstiger als mit dem Laserscanner. Selbst die erforderliche Messdistanz für die Aufnahme von Straßenschluchten und Häuserfronten scheint erreichbar. Das den Verkehr störende Anhalten und Verweilen des Aufnahmefahrzeugs würde dann von einigen Minuten auf Sekundenbruchteile verkürzt oder gänzlich überflüssig.

Die geringen Anschaffungskosten von *RIM*-Kameras treiben aber möglicherweise auch die

Verbreitung von 3D-Modellen in weniger klassischen Bereichen voran. So könnten z.B. die Anstrengungen des web3D Konsortiums schließlich fruchten und Produkte im Web zukünftig verstärkt in drei Dimensionen präsentiert oder Unfallaufnahmen direkt durch die Beteiligten getätigt und kontrolliert werden. Selbst die Integration in Mobiltelefone ist denkbar, womit RIM-Kameras omnipräsent würden.

Sicher ist, dass die Datenmengen auch durch RIM-Kameras weiter steigen. Entsprechende Auswertestrategien für die Registrierung, Klassifizierung, Filterung und Modellierung müssen erst gefunden werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Albota, M. A., Aull, B. F., Fouche, D. G., Heinrichs, R. M., Kocher, D. G., Marino, R. M., Mooney, J. G., Newbury, N. R., O'Brian, M. E., Player, B. E., Willard, B. C. und Zayhowski, J. J. (2002): Three-Dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays. *Lincoln Laboratory Journal*, 13(2), 351–368.
- [2] Aull, B. F., Loomis, A. H., Young, D. J., Heinrichs, R. M., Felton, B. J., Daniels, P. J. und Launders, D. J. (2002): Geiger-Mode Avalanche Photodiodes for Three-Dimensional Imaging. *Lincoln Laboratory Journal*, 13(2), 335–350.
- [3] Büttgen, B., El Mechat, M.-A., Lustenberger, F. und Seitz, P. (2007): Pseudonoise Optical Modulation for Real-Time 3-D Imaging With Minimum Interference. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 54(10), 2109–2119.
- [4] Büttgen, B., Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R. und Lustenberger, F. (2005): CCD/CMOS Lock-In Pixel for Range Imaging: Challenges, Limitations and State-of-the-Art. In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg., 1st Range Imaging Research Day*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 21–32.
- [5] Du, H., Oggier, T., Lustenberger, F. und Charbon, E. (2005): A Virtual Keyboard Based on True-3D Optical Ranging. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. 220–229.
- [6] Elkhallil, O., Schrey, O. M., Mengel, P., Petermann, M., Brockherde, W. und Hosticka, B. J. (2004): A 4x64 Pixel CMOS Image Sensor for 3D Measurement Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 39(7), 1208–1212.
- [7] Gokturk, S., Yalcin, H. und Bamji, C. (2004): A Time-Of-Flight Depth Sensor -System Description, Issues and Solutions. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 35–44.
- [8] Gvili, R., Kaplan, A., Ofek, E. und Yahav, G. (2003): Depth keying. In *Woods, A. J., Bolas, M. T., Merritt, J. O. und Benton, S. A., Hg., Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X*. SPIE, Bd. 5006, 564–574.
- [9] Hauke, M. und Bömer, T. (2005): Range Imaging and Vision Based Protective Devices (VBPDs) A Team For Safety? In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg., 1st Range Imaging Research Day*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 81–87.
- [10] Kahlmann, T. und Ingensand, H. (2007): Increased Accuracy of 3D Range Imaging Camera by Means of Calibration. In *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, Bd. 1, 101–108.
- [11] Kahlmann, T., Remondino, F. und Guillaume, S. (2007): Range Imaging Technology: New Developments and Applications for People Identification and Tracking. In *Beraldin, J.-A., Remondino, F. und Shortis, M. R., Hg., Videometrics IX*. SPIE, Bd. 6491, 12.
- [12] Karel, W., Dorninger, P. und Pfeifer, N. (2007): In Situ Determination of Range Camera Quality Parameters by Segmentation. In *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, Bd. 1, 109–116.
- [13] Kraus, K. (2004): Photogrammetrie – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, Bd. 1. de Gruyter, Berlin, 7. Aufl.
- [14] Kristensen, S., Estable, S., Kossow, M. und Brösel, R. (2001): Bin-Picking with a Solid State Range Camera. *Robotics and Autonomous Systems*, 35, 143–151.
- [15] Lange, R., Seitz, P., Biber, A. und Schwarte, R. (1999): Time-of-flight range imaging with a custom solid state image sensor. In *Tiziani, H. J. und Rastogi, P. K., Hg., Laser Metrology and Inspection*. SPIE, Bd. 3823, 180–191.
- [16] Lindner, M. und Kolb, A. (2006): Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance Sensors. In *Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B. und Koracin, D., Hg., Advances in Visual Computing*, Springer, Bd. 4292 von *Lecture Notes in Computer Science*. 524–533.
- [17] Mengel, P., Doemens, G. und Listl, L. (2001): Fast Range Imaging by CMOS Sensor Array through Multiple Double Short Time Integration (MDSI). In *International Conference on Image Processing*. I.E.E.E.-Press, Thessaloniki, Griechenland, 169–172.
- [18] Mure-Dubois, J. und Hügli, H. (2007): Time-of-Flight Imaging of Indoor Scenes with Scattering Compensation. In *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, Bd. 1, 117–122.
- [19] Niclass, C., Rochas, A., Besse, P.-A. und Charbon, E. (2005): Design and Characterization of a CMOS 3-D Image Sensor Based on Single Photon Avalanche Diodes. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40(9), 1847–1854.
- [20] Niclass, C., Sergio, M. und Charbon, E. (2006): A Single Photon Avalanche Diode Array Fabricated in Deep-Submicron CMOS Technology. In *Design, Automation and Test in Europe*. European Design and Automation Association, München, Deutschland, 81–86.
- [21] Oggier, T., Büttgen, B. und Lustenberger, F. (2005): SwissRanger SR3000 and First Experiences Based On Miniaturized 3D-TOF Cameras. In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg., 1st Range Imaging Research Day*. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 97–108.
- [22] Pancheri, L., Stoppa, D., Gonzo, L. und Dalla Betta, G.-F. (2007): A CMOS Range Camera Based on Single Photon Avalanche Diodes. *tm – Technisches Messen*, 74(2), 57–62.
- [23] Pfeifer, N. und Briese, C. (2007): Geometrical Aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Geoinformation Sciences*, XXXVI(3/W52), 311–319.

- [24] Price, M., Kenney, J., Eastman, R. D. und Hong, T. (2007): Training and Optimization of Operating Parameters for Flash LADAR Cameras. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rom, Italien, 3408–3413.
- [25] Ringbeck, T. und Hagebecker, B. (2007): A 3D Time of Flight Camera for Object Detection. In Optical 3-D Measurement Techniques VIII. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, Bd. 1, 16–25.
- [26] Rohner, M., Siercks, K. und Hinderling, J. (2005): Single-Photon Detection for High Precision Ranging – a Trade-Off Study. In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg.*, 1st Range Imaging Research Day. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 33–42.
- [27] Ruangpayoongsak, N. (2006): Development of Autonomous Features and Indoor Localization Techniques for Car-Like Mobile Robots. Dissertation, Universität Siegen, Siegen, Deutschland.
- [28] Spirig, T., Marley, M. und Seitz, P. (1997): The Multitap Lock-In CCD with Offset Subtraction. IEEE Transactions on Electron Devices, 44(10), 1643–1647.
- [29] Teizer, J. (2005): Rapid Three-Dimensional Modeling of Construction Objects. In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg.*, 1st Range Imaging Research Day. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 89–95.
- [30] Wagner, W., Ullrich, A. und Briese, C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91(4), 223–235.
- [31] Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C. und Kraus, K. (2004): From Single-pulse to Full-waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Geoinformation Sciences, XXXV(B/3), 201–206.
- [32] Wallace, A. M., Buller, G. S. und Walker, A. C. (2001): 3D Imaging and Ranging by Time-Correlated Single Photon Counting. Computing & Control Engineering, 12(4), 157–168.
- [33] Yahav, G., Iddan, G. und Mandelbaum, D. (2007): 3D Imaging Camera for Gaming Application. In International Conference on Consumer Electronics, Digest of Technical Papers. 1–2.
- [34] Zywitzka, F., Massen, J., Brunn, M., Lang, C. und Görnig, T. (2005): One-to-Three-Dimensional Ranging for Future Automotive Safety Systems. In *Ingensand, H. und Kahlmann, T., Hg.*, 1st Range Imaging Research Day. ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 109–116.

Weblinks (Stand: Dezember 2007)

3DV Systems: <http://www.3dvsystems.com>

Canesta™: <http://www.canesta.com>

PMDTechnologies: <http://www.pmdtec.com>

MESA Imaging: <http://www.mesa-imaging.ch>

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Wilfried Karel Christian Doppler Labor „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung Technische Universität Wien Gußhausstraße 27-29/E122, A-1040 Wien. E-mail: wk@ipf.tuwien.ac.at