

# Verbesserung der 3D-Punktgenauigkeit einer PMD-Kamera durch Kombination mit einer 2D-Kamera

## 3D-point Accuracy Improvement of a PMD-Camera by Combination with a 2D-Camera

Susanne Lipkowski, Michael Scherer

Eine PMD-Kamera, auch oft als 3D-Kamera, RIM-Kamera oder ToF-Kamera bezeichnet, ermöglicht in jedem Pixel die Streckenmessung zum Objekt. Sie liefert eine dreidimensionale Momentaufnahme und eröffnet damit dem Bereich der Vermessung neue Perspektiven. Eine PMD-Kamera wurde mit einer 2D-Kamera zu einem dynamisch einsetzbaren Messsystem kombiniert, um wesentliche Vorteile beider Geräte zu vereinen. Das System wird kurz beschrieben. Es wird eine tabellarische Übersicht hinsichtlich genauigkeitsrelevanter Einflussgrößen gegeben. Sodann wird gezeigt, wie die aus der Genauigkeit von Kalibrierungsparametern abgeleitete theoretische 3D-Punktgenauigkeit der aus den Messwerten der PMD-Kamera berechneten Polarkoordinaten unter Hinzunahme von Bildinformationen der 2D-Kamera gesteigert werden kann. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einer Verbesserung der Richtungsauflösung. Die so bearbeitete und verdichtete Punktwolke bildet die Datengrundlage für später nachzuschaltende Registrierungsalgorithmen.

**SCHLÜSSELWÖRTER:** PMD-Kamera, 3D-Punktgenauigkeit, 2D/3D-Kamerasystem, ToF-Kamera, Range Imaging (RIM)

*A PMD-camera, also called 3D-camera, RIM-camera or ToF-camera, enables distance measurements to the observed object in each pixel. This kind of camera makes three-dimensional snapshots possible and opens up new perspectives for surveying. A PMD-camera was combined with a 2D-camera to a dynamic usable measurement system, to join the advantages of both devices. It is given a table regarding to accuracy related parameters. It is shown, how the theoretical 3D-point accuracy of the 3D-coordinates, which are calculated depending on measurement data of the PMD-camera, can be improved by taking 2D-camera information into account. Within this paper an enhancement of the directional resolution is shown. The closer meshed point cloud processed in this way represents improved underlying data for future registration methods.*

**KEYWORDS:** PMD-camera, 3D-point accuracy, 2D/3D-camera system, ToF-camera, Range Imaging (RIM)

### 1 EINFÜHRUNG

Das Portfolio an technischem Know-How, das es ermöglicht, die Umwelt schnell und einfach geometrisch zu erfassen, wächst rasant. In der klassischen Vermessung ist dies über Tachymetrie, Photogrammetrie oder Terrestrisches Laserscanning (TLS) realisiert. Diese Methoden werden in zunehmendem Maße um Verfahren ergänzt, die neue Gerätetypen verwenden wie PMD-Kameras und Kinect-Kame-

ras. Gegenüber der sequentiellen vektoriiellen Punkterfassung bei Tachymetrie und TLS ermöglicht die PMD-Kamera neben der Grauerfassung die dreidimensionale Objektaufnahme in Form einer Momentaufnahme, also die dreidimensionale Erfassung zahlreicher Objektbereiche mit einer einzigen Aufnahme. Im Vergleich zur noch preiswerteren Kinect-Kamera zeichnet sie sich durch eine wesentlich homogenere Punktgenauigkeit bei zunehmender Objektentfernung und eine geringe Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit aus. Im

folgenden Beitrag wird ein flexibel einsetzbares 2D/3D-Kamerasystem vorgestellt, bei dem eine herkömmliche 2D-Kamera und eine 3D-Kamera miteinander kombiniert sind. Die 3D-PMD-Kamera wurde mit der farbgebenden 2D-Industriekamera zu einem starren System verbunden. Die Befestigung des 2D/3D-Kamerasystems auf einer Steadycam (Schwebestativ) gewährleistet praxisorientierte, dynamische Anwendungen für den Einmannbetrieb; denn sie ermöglicht gleichmäßige langsame Bewegungen frei im Raum zur Erfassung des aufzunehmenden Objekts. Das 2D/3D-Kamerasystem erlaubt, Echtfarben-Koordinatenfilme z.B. von Innenräumen oder Objekten anwenderfreundlich zu generieren. Als Echtfarben-Koordinatenfilm wird hier die Abfolge von 3D-Momentaufnahmen der Szene bezeichnet. Dabei beinhaltet eine einzige Momentaufnahme mit dem Kamerasystem die gleichzeitige Erfassung der Polarkoordinaten und der Farbwerte von ca. 40 000 Objektpunkten. Zurzeit kann bei der Erstellung des Koordinatenfilms eine Framerate von 10fps erreicht werden. Aus den Messwerten lassen sich dreidimensionale RGB - Punktwolken berechnen.

Durch die starre Verbindung von 2D-Kamera und PMD-Kamera (3D-Kamera) genügt die einmalige Bestimmung der relativen Orientierung zwischen beiden Kameras. Die Fusion von 2D- und 3D-Kameradaten wurde auch bei /Reulke 2006/ ,/Lindner et al. 2007/ und /Prasad et al. 2006/ beschrieben, jedoch liegen dort die Schwerpunkte bei der Segmentierung bestimmter Bereiche aus der Punktwolke, bei der Punktverdichtung durch Interpolation der 3D-Koordinaten, bei der Verbesserung der Messwerte an Kanten unter Nutzung von Bildinformationen und bei der Verbesserung der Texturierung. Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zur Steigerung der theoretischen 3D-Punktgenauigkeit basieren auf einer Verbesserung der Richtungsauflösung. Auf eine Interpolation der Entfernungen wie bei /Lindner et al. 2007/ wird bewusst verzichtet, da diese Art der Verbesserung für Anwendungen in vermessungstechnischen Bereichen zu stark modellabhängig ist. Hier steht die Verdichtung der Koordinaten im Vordergrund mit dem Ziel, Feature Punkte sicherer zu extrahieren (SURF-Algorithmus). Diese stellen die Grundlage für die Berechnung der Transformationsparameter über eine Helmert-Transformation als sequentielle Ausgleichung der Einzelaufnahmen oder als verkettete Ausgleichung aller Aufnahmen dar.

Im Folgenden werden die Komponenten des 2D/3D-Kamerasystems vorgestellt. Hierbei wird insbesondere die PMD-Kamera näher beschrieben mit Schwerpunkt auf der Funktionsweise der Distanz-

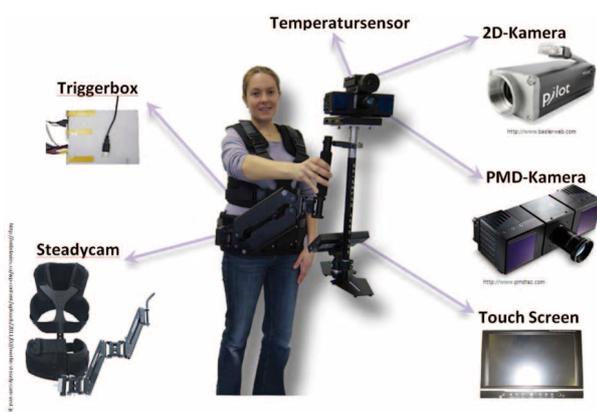


Abb. 1 | Komponenten des 2D/3D-Kamerasystems

messung, denn zahlreiche Unzulänglichkeiten bei der Koordinatenbestimmung resultieren aus den speziellen Eigenschaften der Entfernungsmessung. Im dritten Abschnitt folgt eine Übersicht zu Kalibrierparametern und Einflussgrößen, die bei der Verwendung des 2D/3D-Kamerasystems berücksichtigt werden müssen. Es schließen sich Betrachtungen zur 3D-Punktgenauigkeit der Raumkoordinaten an, und es wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Qualität der Koordinaten zu verbessern. Abschließend werden die theoretischen Überlegungen an Beispielmessungen verifiziert. Die Weiterverarbeitung der aus den Messdaten generierten 3D-Koordinaten ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.

## 2 DAS 2D/3D-KAMERASYSTEM

Das 2D/3D-Kamerasystem besteht aus den in der *Abbildung 1* dargestellten Komponenten. Erst deren Verbindung zu einem System gewährleistet praxisorientierte, dynamische Einsatzmöglichkeiten für den Einmannbetrieb. Im folgenden Abschnitt sind die einzelnen Komponenten näher vorgestellt.

### 2.1 DIE PMD-KAMERA

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die PMD-Kamera CamCube 2.0 eingesetzt, die von der Firma PMD-Technologies bis 2011 vertrieben wurde. Nähere Informationen zum CamCube 2.0 können dem Datenblatt /PMD 2012/ entnommen werden.

Basierend auf dem Phasenvergleichsverfahren werden mit der PMD-Kamera in jedem Pixel Entfernungen zum Objekt gemessen. Bewusst wird in diesem Beitrag auf den Begriff „ToF-Kamera“ (ToF = Time of Flight) verzichtet, da diese Bezeichnung irreführend ist hinsichtlich des verwendeten Messprinzips (s.u.). Die Bezeichnung „PMD-Kamera“ (PMD = Photonic Mixer Device) erscheint den Autoren hier fachgerechter, da sie die Arbeitsweise der distanzmessenden Pixel korrekter widerspiegelt.

Im Folgenden wird die Funktionsweise der PMD-Kamera beschrieben, vgl. hierzu /Kahlmann et al. 2008/, /Oggier et al. 2003/, /Lange 2000/ und /Hußmann 2000/, teils unter Verwendung der im Vermessungswesen bekannten Terminologie des Phasenvergleichsverfahrens. Nach dem PMD-Prinzip arbeitende 3D-Kameras werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten, z.B. durch MESA Imaging oder Canesta.

Das Kernstück der Empfangseinheit bildet das Pixel-Array in der Bildebene der PMD-Kamera mit 204 x 204 distanzmessenden Pixeln (41616 Pixel insgesamt). Alle Pixel messen synchron die Distanzen zum Objekt. Beidseitig der Empfangsoptik ist je ein Array mit jeweils 42 Leuchtdioden angebracht. Das von dieser Sendeeinheit emittierte Signal mit einer Trägerwellenlänge von 870nm (Infrarot) ist mit einer Frequenz von 20MHz amplitudenmoduliert. Dieser Modulationsfrequenz entspricht ein Maßstab von 7,5 m.

Wird die Modulationsfrequenz bei Folgemessungen abgewandelt, so lassen sich nach herkömmlichen Verfahren auch Distanzen größer als 7,5 m eindeutig bestimmen. Zu kooperativen Zielen wurden Entfernungen bis zu 100 m mit einer inneren Genauigkeit von ca. 2,5 cm gemessen. Die relevanten Werte wurden automatisch aus den Messdaten extrahiert. Dies berechtigt zur Hoffnung, das beschriebene 2D/3D-System in leicht abgewandelter Form in Zukunft

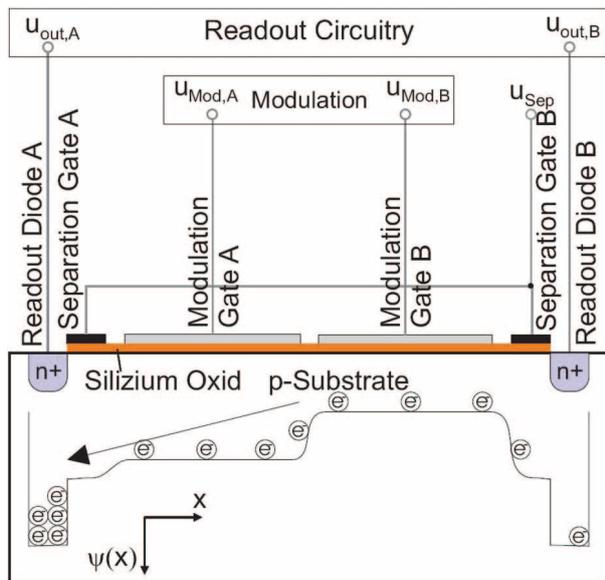


Abb. 2 | PMD-Pixel-Querschnitt /Hußmann 2000/

als universell einsetzbares Tachymeter, Scanner und bildgebende Einheit zu nutzen (vgl. /Scherer 2009/), d.h. als alleinstehendes Vermessungsinstrument.

Das am Objekt reflektierte Messsignal durchdringt das Linsensystem der PMD-Kamera und trifft auf das Pixel-Array. In der *Abbildung 2* ist der Querschnitt eines PMD-Pixels dargestellt.

Jedes Pixel besitzt einen lichtempfindlichen Bereich, zwei Modulationsgates, zwei Separationsgates und zwei Auslesedioden A und B. Die Anzahl der im lichtempfindlichen Bereich freigesetzten Elektronen ist von der Lichtstärke des ankommenden Messsignals abhängig.

Bei der herkömmlichen Distanzmessung gibt es nur eine einzige Empfangsdiode, ein Streckensignal und ein inneres Bezugssignal zum Phasenvergleich. Hingegen werden im Photomischdetektor (PMD) die vom empfangenen Signal generierten Elektronen zur Auslesediode A oder B geleitet. Die jeweilige Aufteilung wird über ein elektrisches Signal gesteuert, welches über die Modulationsgates A und B eine Potentialveränderung im Pixelinneren bewirkt. Dieses elektrische Signal ist vom Modulationssignal direkt abgeleitet. Somit wird in jedem PMD-Pixel als optoelektronischer Schnittstelle ein elektrisches Bezugssignal mit einem hierzu je nach der Länge der Signallaufstrecke phasenverschobenen optischen Streckensignal gemischt. Während einer wählbaren Integrationszeit werden die Elektronen in den Speicherkapazitäten (Readout Dioden) A und B gesammelt (integriert). Schließlich erfolgt die Speicherung der resultierenden Ladungszustände. Der gesamte Prozess wiederholt sich insgesamt viermal. Zwischen diesen Einzelprozessen wird die Phasenlage des am Pixel anliegenden elektrischen Referenzsignals bezüglich der Phase des optischen Messsignals um jeweils 90° verschoben. Schließlich liegen acht Ladungszustände vor. Aus diesen werden die Werte  $A_1, A_2, A_3, A_4$  als Differenzen der Messwerte an den Gates A und B, sowie die Werte  $\sum A_1, \sum A_2, \sum A_3, \sum A_4$  als Summe der Messwerte an den Gates A und B berechnet. Basierend auf diesen Größen kann die Entfernung – bzw. der Betrag der Phasenverschiebung – wie folgt bestimmt werden:

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \tag{1}$$

$$d = \frac{c}{f} \cdot \frac{\phi}{2\pi}$$

wobei  $f$  = Modulationsfrequenz,  $d$  = Entfernung,  $\phi$  = Phasenwinkel und  $c$  = Lichtgeschwindigkeit bezeichnen. Außerdem können pro PMD-Pixel die Amplitude  $a$  und die Intensität  $b$  (der Grauwert) bestimmt werden.

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

$$b = \frac{\sum A_1 + \sum A_2 + \sum A_3 + \sum A_4}{4}$$

Neben der primär interessierenden Distanz liefern die Amplitude und der Grauwert wertvolle Angaben zur Beurteilung der Qualität der Messwerte. Ein Grundverständnis der beschriebenen Funktionsweise der Distanzmessung ist notwendig, um zahlreiche Unzulänglichkeiten bei der Koordinatenbestimmung mit der PMD-Kamera einordnen zu können.

## 2.2 DIE 2D-KAMERA

Die verwendete 2D-Kamera der Firma Basler ist eine farbliefernde Industriekamera mit einer Auflösung von 5 Megapixel und einer ma-

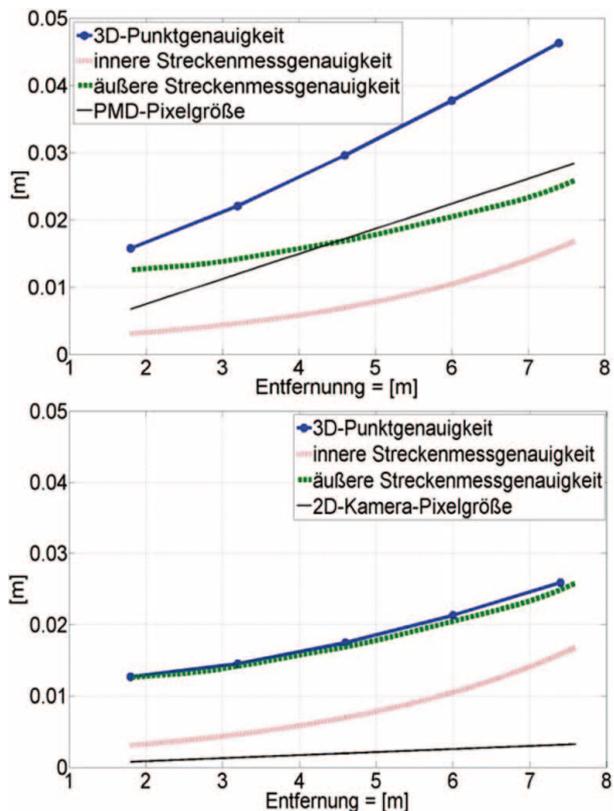


Abb. 3 | Theoretische 3D-Punktgenauigkeit für ein Mittelpixel, (oben) PMD-Koordinaten, (unten) PMD-Subpixelkoordinaten

Effekt	Einflussparameter/Ursache	Berücksichtigung/Kalibrierung
<b>1. PMD-Kamera systemimmanente Einflüsse Entfernungsmessung</b>		
zyklische Abweichung	Oberschwingung, Abweichungen von Soll-Signalform	numerische Verbesserung
superposition (scattering)	multiple Reflexion bei der optischen Abbildung	teils wirksames funktionales Modell vorhanden
Sättigung	Tageslicht / Gleichlicht	Suppression of Background Illumination (SBI)
Additionskonstante	elektrischer Nullpunkt $\neq$ mechanischer Nullpunkt	numerische Verbesserung
Additionskorrektur	konstant, Ursache s.a. Fokussierung	numerische Verbesserung
internes Übersprechen (crosstalk)	Überlagerung elektrischer Signale	in vorangehenden Parametern berücksichtigt
Maßstabsabweichungen (geringer Einfluss, da kurze Distanzen)	Frequenzablage	numerische Verbesserung (vermischt mit Additions-korrektur)
unsymmetrische Pixelausleuchtung (Teilanalogue zur Phasenhomogenität)	variierende wirksame Pixelgröße	akzeptieren, Verminderung durch fingerstrukturierte PMD-Pixel
Temperaturstabilität	vorwiegend Außentemperatur	Korrekturfunktion
Einlaufverhalten	vorwiegend Innentemperatur	Korrekturfunktion / Abwarten
Langzeitstabilität	Alterungseffekte	Trend aus wiederholter Kalibrierung
unscharfe Pixelabbildung	Fokussierung	Kalibrierung für verschiedene Messbereiche
inhomogene Wellenfront	Überlagerung des Sendesignals	Lageverbesserung der Sende-LED's von Herstellerseite
<b>Richtungsmessung</b>		
innere Orientierung, Verzeichnung	optische Abbildung / Fleckform	Kalibrierung
<b>objektbedingte Abweichungen</b>		
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
externes Übersprechen	Mehrfachreflexionen an Objektflächen	Analyse der Folgeframes
<b>2. 2D-Kamera</b>		
Richtungsabweichung	Verzeichnung	Kalibrierung
innere Orientierung	-	Kalibrierung
<b>3. relative Orientierung zwischen 2D- und PMD-Kamera</b>		
	-	<b>Kalibrierung</b>

Tab. 1 | Einflüsse auf die Messung und die Parameter der Kalibrierung

ximalen Bildrate von 17fps, (siehe Datenblatt /Basler-AG 2012/). Durch die Kombination dieser Kamera mit der PMD-Kamera können die 3D-Punktwolken in Echtfarben dargestellt und die in Abschnitt 4 beschriebene Verbesserung der Punktgenauigkeit erzielt werden.

### 2.3 ZUBEHÖR

Um das Messsystem dynamisch einsetzen zu können und um bei bewegter Kamera einen gleichmäßigen Bewegungsablauf zu realisieren, wurden die PMD-Kamera und die 2D-Kamera auf einer Steadycam befestigt. Die Synchronisation der Kameras erfolgt über eine eigens entwickelte Triggerbox. Diese sendet elektrische Signale an die Kameras und ermöglicht somit eine Hardwaretriggerung.

Zur Korrektur der gemessenen Entfernungen bezüglich der aktuellen Temperaturverhältnisse wurde am Gehäuse der PMD-Kamera ein Temperatursensor angebracht. Die Steuerung des Messsystems

und die Datenspeicherung erfolgen über einen Laptop; dieser ist über einen Touchscreen am Stativ der Steadycam bedienbar.

### 3 GENAUGKEITSRELEVANTE EFFEKTE

In diesem Abschnitt werden die für die Messergebnisse der 2D-Kamera und der PMD-Kamera relevanten Einflüsse und Maßnahmen zur Kalibrierung tabellarisch aufgeführt. Die Zusammenfassung verdeutlicht die Komplexität des Systems, und es ist offensichtlich, dass mit einer Kalibrierung nur eine begrenzte Anzahl von Einflüssen erfasst werden kann. Während klassische photogrammetrische Methoden für die Kalibrierung der 2D-Kamera verwendet wurden, verschmelzen bei der PMD-Kamera Photogrammetrie und Distanzmessung. Es galt, geeignete Verfahren zu entwickeln, die es ermöglichen, die Kameras hinsichtlich der Parameter und Abweichungen, die seitens Photogrammetrie und elektronischer Distanz-

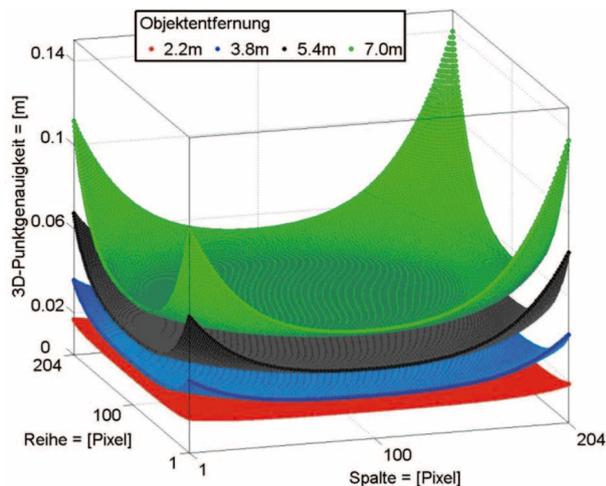


Abb. 4 | Theoretische 3D-Punktgenauigkeit, Pixel-Array für verschiedene Entfernungen

messung (u. a. typische zyklische Abweichungen oder Additionsvariable) bekannt sind, soweit möglich zu kalibrieren und darüber hinausgehende Effekte zu berücksichtigen.

In Tabelle 1 sind die Effekte benannt, die die Messung beeinflussen, und deren Ursachen und Einflussparameter stichwortartig beschrieben. Außerdem werden Verfahren aufgezählt, die es ermöglichen, die Auswirkungen auf die Messung zu minimieren. Hierbei werden systemimmanente und objektbedingte Einflüsse unterschieden. Im Rahmen dieses Beitrages kann nicht auf die Kalibrierung eingegangen werden. Es sei aber insbesondere auf die starke Korrelation zwischen Umgebungstemperatur und gemessener Entfernung hingewiesen /Lipkowski, Scherer 2011/.

#### 4 ABSCHÄTZUNG DER 3D-PUNKTGENAUIGKEIT UND VERDICHTUNG DER PUNKTWOLKEN

Aus den Ergebnissen der Kalibrierung lässt sich die in der *Abbildung 3* dargestellte äußere Streckenmessgenauigkeit über Varianzfortpflanzung herleiten.

Sie bezieht sich auf Entfernungsmessungen, die um die Additionskonstante, die Temperaturkorrektur und den Einfluss des zyklischen Phasenfehlers verbessert wurden. Zur Berechnung der zu erwartenden 3D-Punktgenauigkeit (Helmertscher Punktfehler) der mit dem 2D/3D-Kamerasystem bestimmten Raumkoordinaten fließen neben der äußeren Streckenmessgenauigkeit auch die Genauigkeiten der Verzeichnungsparameter in die Varianzfortpflanzung ein.

Die Ergebnisse dieser Berechnung werden im Folgenden als theoretische 3D-Punktgenauigkeit bezeichnet. In Abhängigkeit von der Position eines Pixels innerhalb des Arrays und von der Objektentfernung ergeben sich die in *Abbildung 4* dargestellten 3D-Punktgenauigkeiten.

Diese nehmen mit zunehmender Entfernung ab. Besonders groß ist dieser Effekt für Koordinaten, welche aus den Randpixeln des Arrays berechnet werden. In *Abbildung 3 (oben)* sind die inneren und die äußeren Streckenmessgenauigkeiten, die 3D-Punktgenauigkeit und die auf das Objekt projizierte Pixelgröße für ein Mittelpixel (Pixelkoordinate 102,102) dargestellt.



Abb. 5 | Berechnete RGB-Bilder, (oben) PMD-Pixel, (unten) PMD-Subpixel

Zur Verbesserung der 3D-Punktgenauigkeit wird die Richtungsauflösung der PMD-Kamera durch Hinzunahme von Richtungsinformationen der höherauflösenden 2D-Kamera gesteigert. Ein PMD-Pixel wird durch 49 2D-Kamera-Pixel repräsentiert. Die theoretische Verbesserung der aus der ca. siebenfach gesteigerten Richtungsauflösung resultierenden 3D-Punktgenauigkeit ist in *Abbildung 3 (unten)* demonstriert. Durch den Übergang von PMD-Pixeln auf 2D-Pixel können bezogen auf die PMD-Pixel subpixelgenaue Koordinaten berechnet werden. Ein Beispiel hierzu ist in der *Abbildung 5* dargestellt, oben ein Ausschnitt mit PMD-Pixel-Auflösung und unten mit PMD-Sub-Pixel-Auflösung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Auflösung erheblich gesteigert werden konnte. Die Farbinformationen  $RGB_{PMD}$  der PMD-Pixel entstammen dem 2D-Kamerabild und wurden über folgenden kausalen Zusammenhang bestimmt:  $RGB_{PMD} = f(R, T, s_{PMD})$ , wobei R und T die relative Transformation zwischen der 2D-Kamera und der 3D-Kamera beschreiben,  $s_{PMD}$  stellt die im PMD-Pixel zum Objekt gemessene Strecke dar. In *Abbildung 5 (unten)* handelt es sich also nicht um das originale 2D-Bild, sondern um das über die Transformation berechnete Bild mit den verdichteten Polarkoordinaten.

Da die Gesamtanzahl der pro Aufnahme berechneten Koordinaten der Pixelanzahl entspricht, wird die Anzahl der berechneten Raum-

Nr.	Standpunkt		mittlere Klaffung	
	Epoche	Entfernung [m]	PMD-Pixel [m]	PMD-Subpixel [m]
1	2	2,5	0,009	0,004
2	2	3,0	0,010	0,006
3	1	3,3	0,010	0,010
4	2	3,8	0,012	0,009
5	1	4,0	0,014	0,011
6	2	4,2	0,015	0,012
7	2	4,3	0,018	0,012
8	1	4,5	0,024	0,012
9	1	5,0	0,028	0,012

Tab. 2 | Mittlere Klaffung

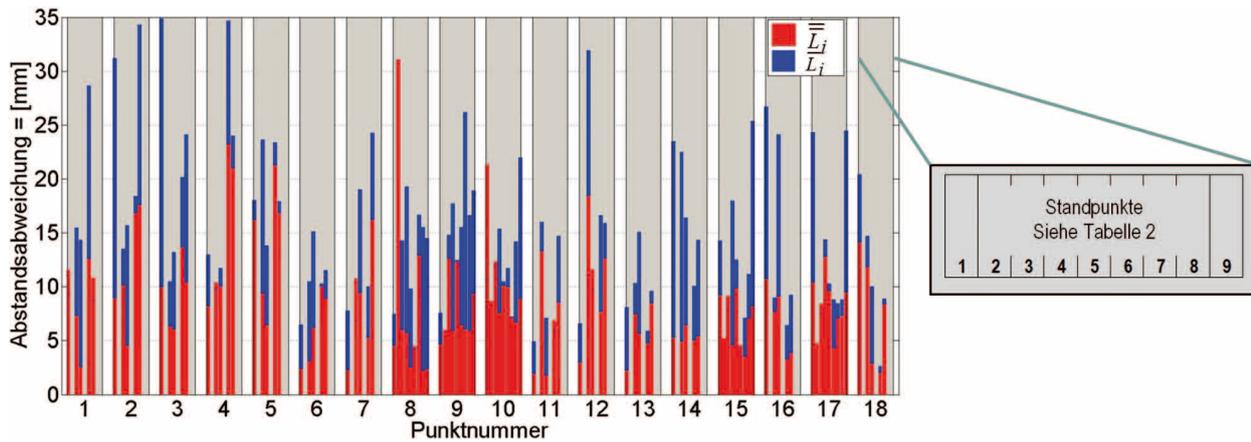


Abb. 6 | Abstandsabweichung zwischen transformierten Koordinaten und Sollkoordinaten

koordinaten 204:204 = 41 616 durch die Erweiterung um die 2D-Pixel auf 204:204:49 = 2039184 gesteigert.

## 5 ÜBERPRÜFUNG DER 3D-PUNKTGENAUIGKEIT

Zur Verifizierung der theoretischen 3D-Punktgenauigkeit wurde ein Testpunktfeld von insgesamt 18 Punkten mit dem 2D/3D-Kamerasystem aus 9 verschiedenen Entfernungen aufgemessen. Die Messungen erfolgten in zwei Epochen (fünf Punkte während der ersten und 18 Punkte während der zweiten), s. Tabelle 2. Die Sollkoordinaten  $(X_i, Y_i, Z_i)$  der Punkte wurden aus Messungen mit einer Totalstation Leica TCR1102 berechnet. Anschließend wurden die PMD-Koordinaten  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$  und die PMD-Subpixel-Koordinaten  $(\bar{\bar{x}}_i, \bar{\bar{y}}_i, \bar{\bar{z}}_i)$  mittels einer Helmert-Transformation in das Sollkoordinatensystem überführt. Diese werden im Folgenden als PMD-Pixel-Koordinaten  $(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{Z}_i)$  und PMD-Subpixel-Koordinaten  $(\bar{\bar{X}}_i, \bar{\bar{Y}}_i, \bar{\bar{Z}}_i)$  bezeichnet. Als Passpunkte wurden für jede Epoche jeweils nur identische auf einen inneren etwa kreisförmigen Bereich des PMD-Sensors abgebildete Raumkoordinaten verwendet. Die Helmert-Transformation ergibt für unterschiedliche Wandentfernungen  $s$  die in Tabelle 2 aufgelisteten mittleren Klaffungen. Diese wurden nach der Helmert-Transformation aus  $\sqrt{3} \cdot \hat{\sigma}_0$  berechnet, wobei  $\hat{\sigma}_0$  die Standardabweichung der Gewichtseinheit bezeichnet.

Die mittleren Klaffungen liegen im Rahmen der Untersuchung unterhalb der theoretischen 3D-Punktgenauigkeit. Dies zeigt die Qualität des Transformationsmodells: Die Klaffungen bei der PMD-Subpixel-Koordinatentransformation sind stets geringer als die bei der PMD-Koordinatentransformation. Die theoretische Steigerung der 3D-Punktgenauigkeit durch die Erweiterung der PMD-Pixel um die 2D-Pixel wurde erreicht. Zur detaillierteren Analyse der Ergebnisse wurden aus den Differenzen zwischen den Sollkoordinaten und den transformierten Koordinaten die Abstandsabweichungen  $\bar{L}_i$  und wie folgt berechnet:

$$\bar{L}_i = \sqrt{(\bar{X}_i - X_i)^2 + (\bar{Y}_i - Y_i)^2 + (\bar{Z}_i - Z_i)^2} \quad (3)$$

$$\bar{\bar{L}}_i = \sqrt{(\bar{\bar{X}}_i - X_i)^2 + (\bar{\bar{Y}}_i - Y_i)^2 + (\bar{\bar{Z}}_i - Z_i)^2}$$

In der *Abbildung 6* sind  $\bar{L}_i$  und  $\bar{\bar{L}}_i$  gemeinsam dargestellt. Wie zu erwarten steigen diese Abweichungen besonders bei den PMD-Pixel-Koordinaten mit zunehmender Entfernung des 2D/3D-Kamerasystems zum Testfeld an. Hierfür verantwortlich sind neben den Restabweichungen der Kalibrierung auch die mit zunehmender Entfernung wachsenden Ungenauigkeiten bei der Passpunktextraktion aus der Punktwolke, (siehe hierzu *Abbildung 7*), also eine vergleichsweise große laterale Fehleranfälligkeit.

Im Vergleich zu  $\bar{L}_i$  zeigen die Abweichungen  $\bar{\bar{L}}_i$  der PMD-Subpixel-Koordinaten keine systematischen Veränderungen in Abhängigkeit der Entfernung. Ursache hierfür mag sein, dass sich die Abbildung der Passpunkte auf dem PMD-Sensor bei größeren Entfernungen auf Pixel aus der Sensormitte konzentriert. Hingegen werden bei kürzerer Objektentfernung Passpunkte auf PMD-Pixel abgebildet, die sich näher am Sensorrand befinden. Laut Varianzfortpflanzung (vgl. *Abbildung 4*) sinkt die 3D-Punktgenauigkeit von der PMD-Sensormitte zum Sensorrand ab. Somit ergeben sich für die Aufnahmen gegenläufige Auswirkungen auf die Punktgenauigkeit und bewirken eine über die Entfernung scheinbar unabhängige Abstandsabweichung. Es zeigt sich, dass die Gewichtung der gemessenen Distanzen entsprechend der Lage der jeweiligen Pixel auf dem Sensor durch ein geeignetes Modell in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden muss.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein dynamisch einsetzbares 2D/3D-Kamerasystem zur geometrischen Erfassung von Objekten wurde vorgestellt, die einzelnen Komponenten wurden beschrieben und insbesondere die Arbeitsweise der verwendeten 3D-Kamera (PMD-Kamera) wurde erläutert. Die Komplexität der Kalibrierung von 3D-Kameras konnte in Grundzügen dargelegt werden. Effekte, welche die Messungen der PMD-Kamera beeinflussen, wurden aufgelistet und Möglichkeiten zur Kalibrierung benannt. Die 3D-Punktgenauigkeit der aus den PMD-Pixeln berechneten Koordinaten wurde dargestellt.

Zur Verbesserung dieser 3D-Punktgenauigkeit ließen sich aus den PMD-Pixeln durch Kombination mit einer 2D-Kamera subpixelgenaue PMD-Koordinaten berechnen. Im Rahmen einer Beispielmessung konnten die theoretischen Annahmen zur Steigerung der

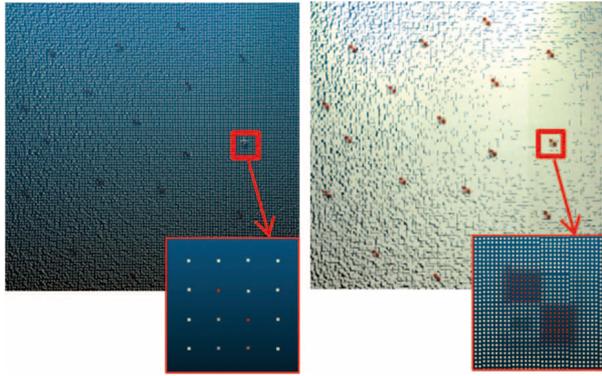


Abb. 7 | Echtfarben Punktwolke Standpunkt 7, (links) PMD-Koordinaten, (rechts) PMD-Subpixel

Punktgenauigkeit bestätigt werden. Mit den PMD-Subpixel-Koordinaten ist eine dichtere und informationsreichere Punktwolke verfügbar, welche die Grundlage für nachgeschaltete Registrierungsalgorithmen darstellt und ein Matching der sich überschneidenden aufeinander folgenden Momentaufnahmen des Koordinatenfilms ermöglicht.

Es ist zu erwarten, dass die PMD-Sensorchips seitens der Hersteller in Zukunft verbessert werden, um insbesondere die Auflösung, die Messgenauigkeit und die Stabilität zu steigern. Somit werden die Einsatzmöglichkeiten dieses Kamertyps auch in Kombination mit einer 2D-Kamera wachsen, denn generell bestehen im Vergleich zu den bekannten Messmethoden unterschiedliche verfahrenstypische Vorteile: Gegenüber dem weitgehend stationären Einsatz von TLS ist das System sehr flexibel dynamisch nutzbar, unter beengten Raumverhältnissen bietet es Vorteile im Vergleich zur klassischen Photogrammetrie. Homogenere Tiefengenauigkeit mit zunehmender Entfernung und weit geringere Abhängigkeit von störendem Fremdlicht zeichnen es gegenüber der Kinect-Kamera aus.

Die Autoren sind überzeugt, dass das System neben dem in Abschnitt 2 beschriebenen flexiblen Einsatz mit Adaption an die SteadyCam (Abbildung 1) in absehbarer Zukunft in mehr stationärer Verwendung als ein neuartiges preiswertes Universaltachymeter ohne Teilkreise eingesetzt werden kann, nämlich zur herkömmlichen tachymetrischen Messung, zur massenweisen scannerähnlichen Punkterfassung, zur Erstellung von originaltexturierten 3D-Modellen und zu Dokumentationszwecken. Bei der Feldmessung zu Reflektoren wurden bereits beeindruckende Reichweiten erzielt (Abbildung 8).

## LITERATUR

Basler-AG (2012): [http://www.baslerweb.com/media/documents/BAS1109\\_pilot\\_Web.pdf](http://www.baslerweb.com/media/documents/BAS1109_pilot_Web.pdf) (letzter Zugriff 30.04.2012).

Hußmann, S. (2000): Schnelle 3D-Objektvermessung mittels PMD/CMOS – Kombizeilensensor und Signalkompressions-Hardware. Dissertation, Universität Siegen, 2000.

Kahlmann, T.; Ingensand, H. (2008): Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras, *Journal of Applied Geodesy*, 2008.

Lange, R. (2000): 3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology. Dissertation, (Universität?? à bei Korrekturfahren ergänzen!) 2000.

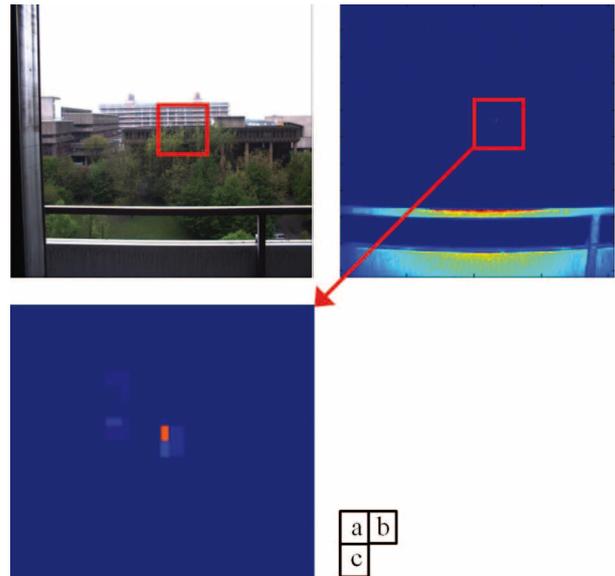


Abb. 8 | (a) 2D-Bild, (b) Amplitudenbild eines Prismenreflektors in ca. 100m Entfernung ( $s = 96,68\text{m} \pm 0,026\text{m}$ ), (c) vergrößerter Ausschnitt aus dem Amplitudenbild

Linder, M.; Lambers, M.; Kolb A. (2007): Sub-Pixel Data Fusion and Edge-Enhanced Distance Refinement for 2D/3D Images. *Dynamic 3D Imaging Workshop*, 2007. ((Weitere Angaben zum Workshop in den Korrekturfahren ergänzen))

Lipkowski, S.; Scherer, M. (2011): Calibration of a 2D/3D – Camerasystem. 24. CIPA Symposium, 2011, Prag. ((Weitere Angaben zum Symposium in den Korrekturfahren ergänzen.))

Oggier, T. et al. (2003): An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRangerTM), 2003. ((Weitere Angaben zur Literaturstelle in den Korrekturfahren ergänzen))

PMD (2012): PMD-Technologies, [http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/datasheet\\_camcube.pdf](http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/datasheet_camcube.pdf), (letzter Zugriff 30.04.2012).

Prasad, T.; Hartmann, K.; Weihs, W.; Ghobadi, S.; Sluiter, A. (2006): First steps in enhancing 3D vision technique using 2D/3D. *Computer Vision*, 2006. ((Weitere Angabe zur Literaturquelle in den Korrekturfahren ergänzen.))

Reulke, R. (2006): Combination of Distance Data with High Resolution Images. *IEVM, Proceedings*, 2006. ((Weitere Angaben zum Kongress in den Korrekturfahren ergänzen.))

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. 22. CIPA Symposium, 2009, Kyoto. ((Weitere Angaben zum Symposium in den Korrekturfahren ergänzen.))

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scherer

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM  
AG GEODÄSIE

Universitätsstraße 150 | 44780 Bochum  
E-Mail: Michael.Scherer@rub.de



Dipl.-Ing. Susanne Lipkowski

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM  
AG GEODÄSIE

Universitätsstraße 150 | 44780 Bochum  
E-Mail: Susanne.Lipkowski@rub.de



Manuskript eingereicht: 30.03.2012 | Im Peer-Review-verfahren begutachtet