

Die Methodik der Vermessung und der Objektaufnahme mit einer 3D-PMD-Kamera

Michael Scherer und Susanne Lipkowski

Zusammenfassung

Eine 3D-PMD-Kamera wurde mit einer konventionellen 2D-Kamera zu einer kompakten Einheit kombiniert. Deren Eigenschaften ermöglichen neuartige messmethodische Vorgehensweisen. Es wird dargelegt, wie das 2D/3D-System einerseits frei beweglich im Raum zur Objektaufnahme und andererseits stationär – ähnlich einer Totalstation – zur Vermessung eingesetzt werden kann. Zur exemplarischen Erprobung und Evaluation wurden zwei unterschiedliche Prototypen realisiert. Es wird versucht, eine mögliche zukünftige Praxisrelevanz der neuen Messmethoden zu ergründen und die Chancen auszuloten, die Instrumente als eigenständige Messsysteme zu nutzen.

Summary

A system combining a 3D-PMD-camera – often called a ToF camera or a RIM-camera – with a common 2D-camera is described. This system can both operate during free motion in space and stationary in surveying, in special situations effectively replacing a total station. Two appropriate prototypes were designed. We focus on the methodological characteristics of the usage of the systems and try to evaluate their usability as universal and independent instruments.

Schlüsselwörter: PMD-Kamera, 3D-Kamera, ToF, RIM, Totalstation, Tachymeter

1 Zum Titel und zur Thematik¹

Im Titel wird zwischen »Vermessung« und »Objektaufnahme« unterschieden, weil auf diese Weise unterschiedliche Zielsetzungen hinsichtlich des Einsatzes einer PMD-Kamera betont werden sollen. Obschon die Termini oft synonym verwendet werden, verbindet man mit »Vermessung« eher punktbezogene messtechnische Arbeiten, z. B. bei Grundstücksvermessung, Tachymetrie, Absteckung oder Gebäudeeinmessung. Bei der »Objektaufnahme« ist eher an eine umfassendere, flächengreifende Beschreibung gedacht, auch durch Bild- und Farbinformationen hinterlegt, oft zur Erstellung eines virtuellen Modells. Im Folgenden sind die Begriffe in dieser differenzierenden Form zu verstehen. Beide Bereiche können unter Einsatz

des PMD-Kamera-Systems prinzipiell abgedeckt werden. Die Frage, ob in der Zukunft eine Fortentwicklung der vorgestellten Prototypen bis zur Praxisreife erfolgen wird, lässt sich nicht beantworten. Vieles spricht aber dafür, da methodisch neu- und andersartige Arbeitsweisen als mit dem bestehenden Instrumentarium möglich werden.

Eine PMD-Kamera erfasst die Geometrie der Umwelt in ihrer vollen Dreidimensionalität als Punktwolke mit einem einzigen »Klick«. Analog hierzu nimmt eine moderne Digitalkamera ein Bild auf, das die »Farbigkeit« der Umwelt und die Lage der Objektpunkte in Form einer Zentralperspektive wiedergibt. Der Begriff 3D-PMD-Kamera beschreibt einen Gerätetyp, der oft auch als ToF-Kamera (Time of Flight), RIM-Kamera (Range Imaging), 3D-Kamera oder nur PMD-Kamera bezeichnet wird. Hier wird der Begriff »PMD-Kamera« (PhotonicMixerDevice) beibehalten, nicht nur weil mit einer nach diesem Prinzip funktionierenden Kamera gearbeitet wird, sondern auch weil derzeit praktisch alle so unterschiedlich benannten Kameras das PMD-Messprinzip nutzen. Dabei ist jedes einzelne Pixel des Empfangschips ein eigener miniaturisierter elektronischer Distanzmesser, in dem auf spezielle Art das vom Objekt reflektierte optische Signal mit einem elektrischen Bezugssignal überlagert (gemischt) wird, daher Photo-Misch-Detektor (PMD).

Aus den Positionen des Pixels auf dem Empfangschip werden wie in der Photogrammetrie zwei Richtungen berechnet. Sie beschreiben zusammen mit der Distanz die Raumlage des Objektpunktes in Form von Polarkoordinaten im lokalen Kamera-Koordinatensystem. Verglichen mit 2D-Kameras ist die Pixelauflösung von 3D-Kameras noch gering. Mit 204×204 Pixeln – also etwa 41 k – weist die hier eingesetzte PMD-Kamera CamCube 2.0 der Firma PMD-Technologies (PMD-Technologies 2012) die höchste derzeit kommerziell erhältliche Auflösung eines PMD-Chips auf. Geplant sind aber bereits 3D-Kameras mit einer Auflösung von 512×480 Pixeln (BrainVision 2012).

Von Beginn an war vorgesehen, die koordinatenliefernde 3D-Kamera mit einer farbgebenden 2D-Kamera zu einem Messsystem zu kombinieren mit dem Ziel, die sich gegenseitig ergänzenden Daten für eine zuverlässigere und verbesserte Modellerstellung zu nutzen: Beide Kameras liefern eine Zentralperspektive, wobei die PMD-Kamera zwar Informationen zu weniger Punkten, dafür aber 3D-Koordinaten, die 2D-Kamera hingegen Farbwerte bei einer weitaus größeren Punktdichte erzeugt.

Bezüglich der aufzunehmenden Objekte war vorwiegend an Architektur und Facility Management gedacht, aber auch an Unfalldokumentation oder Innenraumerfassung

¹ Die Arbeiten waren eingebettet in das DFG-Forschungsvorhaben »3D-Kamera zur Bauaufnahme«. Für die vielfältige Unterstützung sei der DFG herzlich gedankt.

in Kriminalistik oder Speleologie, also an Anwendungen mit einem Aktionsradius der einzelnen Aufnahme von ca. 10 m bei gerade noch akzeptablen mittleren Koordinatengenauigkeiten. Aktuell ist mit einer absoluten Genauigkeit von $0,7 \text{ cm} + 2,4 \text{ cm} / 10 \text{ m}$ (s. u.) zu rechnen. Statt hoher geometrischer Erfassungstreue standen die Vollständigkeit, die Aufnahmegeschwindigkeit sowie ganz besonders das Design und die Erprobung teils neuartiger systemspezifischer Messmethoden im Vordergrund.

2 Das 2D/3D-Kamerasystem im Kontext der Sensorik zu Vermessung und Objektaufnahme

Vermessung geschieht vorwiegend über Tachymetrie und GNSS, Objektaufnahme durch Architekturphotogrammetrie, Terrestrisches Laserscanning (TLS) oder Musterprojektion. In letzterem Sektor erlangten die Kinect-Kameras im Kontext zu Computerspielen seit Kurzem erhöhte Aufmerksamkeit. Verfahrenstypische Eigenschaften der Erfassungsmethoden sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Die auf dem Prinzip des Vorwärtsschnitts beruhenden Methoden Photogrammetrie und Musterprojektion benötigen zur Koordinatenbestimmung mindestens zwei Bestimmungsstrahlen, z. B. aus zwei Bildern aufgenommen von unterschiedlichen Standorten. Die Länge der Aufnahmebasis in Relation zur Objektpunktentfernung bestimmt die Genauigkeit. Bei kleinen parallaktischen Winkeln zwischen den Bestimmungsstrahlen fällt die Tiefengenauigkeit mit wachsender Entfernung stark ab.

Die primären Messgrößen bei Tachymetrie, TLS und 3D-Kamera sind Polarkoordinaten. Die Tachymetrie liefert punktbezogene Einzelkoordinaten. Auch beim TLS

werden Koordinaten von Einzelpunkten ermittelt, in schneller Folge, meist in Vertikalstreifen mit vorgegebenen Richtungen. Gegenüber dieser sequenziellen Erfassung ermöglicht die PMD-Kamera eine dreidimensionale Momentaufnahme; alle Objektpunkte werden gleichzeitig auf den Empfangschip abgebildet – mit hoher Folgefrequenz. Die polare Messmethodik zeichnet sich gegenüber der Koordinatenbestimmung aus Richtungsschnitten durch eine homogenere Punktgenauigkeit bei zunehmender Objektentfernung aus.

Das 2D/3D-Kamerasystem, bestehend aus der farbgebenden 2D-Industriekamera und der 3D-PMD-Kamera mit parallel verlaufenden optischen Achsen erlaubt es, Echtfarben-Koordinatenfilme aufzunehmen. Ein Film entsteht aus der Abfolge von 3D-Momentaufnahmen mit einer Framerate von zur Zeit 10 fps. Die Auswertung der Daten mündet in der Berechnung dreidimensionaler RGB-eingefärbter Punktwolken als Basis zu virtuellen Modellen, Schnitten oder bemaßten Plänen. Dies kann mit Softwarepaketen erfolgen, die auch für die Verarbeitung von TLS-Daten verwendet werden. Es ist also generell bezüglich der Nutzung der generierten 3D-Punktwolken keine weitere spezielle Software nötig. Daher konzentriert sich dieser Beitrag vornehmlich auf die Hardware zur Erzeugung von Punktwolken, auf spezielle Eigenheiten des Instrumentariums – die Punktwolke entsteht ja als »Schnappschuss« – und daraus resultierende neue verfahrensmäßige Möglichkeiten der Objekterfassung.

Die Fusion von 2D- und 3D-Kameradaten findet man u. a. auch bei Lindner et al. (2007), Prasad et al. (2006) sowie Reulke (2006). Dort liegen die Schwerpunkte bei der Segmentierung bestimmter Bereiche aus der Punktwolke, bei Punktverdichtung durch Interpolation der 3D-Koordinaten und Verbesserung der Messwerte an Kanten. Hier hingegen wird gefragt, inwieweit das System gene-

rell als eigenständiges Instrumentarium zur Vermessung und Objektaufnahme einsetzbar ist und ob und wie der geodätischen Verfahrens- und Instrumentenentwicklung so Impulse gegeben werden können.

Tab. 1: Aufnahmemethoden und ihre Charakteristika

Methode	Bestimmungselemente	Gerät/Sensor
	Polarkoordinaten	
Tachymetrie	Individueller Einzelpunkt	Totalstation
Terrestrisches Laserscanning (TLS)	Sequenzielle massenhafte Einzelpunktaufnahme	Camera-View-Scanner oder Panorama-Scanner
Aktive 3D-Kamera	Erfassung von Punktwolken als Momentaufnahme bei hoher Framerate	3D-PMD-Kamera, ToF-Kamera, RIM
	Vorwärtsschnitt	2D-Chip
Photogrammetrie	Richtungen aus Bildern	2D-Kamera; Bündelausgleichung »Structure from Motion« u. a.
Musterprojektion	Parallaktischer Winkel, Streifen- und Arrayprojektion	Geräte hoher Genauigkeit und Kinect-Kamera

3 Das 2D/3D-Kamerasystem

3.1 Die 3D-PMD-Kamera CamCube 2.0

Um die Anforderungen des Systems an den Nutzer, die Eigenheiten der Distanzmessung und die Ansprüche an die Kalibrierung zu verstehen, ist es erforderlich, sich mit den Grundzügen der Funktionsweise der hier realisierten



Abb. 1: Das 2D/3D-Kamerasystem

Methodik der Distanzmessung vertraut zu machen, so wie man seinerzeit ein Grundwissen benötigte, um brauchbare Ergebnisse bei der elektronischen Distanzmessung (EDM) zu erhalten.

Für die 204×204 distanzmessenden Pixel (insgesamt 41.616 Pixel) werden die Entfernungen gleichzeitig ermittelt, basierend auf dem Phasenvergleichsverfahren (der Begriff ToF – Time of Flight = Laufzeitverfahren – für derartig arbeitende Kameras ist irreführend und streng genommen falsch). Eine großflächige Sendeeinheit, bestehend aus jeweils 42 Leuchtdioden beidseitig der Empfangsoptik, emittiert auf der Trägerwellenlänge 870 nm (Infrarot) ein amplitudenmoduliertes rechteckförmiges Signal mit einer Modulationsfrequenz von 20 MHz entsprechend einem Maßstab von 7,5 m. Nach Reflexion am Objekt gelangt es über das Linsensystem auf das distanzmessende Pixel-Array. Jedes PMD-Pixel besitzt einen lichtempfindlichen Bereich; die Anzahl der dort freigesetzten Elektronen hängt von der Lichtstärke des reflektierten Messsignals ab.

Hat man bei der herkömmlichen Distanzmessung nur eine einzige Empfangsdiode, ein einziges Streckensignal und ein inneres Bezugssignal zum Phasenvergleich, so werden im Photomischdetektor die vom empfangenen Signal generierten Elektronen zu einer von zwei Auslese-dioden A oder B geleitet (Hußmann 2000). Die Aufteilung selbst wird über ein vom Modulationssignal direkt abgeleitetes, rechteckförmiges elektrisches Signal bestimmt, das im Pixelinneren eine Potenzialveränderung bewirkt und so die Elektronen abwechselnd zu A und B leitet. Gegenüber dem in seiner Phasenlage je nach Distanz unterschiedlich verschobenen empfangenen Streckensignal wirkt es also als Bezugssignal. Durch den Kunstgriff pro

Pixel zwei Dioden zu haben, die im Gegentakt arbeiten, wird eine relativ gute Stabilität der ermittelten Phasenlage erreichbar.

Während einer wählbaren Integrationszeit werden die Elektronen in den Speicherkapazitäten, den Readoutdioden A und B, gesammelt und die resultierenden Ladungszustände gespeichert. Dies wiederholt sich viermal, wobei die Phasenlage des am Pixel anliegenden elektrischen Referenzsignals bezüglich der Phase des optischen Messsignals um jeweils 90° verschoben wird, sodass schließlich acht Ladungszustände vorliegen. Aus diesen werden die Werte A_1 , A_2 , A_3 und A_4 als Differenzen der Messwerte an den Gates A und B sowie die Werte ΣA_1 , ΣA_2 , ΣA_3 und ΣA_4 als Summe der Messwerte berechnet. Basierend hierauf ergibt sich die Entfernung – der Betrag der Phasenverschiebung zwischen Bezugs- und Streckensignal – wie folgt:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4} \right), d = \frac{c}{f} \cdot \frac{\varphi}{4\pi} \quad (1)$$

mit φ = Phasenwinkel, f = Modulationsfrequenz, d = Entfernung, c = Lichtgeschwindigkeit. Außerdem liegen pro PMD-Pixel die Amplitude a und die Intensität b (der Grauwert) vor:

$$a = \frac{\sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_2 - A_4)^2}}{2};$$

$$b = \frac{\Sigma A_1 + \Sigma A_2 + \Sigma A_3 + \Sigma A_4}{4}. \quad (2)$$

3.2 2D-Kamera und periphere Sensorik

Die farbgebende 2D-Kamera der Firma Basler (s. Datenblatt Basler-AG 2012) mit einer Auflösung von 5 Megapixel weist eine maximale Bildrate von 17 fps auf. Sie liefert die RGB-Werte zur Einfärbung der 3D-Punktwolken und dient der Verbesserung der 3D-Punktdichte (Lipkowski und Scherer 2013). Die Aufnahmezeitpunkte beider Kameras werden über elektrische Signale synchronisiert, die eine eigens gefertigte Triggerbox (Hardwaretrigger) erzeugt. Die Temperaturüberwachung geschieht über zwei Sensoren; ein zentrales Notebook steuert Datenerfassung und Datenspeicherung.

4 Einsatzmöglichkeiten des 2D/3D-Kamerasystems

Die Besonderheit einer PMD-Kamera, eine große Anzahl von Koordinaten mit einer einzigen Aufnahme zu erzeugen und die zusätzliche Möglichkeit der schnellen Aufnahmefolge (> 10 fps), schufen die Voraussetzung, auf diesen typischen Eigenschaften beruhende spezielle neue

Messmethoden zu erproben. Verschiedenartige Bewegungen des Systems sowie ruhende und bewegte Objekte lassen sich unterscheiden. Entsprechende Kombinationen von Systemhandhabung und Objektstatus erlauben entsprechend verschiedenartige Nutzungen (Tab. 2).

Im Modus (A) wird die PMD-Kamera – starr montiert – in der Verfahrenstechnik oder zur Kontrolle von Objekt-

Tab. 2: Betriebsmodi des 2D/3D-Kamerasystems

Systemstatus	Objektstatus
A) Starr ausgerichtet	Statisch (plus bewegt)
B) Drehbar um zwei feste Achsen, Folgeaufnahmen bei der Drehung	Statisch
C) Völlig freie Bewegung im Raum, automatische Aufnahmeabfolge	Statisch
D) Kombination von A) und B)	Statisch und bewegt

und Personenbewegungen eingesetzt, z.B. zur Beobachtung des Fahrerverhaltens im KFZ. Geodätisch mögliche Nutzungen des Systems gemäß (A) sind in Abschnitt 4.2.1 angerissen.

Sehr unterschiedlich in Verfahrensweise und Anwendung gestalten sich der stationäre Einsatz gemäß (B), bei dem das System an einer Stelle verbleibt und lediglich verschwenkt wird, sowie die dynamische freihändige Bewegung im Raum gemäß Modus (C). Diese beiden Anwendungsmodi wurden unterschiedlich intensiv erprobt.

4.1 Freie Bewegung des 2D/3D-Systems im Raum

Durch die Aufnahme von Koordinatenfilmen bei freier Bewegung im Raum, durch Verschwenken oder Umfahrung des Objekts lassen sich auch stark undulierte und hinterschnittene Situationen gut erfassen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Einzelaufnahmen ausreichend überdecken, sowohl die unmittelbar aufeinanderfolgenden als auch benachbarte Streifen. Die Situation ähnelt insofern der eines Bildfluges, jedoch mit der zusätzlichen Erschwernis möglicherweise großer Verdrehungen und Translationen zwischen den Aufnahmen und sehr unterschiedlichen Überdeckungen. Dies wird weitgehend wettgemacht durch die zu jedem Bild vorliegenden Koordinaten. Wegen der großen Ähnlichkeit der Struktur der benachbarten lokalen Punktwolken ergeben sich Vorteile für die Registrierung (s.u.).

Um einen möglichst gleichmäßigen, gerichteten Bewegungsablauf mit etwa gleich großen Überlappungszonen zu erreichen, wurde basierend auf Erfahrungen mit der Aufnahme von Kinofilmen das 2D/3D-System auf einer Steadycam (Schwebestativ) montiert (zur Technik s. Holway 2003). In diesem Betriebsmodus (Tab. 2, C) sind Ak-

kus, Hardwaretrigger und Hauptcomputer im Rucksack des Operators untergebracht (Abb. 2). Die Kontrolle der Aufnahmesicht und die Steuerung des Systems erfolgen über einen Touchscreen am Stativ der Steadycam. Dies ermöglicht die Bedienung durch nur eine Person.

Vor der Aufnahme sind für die PMD-Kamera die Integrationszeit – zur Erzielung qualitativ guter Distanzmessungen – und die Framerate einzustellen. Neben den Daten

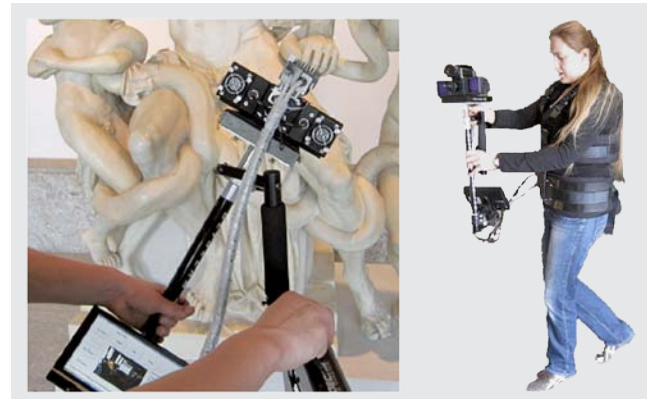


Abb. 2: Das 2D/3D-System auf einer Steadycam

gemäß Gl. 1 zur Bestimmung von Strecken, Signalamplituden und Grauwerten, werden zusätzliche Informationen abgespeichert, sog. Flags zur Bewertung der Qualität der pixelindividuellen Integrationszeit. Sie ermöglichen, einzelne Messwerte auszusondern. Gegebenenfalls ist die Messung mit veränderter Integrationszeit zu wiederholen; nur die jeweils qualitativ guten Daten werden zur Registrierung herangezogen. Die Informationsfülle macht es derzeit noch unmöglich, online zu registrieren, d.h. die Koordinaten sofort in ein einheitliches System zu transformieren. Um dem Operateur mit der Steadycam aber bei der Aufnahme z.B. eventuelle Lücken in der erfassten Situation aufzuzeigen, ist eine Rückkopplung in Zukunft unabdingbar.

Während die vollautomatische Registrierung von beliebig zueinander orientierten Punktwolken schwierig ist, wenn sie wie im TLS von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen sind, bzw. nur geringe Überlappung aufweisen, hat man hier im Allgemeinen benachbarte, sich überlagernde Aufnahmen. Signalisierte Passpunkte zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade entfallen; eine Grobregistrierung erübrigt sich.

Die hier entwickelten Ausgleichungsmodelle zur Bestimmung der Transformationsparameter basieren auf homologen Feature-Punkten und auf homologen Flächen zwischen den Punktwolken im lokalen Kamerasystem der Einzelaufnahmen. In Abhängigkeit von der Geometrie des aufgenommenen Objektes zeigten die untersuchten Modellansätze Stärken und Schwächen. Um eine weitgehend automatisierte Registrierung der Punktwolken zu erreichen, wurden die unterschiedlichen Ansätze in einem intelligenten Algorithmus vereinigt. Somit kann allein aus den gewonnenen Messdaten der wahrscheinlich geeignetste Ansatz automatisch gewählt werden, um die

Transformation der einzelnen lokalen Punktwolken in ein einheitliches Koordinatensystem zu bestimmen (Lipkowski 2013). Eine nachfolgende Feinregistrierung erfolgt mit dem ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point).

Für größere, streifenweise mäanderförmig abgetastete Objektbereiche werden die Streifen untereinander durch die Ausbildung eines auszugleichenden Rasters von Feature-Punkten vernetzt. Die Weiterbehandlung der Punktwolke geschieht schließlich mit gängigen Programmen zur Verarbeitung von RGB-eingefärbten Punktwolken.

Der methodische Unterschied zwischen der dynamischen Arbeitsweise mit einem frei beweglichen System gemäß Modus (C) und der stationären Arbeitsweise nach Modus (B) wird deutlich, wenn man sich vorstellt, mit dem dynamischen System einen größeren, einfarbig gehaltenen Innenraum zu erfassen: Die sechs Freiheitsgrade müssen durch gegenseitiges Matching der lokalen RGB-Punktwolken ermittelt werden. Es sind aber nicht nur Translation und Rotation u.U. engstens miteinander korreliert. Darüber hinaus können Translationen – z.B. in Bezug auf eine untexturierte Ebene – nicht ermittelt werden; man benötigt zusätzliche Information. Anders bei der stationären Nutzung des 2D/3D-Systems. Hier entfallen die Translationsparameter, und man beschränkt sich im Prinzip auf nur einen Freiheitsgrad – eine Rotation. Wegen der methodisch einfacheren Handhabung und weil die stationäre Verfahrensweise in Lipkowski (2013) nicht näher beschrieben ist, wird im Folgenden auf das stationäre Verfahren und die resultierenden, messmethodisch interessanten praktischen Möglichkeiten vertieft eingegangen.

4.2 Das 2D/3D-System als Tachymeter, zur massenhaften Punktaufnahme, Dokumentation und Visualisierung

4.2.1 Die »2D/3D-Totalstation« ohne Teilkreis

Im Modus (B) ist das System ortsfest und auf einem Stativ fixiert (Abb. 3), zweiachsig drehbar um Steh- und Kippachse wie das Fernrohr eines Tachymeters. Analog den polaren Primärdaten der tachymetrischen Messung

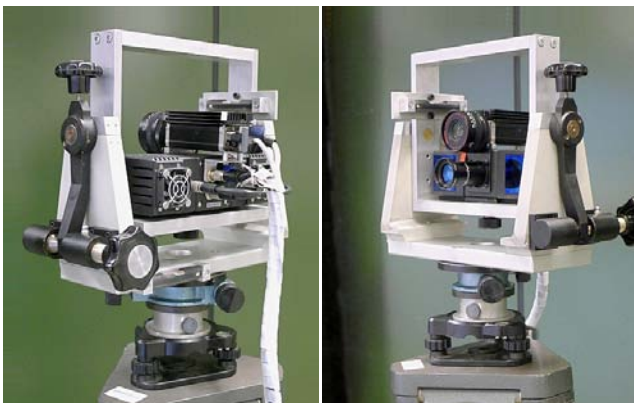


Abb. 3: Prototyp der 2D/3D-Kamera-Totalstation

(Horizontalrichtung, Zenitwinkel und Strecke) liefert der CamCube jedoch pro Momentaufnahme mehr als 41.000 Polarkoordinaten innerhalb des Blickfeldes (Raumwinkel ca. 40 gon) und die 2D-Kamera das zugehörige Bild. Fügt man größere Bereiche nach Drehung um eine der Achsen überlappend aneinander, so lässt sich der Winkel bestimmen, der bei Tachymetern aus der Teilkreisablesung resultiert. Die »2D/3D-Totalstation« benötigt jedoch keine Teilkreise; der Betrag der Drehung wird hier über redundante Verfahren bestimmt. Unterschiedliche Methoden sind zwingend erforderlich. Sie werden im Folgenden vorgestellt. Inwieweit die Winkelberechnung im Einzelfall über ein einziges Verfahren oder integriert erfolgen sollte, wird noch untersucht.

1. Richtungsbestimmung über sphärische Panoramen

Die Panoramen werden ausschließlich aus Bildern der 2D-Kamera erstellt. Die bekannte Methode funktioniert umso besser, je mehr differenzierte und verschiedenfarbige Textur die sich überlappenden Fotos enthalten. Die Überlappungsbereiche dienen der Registrierung (= Stitching), also der Minimierung der Lateralunterschiede der Pixel, die denselben Objektpunkten zuzuordnen sind. Häufig sieht man Panoramen aus Bildfolgen, die mit einer Kamera aufgenommen sind, deren optische Achse horizontal verläuft und die von Bild zu Bild um eine vertikale Umdrehungsachse durch die Eintrittspupille des Objektivs (Stehachse) verschwenkt wird, die also möglichst parallaxenfrei montiert ist (Nodalpunkt). Ein gut nachvollziehbares Beispiel für die Richtungsmessung im Panorama findet sich unter Labonde (2012). Ein Klick ins Panorama, dem nun zusätzlich die Strecken aus der Messung mit der PMD-Kamera hinterlegt werden, liefert dann die zum jeweiligen Bildpunkt gehörige dreidimensionale polare Objektkoordinate.

Bezüglich der vertikalen Verschwenkung reichen feste Zenitwinkелеinstellungen aus (z. Zt. durch schräg montierte Röhrenlibellen realisiert). Die Überlappung kann so auf ein Minimum beschränkt werden. Die hiesige 2D-Kamera erreicht eine Winkelauflösung von 0,02 gon entsprechend 3 mm Querabweichung bei 10 m Entfernung (zur Steigerung der Koordinatenauflösung vgl. Lipkowski und Scherer 2013). Zur Überprüfung der Qualität der Richtungsmessung mittels Panoramen unter verschiedenen Belastungssituationen ist weitere Entwicklungsarbeit zu leisten.

Nun könnte man meinen, eine Kamera und ein Laserdistanzmesser anstelle des 2D/3D-Systems ergäben bereits eine teilkreislose Totalstation als preisgünstiges »Bildbasiertes Tachymeter« mit per se integrierter Dokumentation der Aufnahmesituation. Fotos alleine reichen im Allgemeinen jedoch nicht zum sicheren Stitching aus; ein von Textur und Objektstruktur völlig unabhängiges zusätzliches Verfahren ist nötig.

2. Richtungsbestimmung über Koordinaten-matching

In kontrastarmer Umgebung – z.B. in einem Raum mit geweißten Wänden – versagt das Stitching. Die aktive, das infrarote Signal aussendende 3D-Kamera dagegen liefert weiterhin Koordinaten. Zur Berechnung des Winkels zwischen zwei Messungen alleine aus Koordinaten ist es nicht erforderlich, dass das Objekt Struktur aufweist: Eine ebene weiße Wand erscheint nach der Drehung des 2D/3D-Systems um einen Winkel α im lokalen Koordinatensystem der zweiten Messung um genau diesen Winkel gedreht gegenüber der ersten Aufnahme, was den identischen Ausschnitt in beiden lokalen Koordinatensystemen betrifft (Abb. 4). Durch Mittelung über tausende Koordinatenwerte geht das Rauschen der Distanzmessung in den zu bestimmenden Winkel kaum ein.

Weist das Objekt Strukturen auf, so können diese helfen, das Ergebnis zu verbessern, bzw. den einfachen iterativen Prozess der Bestimmung des Drehwinkels aus Koordinaten des überlappenden Ausschnitts zu beschleunigen. Die Methode funktioniert nur dann nicht, wenn das Objekt stark gekrümmt ist und sich die Station im Zentrum des Krümmungskreises (Zylinder, Kugel) befindet. Sofern Textur vorhanden ist, kann dann die Richtungsbestimmung via Panorama erfolgen. Dass beide redundante Methoden zum Matching – 2D-Bild und 3D-Punktwolke – ausfallen, ist unwahrscheinlich. Im Gegensatz zum dynamischen Aufnahmemodus – eventuell nicht bestimmbare Translation (s.o.) – funktioniert das auf einen Freiheitsgrad beschränkte statische Verfahren sicherer. Horizontale und vertikale Verschwenkung lassen sich separat bestimmen.

3. Richtungsbestimmung durch Ausreißerbeobachtung

- a) Eine Signalüberlagerung an Objektkanten bewirkt Streckenfehler in der Richtung zur Kante (Scherer 2009). Solche Ausreißer kann man über Tests im Nachbarschaftsvergleich feststellen. Da sie nach einer Ver-

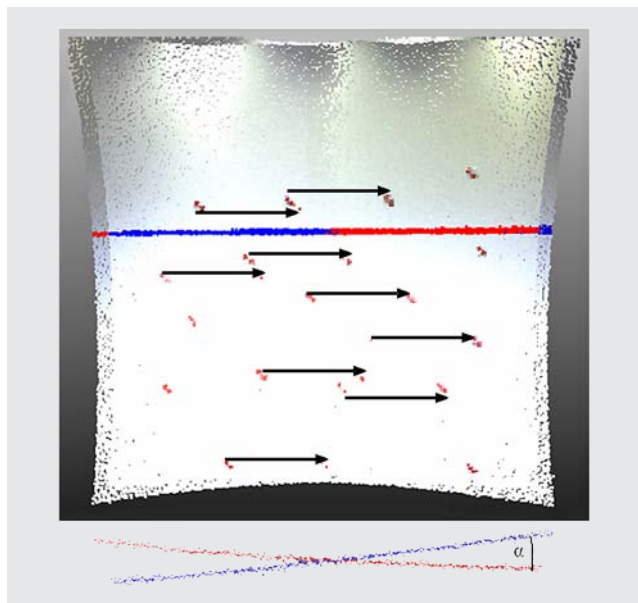
drehung der Station um den Winkel α in derselben Richtung zum Objekt in ähnlicher Form auftreten, sind sie analog den Feature-Punkten zum Matching nutzbar.

- b) Die Primärinformationen über die Qualität der Elektronenmengen in den Integrationsbereichen eines jedes Pixel (Flags) können als »Fehlinformationen« in ähnlicher Weise zur Richtungsbestimmung herangezogen werden.

Gleich nach dem Matching – der Registrierung – liegt ein auf den Standpunkt bezogenes, quasi vollständiges Modell der Umgebung vor, ein für viele Zwecke schon hinreichendes Endergebnis unmittelbar nach Aufstellung, Horizontierung und Überstreichen des Aufnahmebereiches. Dies ist ein Novum. Muss man, wenn zugleich Anschlusspunkte zur Georeferenzierung erfasst sind, darüber hinaus überhaupt noch messen? Reicht das Modell für Anschlussarbeiten? Einzelpunkte (vgl. Abb. 5) sind eventuell gesondert zu behandeln, oder es folgen Abstechungen (s.u.).

4.2.2 Zum Begriff »2D/3D-Kamera-Totalstation«

Es ist zu hinterfragen, inwieweit die Bezeichnung »Totalstation« hier gerechtfertigt ist. Das ursprünglich mechanisch-optische Tachymeter erlaubte die schnelle Ermittlung von Polarkoordinaten mit im Vergleich zu den Richtungen erheblich ungenaueren Strecken. Elektronische Distanzmessung und elektronische Winkelabtastrung prägten den Terminus elektronisches Tachymeter. Der Begriff Totalstation tauchte in den 80er Jahren auf, als die Primärdaten nicht nur erfasst, sondern im integrierten Rechner verarbeitet, Daten gespeichert wurden, als Kommunikation mit externen Rechnern erfolgte usw. Moderne Totalstationen sind motorisiert, mit GNSS georeferenziert, sie suchen Reflektorprismen automatisch, verfolgen das Prisma und verfügen als Video-Totalstationen über Kameras zur Messung und Dokumentation. Die Machbarkeit und der Nutzen solcher Funktionalitäten konnte vor etwa zehn Jahren mit den ersten Prototypen einer



◀ Abb. 4: Aufnahmen einer weißen Wand (RGB-eingefärbte Koordinatenpixel).

Oben: Überlagerung zweier um den Horizontalwinkel α gegeneinander gedrehten lokalen Koordinatensysteme. Die Pfeile zeigen den Betrag der Verschiebung zwischen den Koordinatensystemen (rot → blau) infolge der Drehung. Die wegen der Verschneidung teils verdeckten Messmarken dienen nur der Illustration und Kontrolle der Verschiebung; nicht zur Bestimmung von α . Unten: Zur Verdeutlichung, wie der Winkel α in der Überlagerung der lokalen Systeme auftritt, ist ein schmaler, willkürlich ausgewählter Horizontalstreifen in der Draufsicht dargestellt.

Video-Totalstation demonstriert werden (Juretzko 2005, Scherer und Lerma 2009).

Schaut man sich die 2D/3D-kamerabasierte Totalstation (inkl. Steuerrechner) unter dem Aspekt der Funktionalitäten einer heutigen Totalstation an, weist sie im Prinzip alle Eigenschaften einer modernen Video-Totalstation auf. Darüber hinaus ermöglicht sie die Aufnahme von ca. 200.000 Punkten pro Sekunde (bei 5 fps), wobei der Koordinatenfilm per se mehr Informationen bereitstellt als z.B. das sequenzielle Laserscannen (s.u.). Betrachtet man das 2D/3D-System hinsichtlich Reichweite und Genauigkeit, so schneidet es im direkten Vergleich derzeit weniger gut ab. Unterschiedliche Indizien deuten aber auf eine rasche Verbesserung der diesbezüglichen Daten hin. Die Autoren begannen die Arbeiten im Jahr 2008 mit einem 2D/3D-System bestehend aus einer – damals schon im Vergleich zu anderen 3D-Kameras weniger störlichtanfälligen – Kamera 3k-S von PMD-Technologies. Das Signalrauschen und die funktionale Restabhängigkeit der gemessenen Strecken von Umgebungslicht erinnerten an Probleme der elektrooptischen Distanzmessung um 1975. Mit der PMD-Kamera CamCube 2.0 von 2010 war die Streckenmessung gleich um den Faktor zwei besser ohne nennenswerten Einfluss von Fremdlicht. Die Vielfalt der Funktionen und die für viele Operationen genügende Reichweite (weit über den Eindeutigkeitsbereich hinaus, s.u.) rechtfertigen nach unserer Meinung die Bezeichnung dieses Gerätetypus als 2D/3D-Totalstation. Die prinzipiell gut automatisierbare stationäre Systemnutzung wurde vorerst in Teilbereichen erprobt; diese werden nachfolgend vorgestellt.

4.2.3 Zur praktischen Messung mit der 2D/3D-Totalstation

Die aufgeführten Beispiele belegen die Relevanz des Systems für praktische Aufgaben:

1. Überbrückung größerer Entfernungen

Üblicherweise wird eine moderne Totalstation innerhalb eines prismensignalisierten Festpunktfeldes orientiert. Dies ermöglicht auch die 3D-kamerabasierte Totalstation, denn zu kooperativen Zielen (Reflektoren) wurden trotz der vergleichsweise geringen Sendeleistung Distanzen

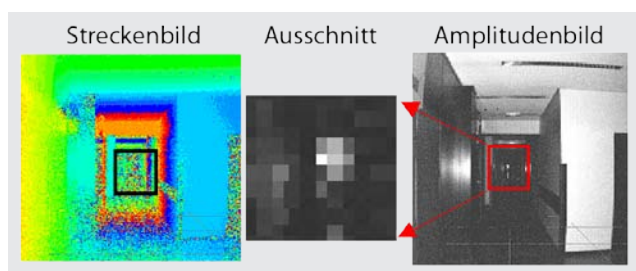


Abb. 5: Raumaufnahme mit Anschluss eines entfernten Reflektorstandpunktes (ca. 63 m). Die Identifizierung geschieht durch Kombination von Maximalintensitäten und größten Distanzen; eine hohe Genauigkeit wird dank des guten Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht.

um 100 m (Einzelprisma) gemessen dank der hervorragenden Unterdrückung des störenden Umgebungslichtes. Diese Entfernungen wurden für zwei verschiedene Modulationsfrequenzen (s.u.) mit einer Präzision von etwa 2 cm bis 2,5 cm bestimmt. Die absolute Abweichung lag innerhalb der seitens der Kalibrierung zu erwartenden Unsicherheit. Die Fähigkeit des Systems, passable Entfernungen zu überbrücken, ermöglicht es, wie in der terrestrischen Vermessungspraxis üblich, unterschiedliche Standpunktsysteme miteinander zu verknüpfen und örtliche Systeme in ein globales Netz einzubinden (Abb. 5).

2. Automatische Punktidentifizierung und indirekte Koordinatenbestimmung

Nicht nur zu Prismenreflektoren, auch zu Kugeln, die mit reflektierendem Material belegt waren, wurden akzeptable Reichweiten >40 m erzielt (Abb. 6). Zur sicheren Signalisierung von Bodenpunkten wurde ein Stab mit

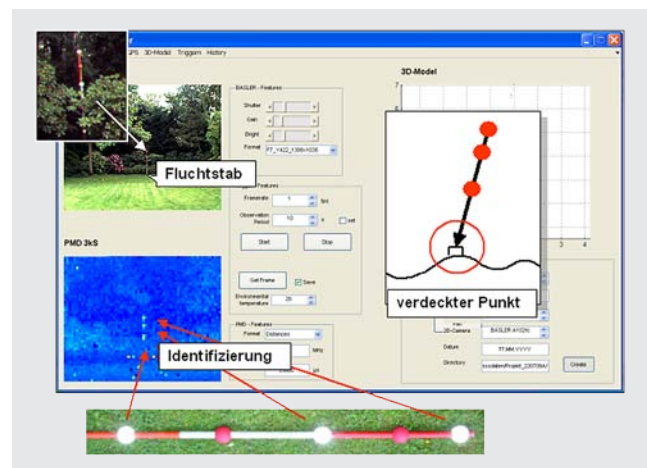


Abb. 6: Automatische Erkennung signalisierter Punkte

mehreren Reflektorkugeln in definierten Abständen gefertigt. Das Abstandsmuster wird im nachgeschalteten Filterprozess in den Daten gesucht (vgl. Waschke et al. 2003). Das direkt reflektierte Signal hebt sich gegenüber der diffus reflektierenden Umgebung ab. Eine Kontrolle erfolgt über definierte Zielmarkenabstände. Um Probleme wegen eventuell zu großer Signalintensität zu vermeiden, werden die Koordinaten der Stabspitze aus Messungen zu den schwächer reflektierenden rot eingefärbten Kugeln (optimale Reflexion im Infrarot) auf dem Stab berechnet.

3. Lokale Vermessungsarbeiten

Wenn sich der Operateur mit dem automatisch detektierbaren Stab im Messbereich einer feststehenden Kamera (Modus A oder B, Tab. 1) bewegt, kann ähnlich dem Einmannbetrieb mit einer prismenverfolgenden Totalstation gearbeitet werden. Man könnte die Messung per Fernsteuerung auslösen. Zur Erhöhung der Reichweite ließen sich die Reflektorkugeln durch kleine Rundumprismen ersetzen.

4. Absteckung

Die Realtime-Überwachung und -Steuerung bei Absteckungen und Objektpositionierungen ist sehr effizient möglich infolge der für die 3D-Kamera charakteristischen Erfassung der kompletten Punktwolke in einer Momentaufnahme, beispielsweise bei Montage und Ausrichtung von Platten. Zusatzinformationen könnten dem Monteur in ein Head-Mounted-Display eingeblendet werden, um die Arbeiten rationeller durchzuführen (Augmented Reality).

5. Georeferenzierung mittels GPS

Versuchsweise erprobt wurde bereits 2008 mit dem Vorläufer des CamCube 2.0, der PMD-Kamera 3k-S, die Einbeziehung einer bewegten Satellitenantenne in das Kameragesichtsfeld (Modus A, Tab. 1). Die mit Reflektorkugeln signalisierte Antenne (analog Fluchtstab, s.o.) wurde durch das Gesichtsfeld geführt, die Zeitpunkte der GPS-Koordinatenausgabe wurden registriert und die 3D-Kamera hierzu synchronisiert. Kameraposition und -blickrichtung konnten so direkt georeferenziert werden. Mit modernem Equipment ist das Verfahren zu verfeinern.

6. Fein- und Grobmaßstabsmessung

In den aufgeführten Praxisbeispielen waren die Entfernungen oft größer als die Feinmaßstabslänge von 7,5 m. Also wurde nur das Reststück zu den Vielfachen von 7,5 m angezeigt. Zur Bestimmung der Anzahl der ganzzahligen Maßstabsvielfachen erfolgte eine zweite Distanzmessung mit einer um 5 % bzw. 10 % verminderten Modulationsfrequenz. Aus den Differenzen zwischen zwei Messungen ließ sich – wie schon in den Anfängen der elektronischen Entfernungsmessung allgemein üblich – die Anzahl der Vielfachen des Feinmaßstabes bis zur neuen Eindeutigkeitsgrenze, definiert durch die Differenzfrequenz, ermitteln. Die Frequenzumstellung erfolgte aus dem Programm heraus problemlos über den Steuerrechner des CamCube.

5 Zur Kalibrierung

Die praktische Nutzung des Systems erfordert eine hinreichende und damit notgedrungen recht umfangreiche Kalibrierung. Dieser Sektor wird erst in diesem späten Abschnitt und relativ kurz behandelt, da infolge der raschen technischen Entwicklung auf dem Gebiet der 3D-Kameras laufend Verbesserungen von Genauigkeit und Stabilität zu beobachten sind. Strebt man nur eine mittlere Genauigkeit an, so werden Überlegungen zu dem Thema vermutlich rascher veralten als die hier in den Vordergrund gestellte Messmethodik. Dennoch sind Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchung in gewissem Umfang notwendig.

Ein im Kontext mit Gerätekalibrierungen häufig auftretendes Dilemma spiegelt sich in den Begriffen Systemkalibrierung und Einzelkalibrierung wieder. Bei der Systemkalibrierung versucht man, das Messsystem für

alle Anwendungsbereiche anhand von Sollwerten zu kalibrieren, ohne die Einflüsse detailliert zu kennen. Bei der Einzelkalibrierung geht man davon aus, alle Einflusskomponenten zu kennen, und man bestimmt die Parameter der beschreibenden Gleichungen. Diese Vorgehensweise erscheint methodisch sauberer, ist bei komplexen Messsystemen aber kaum anwendbar, da viele Zusammenhänge im Dunkeln liegen. Gemäß Tab. 3 wirkt bei dem 2D/3D-Kamerasystem eine beträchtliche Anzahl von Einflussgrößen; nur wenige Zusammenhänge sind funktional identifizierbar. Die dunkelgrau gekennzeichneten Flächen enthalten Angaben zu Abweichungen, die durch Einzelkalibrierung zu bestimmen waren. Eine Systemkalibrierung wurde nachgeschaltet.

Zwischen systemimmanenten Einflüssen sowie objektbedingten, d.h. mehr auf die Objekteigenschaften zurückzuführenden Abweichungen wurde unterschieden. Die im Kameraaufbau und PMD-Chip selbst begründeten Abweichungen sind modellierbar, soweit es sich um die aus der elektronischen Distanzmessung bekannten Abweichungen handelt wie Additionskorrektur, Phasenfehler oder Temperatureinfluss. Über einen inneren Lichtweg könnte, wie in der elektronischen Entfernungsmessung üblich, der temperaturbedingte Effekt weiter minimiert werden (vgl. Kahlmann und Ingensand 2007). Die Hersteller von PMD-Technik berücksichtigen zukünftig derartige aus der elektronischen Distanzmessung bekannte Zusammenhänge. Der verglichen mit dem klassischen Phasendistanzmesser komplexere Aufbau eines Pixels, aber auch die enge physische und elektrische Nachbarschaft der Pixel auf dem Sensorchip bewirken weitere Distanzabweichungen, einige ähnlich denen durch Phasenheterogenitäten von Sende- und Empfangsdioden oder Fokussierrestabweichungen bei herkömmlichen EDM. Letztlich müsste jedes Pixel als eigenständiger Distanzmesser behandelt, d.h. gesondert kalibriert werden. Da dies derzeit praktisch nicht möglich ist, behilft man sich mit der Betrachtung ausgewählter Pixel – z.B. in der Mitte und in großen Schritten hin zu den Randbereichen – oder lässt eine teilindividuelle Kalibrierung gelten und bestimmt mehrdimensionale Kalibrierfunktionen, z.B. ein Polynom zur Beschreibung der Additionskorrektur, das für ein mittleres Pixel des Arrays gilt und bei dem für Pixel radial zum Rand die Koeffizienten Werte in Abhängigkeit vom Radius annehmen.

Um versuchsweise viele Pixel in einem automatisch ablaufenden Prozess zu kalibrieren, wurde die 3D-Kamera auf eine Totalstation montiert, zur Maximumsuche gegenüber einer sehr kleinen reflektierenden Marke schrittweise verschwenkt, und die Entfernungen wurden – wie bei der Untersuchung eines EDM auf Phasenheterogenitäten – ermittelt. Die Ergebnisse (Abb. 7) geben einen Einblick in die reale Struktur der Einzelpixel und ermöglichen ansatzweise die individuelle Korrektur der jeweiligen »Pixeldistanzmesser«. Werden alle hier ermittelten Korrekturen angebracht, ist für die erzeugten dreidimensionalen Koordinaten mit einer absoluten Genauigkeit

Tab. 3: Einflüsse auf die Messung und Hinweise zur Kalibrierung

Effekt	Einflussparameter/Ursache	Berücksichtigung/Kalibrierung
1. PMD-Kamera		
Systemimmanente Einflüsse		
Entfernungsmessung		
Additionskonstante	Elektrischer Nullpunkt $\neq$ mechanischer Nullpunkt	Numerische Verbesserung
Additionskorrektur	Konstant, Ursache s. a. Fokussierung	Numerische Verbesserung
Zyklische Abweichung	Oberschwingung, Abweichungen von der Soll-Signalform	Korrekturfunktion
Maßstabsabweichungen (zu vernachlässigen)	Frequenzablage	Numerische Verbesserung (vermischt mit Additionskorrektur)
Temperaturstabilität	Vorwiegend Außentemperatur	Korrekturfunktion, innerer Lichtweg
Einlaufverhalten	Vorwiegend Innentemperatur	Korrekturfunktion, innerer Lichtweg/ Abwarten
Superposition (scattering)	Multiple Reflexion bei der optischen Abbildung	Teils wirksames funktionales Modell vorhanden
Unschärfe Pixelabbildung	Fokussierung	Kalibrierung für verschiedene Distanzmessbereiche
Sättigung	Tageslicht/Gleichlicht	Suppression of Background Illumination (SBI)
Internes Übersprechen (crosstalk)	Überlagerung elektrischer Signale	In vorangehenden Parametern berücksichtigt
Unsymmetrische Pixelausleuchtung (Teilanalogue zur Phaseninhomogenität)	Variierende wirksame Pixelgröße	Akzeptieren, Verminderung durch fingerstrukturiertes PMD-Pixeldesign
Inhomogene Wellenfront	Verbreiterung und Verzerrung des Sendesignals	Lageverbesserung der Sende-LEDs von Herstellerseite
Bewegungsartefakte	Zeitversetzte Ermittlung der Primärdaten	Anderer Pixelaufbau; kontrollierte Bewegung
Langzeitinstabilität	Alterungseffekte	Unbekannt, Trend aus wiederholter Kalibrierung
Richtungsmessung		
Innere Orientierung, Verzeichnung	Optische Abbildung/Fleckform	Kalibrierung
Unsymmetrische Intensität	Pixeltypische Abweichung	Einzelpixelkalibrierung
Objektbedingte Abweichungen		
Distanzabweichungen	Unterschiedliche Reflektivität	Vernachlässigbar
Über-/Untersteuerung	Zu lange/kurze Integrationszeit	Anpassung der Integrationszeit
Richtungsungenauigkeit	Reflexionsunterschiede in der Pixelfläche am Objekt	Akzeptieren
Unterschiedlicher Untergrund: Schrägeinfall bzw. Hintergrundfarbe	Intensität des reflektierten Signals	Korrekturfunktion/unterschiedliche Integrationszeit
Optisches = externes Übersprechen	Mehrfachreflexionen an Objekt-oberflächen	Analyse von Folgeframes; echte ToF-Kamera
Objektbewegungen	Unschärfe (s. a. Bewegungsartefakte)	Begrenzung der maximalen Bewegungsgeschwindigkeit
Ungleichmäßige Kameraführung (Bedienfehler)	Framesprünge erschweren Registrierung	Steadycam
2. 2D-Kamera		
Richtungsabweichung	Verzeichnung/Abbildungsfehler	Kalibrierung
Innere Orientierung	–	Kalibrierung
3. Relationen zwischen 2D- und 3D-Kamera		
Relative Orientierung	–	Kalibrierung
Synchronisierung des Aufnahmezeitpunktes	Triggerfehler	Hardwaretriggerung

von 0,7 cm + 2,4 cm / 10 m zu rechnen, abhängig von den Bedingungen bei der Aufnahme (Lipkowski 2013).

6 Perspektiven

Während Fragen zur Genauigkeit von PMD-Kameras heute noch im Vordergrund stehen, wurde der Schwerpunkt hier auf Messsysteme und Messmethodik gelegt. Die methodischen und zweifellos auch auf Seiten der Geräte- und Arbeitskosten beträchtlichen Vorteile der vorgestellten Vorgehensweisen können aber erst voll ausgeschöpft werden, wenn eine im Vergleich zu aktuellen geodätischen Instrumenten passable Streckenmessgenauigkeit erzielt wird. Dies wurde nicht abgewartet, denn verschiedene Indizien lassen darauf schließen, dass die Genauigkeitsforderungen in absehbarer Zeit erfüllt sein könnten:

1. Der Fortschritt auf Seiten der Hardware war innerhalb weniger Jahre erheblich. Die Vorgängergenerationen des CamCube 2.0 wiesen eine wesentlich geringere Auflösung auf, waren empfindlicher gegenüber Fremdlicht und schwerfällig bei Änderung der Integrationszeiten, hatten eine geringere Reichweite, waren nicht programmierbar, instabiler bezüglich typischer Parameter, ohne Ausgabe von Flags zur Beurteilung der Datenqualität u. v. m.
2. Der in Tab. 3 aufgeführte Effekt der Entfernungsdeformation infolge optischen Übersprechens stellt die größte Einschränkung für eine präzise Aufnahme dar (Scherer 2009), da er großräumige systematische Deformationen wie z. B. Ausrundungen von Innenkanten bewirken kann. Der Einfluss von externem Übersprechen lässt sich aber stark minimieren, wenn die Phasenentfernungsmessung durch Laufzeitmessung (echtes ToF) ersetzt wird; neue Entwicklungen weisen in diese Richtung (Piatti 2010).
3. Alle anderen »Wunschparameter« werden wahrscheinlich schon infolge der breiten Nutzung von PMD-Kameras in Industrie, Fertigung, Medizin und Fahrzeugtechnik rasch verbessert. Verglichen hiermit verlief die Entwicklung der EDM zwischen 1950 und 1990 langsam, auf den schmalen Sektor der Vermessung ausgerichtet.

Insbesondere Fragen zur Genauigkeit werden sich, wegen des offensichtlich hohen Innovationsdrucks, voraussichtlich bald anders stellen als heute. Sie wurden hier daher untergeordnet behandelt und der Fokus wurde auf die methodisch neuen Möglichkeiten gelegt.

Das freihändig flexibel dynamisch einsetzbare Low-cost-System 2D/3D-Kamera auf der Steadycam wurde sowohl seitens der Hardware als auch auf Seiten der Re-

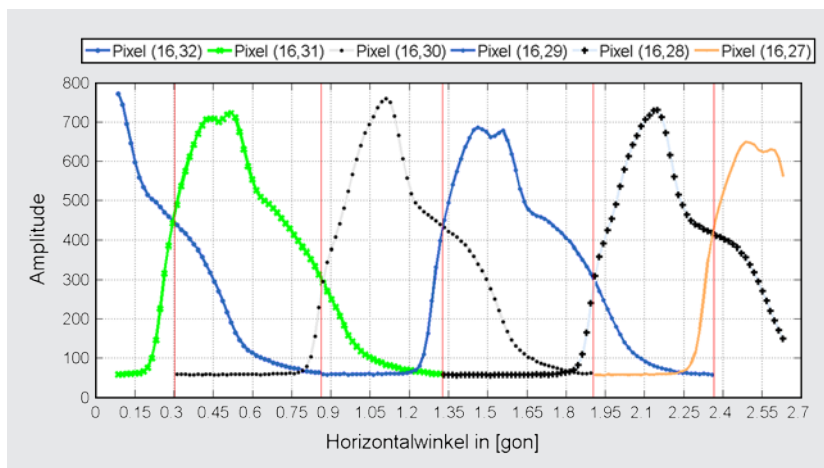


Abb. 7: Variation der Signalstärke benachbarter Pixel (PMD3k-S)

gistrierung als Prototyp realisiert. Eine ausführliche Behandlung der Thematik wird Lipkowski (2013) enthalten. Hier hingegen wurde die 2D/3D-Totalstation ausführlicher beschrieben. Das Instrumentarium leistet bezüglich Reichweite und Genauigkeit zwar weniger als heutige Videototalstationen, beinhaltet aber zusätzlich die scanneradäquate »Momentaufnahmefunktion« zur Erzeugung von RGB-eingefärbten Punktwolken. Gemäß der ursprünglichen Bedeutung des Tachymeters als schnell messendes Universalinstrument (ταχύς = schnell) kommt das hier konzipierte Gerät dem frühen Ideal nahe (Scherer 1988).

Was die Vielseitigkeit der Methodik angeht, so ist der Arbeitsmodus »PMD-Totalstation« nur zum Teil mit der eleganten, flexiblen, dynamischen Anwendung »System auf der Steadycam« abzudecken. Das »Universalinstrument« 2D/3D-Totalstation ist im konstruktiven Aufbau einfacher, verfahrensmäßig leichter zu handhaben und vor allem softwaremäßig anspruchsloser. Die Modi »freie Bewegung« und »2D/3D-Totalstation« decken die unterschiedlichen Bereiche Objektaufnahme und Vermessung bei mittleren Genauigkeitsansprüchen ab. Bereits heute sind z. B. Aufnahmen im Facility Management, bei Unfalldokumentation oder Innenraumerfassung, in Forensik oder Speleologie, auch sogar Arbeiten im Gelände unter Einbindung des Reflektorstabes möglich. Letzteres gestaltet sich wegen der Eigenschaft zur Erfassung der Punktwolke als »Schnappschuss« sogar prinzipiell einfacher als mit einer modernen Totalstation. Auch die Kombination aller skizzierten eigenständigen Betriebsmodi unter Nutzung der Referenzierung über GNSS und der Einbindung von entfernteren, reflektor-signalisierten Zielen dürfte reizvolle neue Möglichkeiten für Vermessung, Objekterfassung und Visualisierung bieten.

Bis zur Praxisreife des 2D/3D-Kamerasystems – sei es im dynamischen oder statischen Arbeitsmodus – ist im Detail noch hard- und softwareseitig weitere, aber überschaubare Entwicklungsarbeit zu leisten. Es wäre zu wünschen, dass dies innerhalb der »geodätischen Familie« geschehen kann; die Autoren möchten mit ihren Erfahrungen gerne hierzu beitragen.

Literatur

- Basler-AG (2012): www.baslerweb.com/media/documents/BAS1210_pilot_d_web.pdf, letzter Zugriff 30.04.2012.
- BrainVision (2012): Stanley Electric Ltd. ToF-based range image camera – distanza series. Technical report, Stanley Electric Ltd., www.brainvision.co.jp/xoops/contents/product/tof/CEATEC2011_pamphlet_en.pdf, letzter Zugriff 08/2012.
- Holway, J. (2003): A Dynamic Balance Primer, www.steadicam-ops.com/docs/dynamicPrimer.pdf, 2003.
- Hußmann, S. (2000): Schnelle 3D-Objektvermessung mittels PMD/CMOS – Kombizeilensensor und Signalkompressions-Hardware. Dissertation, Universität Siegen, 2000.
- Juretzko, M. (2005): Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. DGK Reihe C, Heft 588, München, 2005.
- Kahlmann, T., Ingensand, H. (2007): Range Imaging Metrologie: Einführung, Untersuchungen und Weiterentwicklung, Allgemeine Vermessungsnachrichten, S. 384–394.
- Labonde O. (2012): www.ottmarlabonde.de/D/P2.htm, letzter Zugriff 20.08.2012.
- Lindner, M., Lambers, M., Kolb A. (2007): Sub-Pixel Data Fusion and Edge-Enhanced Distance Refinement for 2D/3D Images. In: Dynamic 3D Imaging (Workshop in Conjunction with DAGM 2007), Heidelberg, Deutschland, 2007.
- Lipkowski, S. (2013): Dissertation in Vorbereitung, Ruhr-Universität Bochum, 2013.
- Lipkowski, S., Scherer, M. (2011): Calibration of a 2D-3D-Camera System, 23rd CIPA Symposium, September 12–16, 2011, Prague, Czech Republic.
- Lipkowski, S., Scherer, M. (2013): Verbesserung der 3D-Punktgenauigkeit einer PMD-Kamera durch Kombination mit einer 2D-Kamera, Allgemeine Vermessungsnachrichten 2012, S. 43–49.
- Piatti, D. (2010): Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction. Dissertation, Politecnico di Torino.
- PMD-Technologies (2012): www.docstoc.com/docs/82524208/datasheet_camcube, letzter Zugriff 08/2012.
- Prasad, T., Hartmann, K., Weihs, W., Ghobadi, S., Sluiter, A. (2006): First steps in enhancing 3D vision technique using 2D/3D. 11. Computer Vision Winter Workshop 2006, Telc, Tschechische Republik, 2006.
- Reulke, R. (2006): Combination of Distance Data with High Resolution Images, In: Image Engineering and Vision Metrology, IEVM 2006, Proceedings, 2006.
- Scherer, M. (1988): Das elektronische Tachymeter – Universalinstrument der Gegenwart? Allgemeine Vermessungsnachrichten, 1988, S. 292–300.
- Scherer, M. (2009): The 3D-TOF-camera as an innovative and low-cost tool for recording, surveying and visualisation – a short draft and some first experiences, 22nd CIPA Symposium, October 11–15, Kyoto, Japan, 2009.
- Scherer, M., Lerma J.L. (2009): From the Conventional Total Station to the prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total station: A comprehensive review. Journal of Surveying Engineering, Volume 135, Number 4, pp. 173–178, American Society of Civil Engineers ASCE, 2009.
- Waschke, D., Juretzko, M., Scherer, M. (2003): Extrapolationsstab und Verfahren zur Bestimmung von Raumkoordinaten. Patentschrift DE 101 43 165 C 2, 2003.

Anschrift der Autoren

em. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scherer
Dipl.-Ing. Susanne Lipkowski
Geodäsie im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150 / IA 4/49, 44780 Bochum
michael.scherer@rub.de
susanne.lipkowski@rub.de