



## Photogrammetrie + Laserscanning = Range imaging

Wilfried Karel und Stefan Niedermayr, Wien

### Kurzfassung

*Range imaging* bezeichnet die bildweise, geometrische Erfassung des Objektraums durch *range cameras* mittels simultaner Laufzeitmessungen optischer Signale. Diese aufkommende Technik verbindet und ergänzt wesentliche Stärken von Photogrammetrie und Laserscanning, zweier heute weit verbreiteter Methoden zur automatisierten Massenpunktbestimmung. *Range cameras* werden in einer bestimmten Bauweise mittlerweile zwar kostengünstig in Serie produziert, die rohen Distanzbeobachtungen weisen jedoch noch große zufällige, und vor allem systematische Fehler auf. Der vorliegende Beitrag beschreibt diese, zusammen mit den am IPF der TU Wien entwickelten Kalibriermethoden. Weiters wird eine erste geodätische Anwendung vorgestellt, bei welcher ein Teil einer Einkaufspassage aufgenommen und modelliert wird

**Schlüsselwörter:** Range imaging, Range camera, optische 3D-Messtechnik, 3D-Objekterfassung, 3D-Punktwolke, Photomischdetektor, PMD, lock-in Pixel, Kalibrierung

### Abstract

*Range imaging* denotes the image-wise, geometric capture of object space performed by *range cameras* using simultaneous time-of-flight measurements of optical signals. This emerging technique combines and supplements essential strengths of photogrammetry and laserscanning, nowadays two of the most popular methods for automated bulk point acquisition. A certain type of *range cameras* is manufactured cost-effectively in mass production today, but the raw range observations still feature high noise levels and, above all, large systematic errors. This article describes these errors and the respective calibration methods developed at IPF (TU Vienna). Furthermore, it presents a first geodetic application, which captures and models parts of a shopping arcade.

**Keywords:** range imaging, range camera, optical 3D measurement technique, 3D object capture, 3D point cloud, photonic mixer device, PMD, lock-in pixel, calibration

### 1. Einleitung

Beim *range imaging* (*RIM*) wird der Objektraum durch die Beleuchtungseinheit einer *range camera* angestrahlt, und das rückgestreute Licht über ein Objektiv auf den Sensor projiziert. Die Lichtquelle moduliert die meist im infraroten Frequenzbereich ausgesandte Strahlung derart, dass dieses Signal gleichzeitig an allen Pixeln des Sensors demoduliert werden kann, und so die Bestimmung seiner Laufzeit erlaubt, woraus wiederum die zu den einzelnen Pixeln korrespondierenden polaren Distanzen zu den Abtastflecken ableitbar sind. *Range cameras* ermöglichen somit die gleichzeitige, geometrische Erfassung ganzer Blickfelder. Im Gegensatz zur Photogrammetrie sind dazu lediglich eine Aufnahme und keine kontrastreiche Objektoberfläche nötig. Als wesentlicher Vorteil gegenüber Laserscannern ist der bei *range cameras* abwesende Scan-Mechanismus zu nennen, der bei Laserscannern erheblich zum Stromverbrauch, zum Gesamtgewicht und zu den Produktionskosten beiträgt [17]. Weiters erfassen Laserscanner Objektpunkte sequenziell, was die Aufnahme dynamischer Szenen und den Betrieb auf bewegten Plattformen er-

schwert. Andererseits verteilen sich beim *RIM* die ausgesandte und rückgestreute Energie auf einen ausgedehnten Raumwinkel bzw. sämtliche Sensorelemente, was sich besonders unter Beisein von Hintergrundstrahlung nachteilig auf das Signal-Rausch-Verhältnis auswirkt und unter Einhaltung der Augensicherheit, und damit einer beschränkten mittleren Leistung der Lichtquelle, den Distanzmessbereich stärker limitiert als bei Laserscannern bzw. höhere Anforderungen an Beleuchtung und Sensor stellt. Bemerkenswert ist der Umstand, dass *range cameras* durchwegs zeitlich hochauflösende Bildsequenzen erfassen, mit Bildraten von über 20 fps.

*Range cameras* werden in verschiedenen Bauweisen realisiert, von denen die am intensivsten verfolgten Ansätze in einem früheren Beitrag [6] ausführlicher beschrieben wurden. Um auch hier einen Überblick zu vermitteln und aktuelle Entwicklungen festzuhalten, seien diese nochmals kurz erwähnt. Weitere Bauweisen sind denkbar und wurden teilweise als Prototypen realisiert [20], Details bzgl. Aufbau und Leistungsfähigkeit wurden bisher jedoch nicht veröffentlicht.

**SPAD - basierte Kameras** verwenden eine Kombination aus extrem kurz gepulsten Laserquellen (Pulsbreite wenige 100 ps) und Einzelphotonendetektoren (*single photon avalanche diodes* – SPAD, *Geiger-mode avalanche photo diodes* – GMAPD). Auch bei Aufnahmedistanzen von über 100 Metern und bei Einsatz unter Tageslicht wurden eindrucksvolle Ergebnisse erzielt [12], welche jedoch vorerst militärischen Anwendungen vorbehalten sind. Im zivilen Bereich wurden Kameras dieses Typs als Prototypen für den Nahbereich realisiert [15].

**APD/PIN - basierte Kameras** verwenden Photokathoden, um am Objekt rückgestreute Laserpulse zu verstärken und an Lawinenphotodioden (*avalanche photo diodes* – APD) oder PIN (*positive intrinsic negative*) - Dioden zu detektieren. Entsprechende Ausleseelektronik ermöglicht die Digitalisierung der Echoform für jedes Pixel, wodurch mehrere Distanzen pro Pixel bestimmbar sind [18]. Die Anwendung des Verfahrens auf Distanzen über 1000 m wurde erfolgreich getestet [19]. Advanced Scientific Concepts bietet Modelle dieses Typs kommerziell an.

**MDSI** Bei der mehrfachen Kurzzeit-Doppelbelichtung (*multiple double short-time integration* – MDSI) werden die Echos einer gepulsten Lichtquelle wie bei herkömmlichen 2D-Kameras am Sensor integriert. Ein äußerst schneller, elektronischer Verschluss (min. Verschlusszeit < 50 ns) ermöglicht es jedoch, nur Bruchteile des Echos abzubilden. Durch die Kombination von Bildern mit vollständig und teilweise erfassten Echos und solchen mit inaktiver Beleuchtung werden die Einflüsse von Reflektivität und Hintergrundstrahlung eliminiert, sodass auf die Objektdistanz geschlossen werden kann. Realisierungen für Objektdistanzen bis zu einigen Zehnermetern und relativ niedrigen Sensorauflösungen werden v.a. für den Automobilssektor entwickelt [13]. Geräte mit höherer Sensorauflösung und für den Einsatz bis zu wenigen Metern weisen noch relativ geringe Distanzpräzision auf [9] und sind bereits kommerziell erhältlich. Presseberichte legen nahe, dass diese Technik demnächst bei Spielkonsolen Anwendung finden wird (Xbox, Project Natal).

**Photomischer** (*photonic mixer device* – PMD, *lock-in pixel*) - basierte Kameras beleuchten den Objektraum permanent, modulieren dabei jedoch die Intensität mit einigen 10 MHz (AM-CW). PMD erlauben die Mischung des rückgestreuten, amplitudenmodulierten Lichts mit einer elektrischen Referenzschwingung und die gleichzeitige Abtastung des Ausgangssignals,

typischerweise an zwei um 180° versetzten Phasenwinkeln. Werden Lichtquelle und Referenzsignal mit der gleichen Frequenz betrieben (homodyne Mischung) und zwei Aufnahmen mit jeweils um 90° versetzter Referenzschwingung getätigt, so können unter Annahme sinusförmiger Modulation die Signalamplitude und der Phasenwinkel des Echos bestimmt, und daraus die Objektdistanz rekonstruiert werden [8]. Vorteilhaft kann die Referenz auch mit abweichender Frequenz moduliert werden (heterodyne Mischung) [2].

Anders als bei den vorhin genannten Bauweisen gibt bei PMD-Kameras nicht die Signallaufzeit selbst, sondern die wesentlich längere Modulationsperiode der Lichtquelle den Arbeitstakt vor, weshalb PMD-Kameras kostengünstig hergestellt werden können: einerseits kann die Beleuchtung für Frequenzen bis etwa 30 MHz durch herkömmliche LEDs (*light emitting diodes*) verwirklicht werden, andererseits werden PMD-Schaltkreise im etablierten CMOS-Verfahren gefertigt. Die erreichbare Aufnahmedistanz liegt für automobile Anwendungen mit kleinerem Blickfeld im Bereich bis 70 m [1], für höchstauflösende Kameras unter 10 m. Die Firmen Mesa Imaging, PMDtec und Canesta bieten diese Kameras kommerziell an.

Höchstauflösende PMD-Kameras bieten derzeit Sensoraufösungen von bis zu 204x204 Pixeln, bei einer stark von der empfangenen Signalamplitude abhängigen Präzision der Distanzbeobachtungen im Bereich von wenigen mm bis zu einigen cm. Die systematischen Fehler der Distanzmessung übertreffen jene der zufälligen noch um eine Größenordnung, weshalb am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Wien entsprechende Kalibriermethoden entwickelt und an einer PMD-Kamera erprobt wurden – Kapitel 2 widmet sich diesem Thema. Aufbauend auf dieser Kalibrierung wurde dieselbe Kamera außerdem für eine erste geodätische Anwendung verwendet, bei der eine Einkaufspassage aufgenommen und modelliert wird, worüber Kapitel 3 berichtet.

## 2. Kalibrierung von PMD-Kameras

Aufgrund der vorhin beschriebenen erheblichen systematischen Fehler der Distanzbeobachtungen von PMD-Kameras wurden entsprechende Kalibriermethoden entwickelt. Sämtliche diesbezüglichen Experimente wurden mit der am IPF vorhandenen Kamera Swissranger™ SR-3000 durchgeführt, deren technische Daten Tab. 1 wiedergibt.

Bildmatrix	[px2]	144x176
Blickfeld	[deg2]	39.6x47.5
max. Bildrate (Vollbilder)	[fps]	25
Beleuchtung	[W]	1
Trägerwellenfrequenz	[THz]	353
Trägerwellenlänge	[nm]	850
Modulationsfrequenz	[MHz]	5-30
Eindeutigkeitsbereich	[m]	30-5
Auflösung Distanz	[bit]	16
Auflösung Amplitude	[bit]	16
Abmessungen	[mm3]	50x67x42.3
Gewicht	[g]	162

Tab. 1: Technische Daten der PMD-Kamera Swiss-ranger™ SR-3000 von MESA Imaging (Zürich, Schweiz)

## 2.1 Photogrammetrische Kalibrierung

Bei der photogrammetrischen Kalibrierung werden analog zu jener bei konventionellen Kameras die intrinsischen Projektionsparameter der Kamera bestimmt, welche aus der inneren Orientierung (Hauptpunktlage, Brennweite) und der Objektivverzeichnung bestehen. Hierzu hat sich auch für Luftbildkameras die Selbstkalibrierung durchgesetzt, bei welcher die Kalibrierparameter nicht direkt beobachtet werden, sondern unterschiedlich orientierte Aufnahmen eines bekannten Testfeldes dazu genutzt werden, um die äußeren und die innere Orientierung samt Verzeichnung gemeinsam in einer Bündelblockausgleichung zu bestimmen. Auch im Falle von *range cameras* kommen dazu zwar v.a. die Bildkoordinaten von aus dem Bildmaterial extrahierten Merkmalen in Frage (also nicht die Beobachtungen selbst), jedoch können diese Merkmale sowohl aus den Amplituden-, als auch aus den Distanzbildern stammen. Einerseits zeigt sich allerdings die Präzision der Amplitudenbeobachtungen gegenüber jener der Distanzbeobachtungen als überlegen, andererseits ist in Hinsicht auf eine kombinierte photogrammetrische und Distanzkalibrierung das Testfeld eben zu wählen (*scattering*, s. Kap. 2.2.1), was lokale Merkmale in den Distanzbildern ausschließt. Aus diesen Gründen basiert der vorgestellte Ansatz zur photogrammetrischen Kalibrierung ausschließlich auf Amplitudenbeobachtungen. Durch automatische Merkmalsextraktion und -verfolgung wird die hohe Bildrate von PMD-Kameras dazu benützt, um mit minimalem Aufwand gesamte Bildsequenzen zu orientieren und damit eine hohe Redundanz zu erreichen.

Abb. 1 zeigt ein eigens für die photogrammetrische Kalibrierung konzipiertes Testfeld. Dieses

weist eine gewisse Tiefe auf, wodurch die Parameter der äußeren Orientierung sich potentiell als geringer korreliert mit der Brennweite ergeben. Es wurde in 3 Sequenzen zu je 1000 Bildern abgelichtet, wobei die Drehung um die optische Achse während jeder Sequenz annähernd konstant gehalten und nur die beiden übrigen Rotationswinkel samt Position des Projektionszentrums variiert wurden. Die dritte Sequenz wurde mit einer um 180° um die optische Achse gedrehten Orientierung aufgenommen. Durch die oben beschriebene Kombination aus Merkmalsextraktion und -verfolgung können unter Vorgabe der Korrespondenzen zu den extern bestimmten Passpunkten für das jeweils erste Bild sämtliche weiteren Bilder ohne manuellen Eingriff vororientiert werden. Die Auswertungen der nachfolgenden Bündelblockausgleichungen für jede Sequenz ergeben einerseits Werte für die (radiale) Objektivverzeichnung, andererseits erlauben sie die (grobe) Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Objektivparameter, und des Einflusses der Schwerkraft aus dem Vergleich der Parameter von aufrecht und „kopfüber“ aufgenommenen Sequenzen. Während die Parameter für die ersten beiden Sequenzen kaum differieren, legen die Parameter der dritten Sequenz den Schluss nahe, dass die Sensorposition stark von der Lotrichtung beeinflusst wird [5].

## 2.2 Distanzkalibrierung

Im Zuge der Kalibrierung der Distanzbeobachtungen von PMD-Kameras stellt sich eingangs die Frage nach den Größen, welche die Distanzmessungen systematisch verfälschen. Die bisher berichteten Einflüsse werden in Kap. 2.2.1 wiedergegeben. Kap. 2.2.2 stellt sodann die entwickelte Kalibriermethode vor.

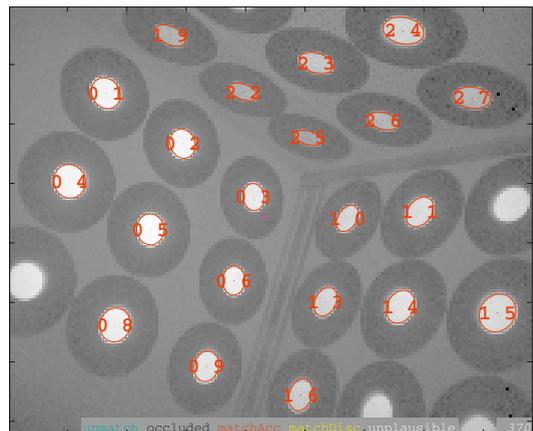


Abb. 1: 3D-Testfeld zur photogrammetrischen Kalibrierung

### 2.2.1 Systematische Fehlereinflüsse

Bisher wurde von folgenden Faktoren berichtet, welche lokal, d.h. pixelweise wirken:

- Objektdistanz (nicht-linear) [10, 4]
- Signalamplitude [3, 11]
- Inzidenzwinkel [4]
- externe und interne Temperatur [4]
- Position am Sensor [4]
- Integrationszeit [4, 11]

Hinzu kommen noch zwei weitere Faktoren, welche die Distanzmessungen in einer gewissen Nachbarschaft in der Sensormatrix verfälschen und durch die gleichzeitige, bildweise Messung ermöglicht werden:

- begünstigt durch den geringen Füllfaktor (optisch sensiblen / transparenten Flächenanteil) der PMD-Sensorelemente werden eintreffende Echos am Sensor teilweise zurückgeworfen, an der Objektiv-, Filter-, oder Gehäuseinnenseite erneut reflektiert, und schließlich an einer nicht der Projektion entsprechenden Stelle am Sensor mit dem direkt eintreffenden Signal vermischt. Während dieser Effekt auch bei konventionellen Kameras bekannt ist (*lens flare*, im PMD-Kontext: *scattering*), wirkt sich dieser in besonderem Maße auf die Bestimmung des Phasenwinkels aus [14].
- bei entsprechender Ausrichtung der Oberflächen am Objekt relativ zur Kamera kann das Messsignal auch im Objektraum mehrfachen Reflexionen unterworfen sein (*multipath*) [3].

Ref. [11] berichtet außerdem von gegenseitig abhängigen Einflüssen der Objektdistanz und Amplitude, was die Frage aufwirft, ob dies reproduzierbar ist und ob noch weitere Abhängigkeiten bestehen.

### 2.2.2 Kalibriermethodik und -anwendung

Einige Arbeiten untersuchen in streng kontrollierten Umgebungen mit hochpräzisen Instrumenten einzelne Einflussfaktoren – beispielsweise mittels Interferometern und Klimakammern [4]. Mit Hilfe dieser Versuche lassen sich die Einflüsse zwar nachweisen, aber nicht trennen bzw. lässt sich damit keine umfassende Kalibrierung für das Gesamtsystem bestimmen, die die systematischen Fehler im gesamten Einsatzbereich optimal reduziert.

Um die Auswirkungen der Störfaktoren und deren Abhängigkeiten zu untersuchen ist es vielmehr nötig, Distanzresiduen zu bestimmen, die unter verschiedensten Kombinationen von

Aufnahmebedingungen bestimmt wurden. Um den durch die Störfaktoren aufgespannten Parameterraum wenigstens grob mit Residuen abzudecken ist jedoch eine sehr hohe Anzahl an Bildern nötig (*Fluch der Dimensionalität*).

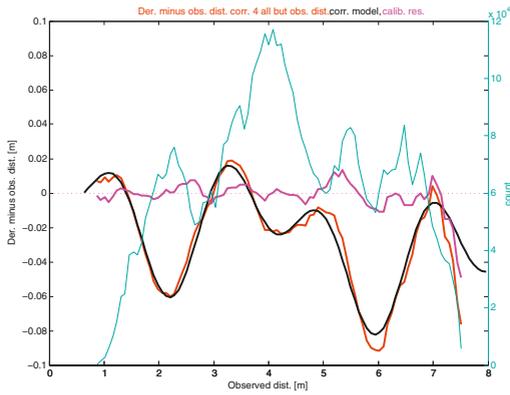
Diese hohe Anzahl an Residuen kann bei relativ kleinen Objektdistanzen (< 3 m) durch die Aufnahme von bewegten Bildsequenzen und automatisierte Merkmalsextraktion und -verfolgung gesammelt werden: [5] verwendet ein ebenes Testfeld, um den Einfluss von *scattering* zu minimieren, und *multipath* zu verhindern. Auf dem Testfeld befinden sich ebene Zielmarken, welche in den Amplitudenbildern erkannt und verfolgt werden. Während der Aufnahme werden die Position, Rotation und Integrationszeit variiert. Wiederum reicht die anfängliche Zuordnung von Merkmalen im Bild zu Passpunkten am Objekt, um lange, bewegte Bildsequenzen zu orientieren. Aufgrund der bekannten Planarität des Testfelds werden so Referenzdistanzen für jedes Pixel, und daraus wiederum Distanzresiduen bestimmt.

Bei größeren Objektdistanzen ist der Einfluss der Bewegungsunschärfe jedoch zu groß, um (hand-) bewegte Sequenzen verwenden zu können. Stattdessen werden Standbilder verwendet, die Algorithmen zur automatischen Bildorientierung unterworfen werden [7]. Um die Einflüsse der Störgrößen besser trennen zu können, werden außerdem zwei Testfelder unterschiedlicher Reflektivität verwendet. Die Residuen werden in der Folge als Funktion folgender 5 Störgrößen betrachtet:

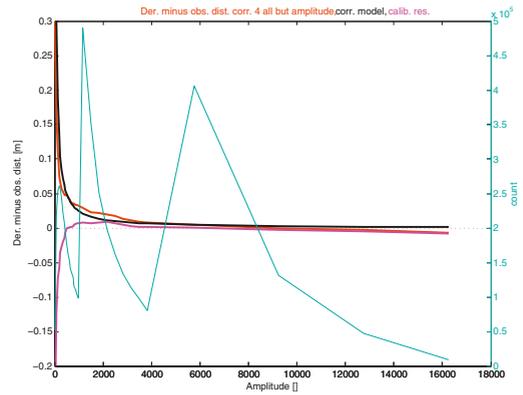
- (beobachtete) Objektdistanz
- (beobachtete) Signalamplitude
- Integrationszeit
- Position im Bild (2-dim)

An Hand von Plots der mittleren Residuen in Abhängigkeit von einer oder zwei dieser Merkmale werden in einem iterativen Prozess Kalibrierfunktionen gewählt, ausgetauscht oder verworfen, deren Parameter in einer gemeinsamen Ausgleichung neu geschätzt und die Plots mit korrigierten mittleren Residuen aktualisiert. Ferner werden wie üblich statistische Methoden angewandt, um Effektivität und Korrelationen der Parameter zu prüfen.

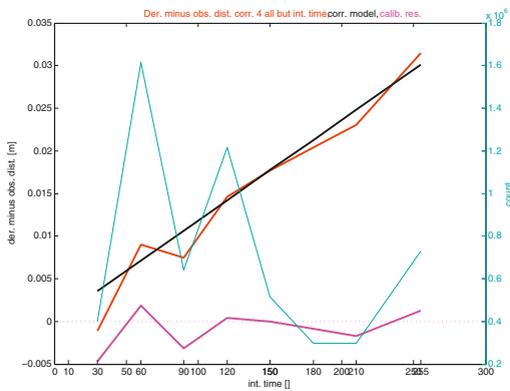
Abb. 2 zeigt die Distanzresiduen vor und nach Anbringung der endgültigen Kalibrierfunktionen (wobei jeweils eine Funktion nicht angebracht wurde), sowie die Funktionen selbst. Diese reduzieren den Betrag der Residuen über weite Be-



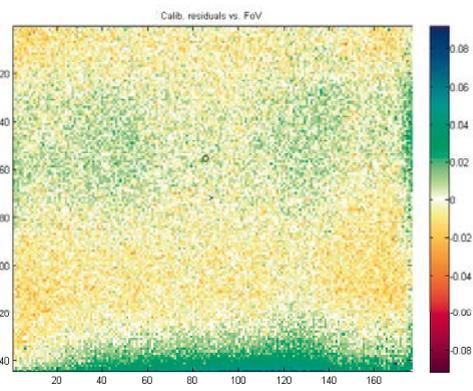
(a) nicht-linearer Einfluss der beobachteten Distanz: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



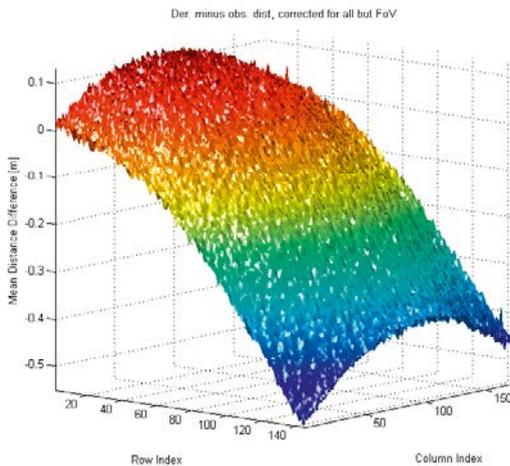
(b) Einfluss der beobachteten Signalamplitude: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



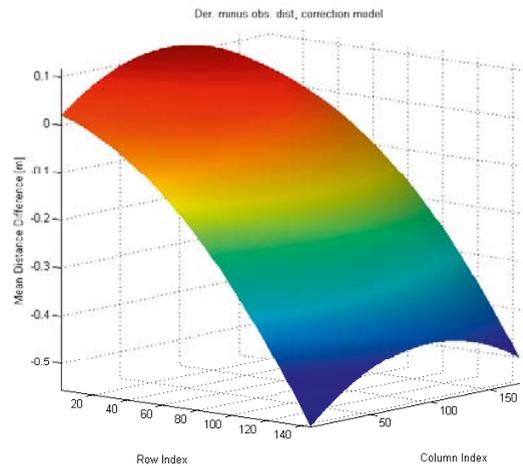
(c) Einfluss der Integrationszeit: (rot) Residuen vor Kalibrierung, (schwarz) Kalibrierfunktion, (magenta) Residuen nach Kalibrierung, (cyan) Anzahl an Beobachtungen



(d) Einfluss der Position am Sensor: Residuen nach Kalibrierung



(e) Einfluss der Position am Sensor: Residuen vor Kalibrierung



(f) Einfluss der Position am Sensor: Kalibrierfunktion

Abb. 2: Distanzresiduen in Abhängigkeit von den untersuchten Störfaktoren: (a) nicht-linearer Einfluss der beobachteten Distanz (b) Einfluss der Signalamplitude, (c) der Integrationszeit, und (d),(e),(f) der Position am Sensor.

reiche erheblich, die Kalibrierung erweist sich allerdings für extrem niedrige Amplituden und sehr große Distanzen als nur eingeschränkt tauglich. Abgesehen von der Position am Sensor können keine gegenseitigen Abhängigkeiten nachgewiesen werden. Schließlich zeigen die Residuen nach Anbringung der Kalibrierung keine Abhängigkeiten vom Inzidenzwinkel oder der Position am Objekt.

### 3. Modellierung einer Passage mittels PMD-Kamera

Eine am IPF durchgeführte Diplomarbeit [16] verwendet die oben vorgestellte Kalibrierung beim erstmaligen Einsatz einer PMD-Kamera zu geodätischen Zwecken. Ziel der Arbeit ist die Aufnahme und Modellierung eines Teils einer Einkaufspassage (Palais Ferstel, Wien). Dabei herrschen erschwerte Bedingungen durch sehr große Distanzen am Rande des Eindeutigkeitsbereichs und daraus resultierenden extrem niedrigen Amplituden, stark reflektierende Oberflächen (Auslagen) und feine Objektstrukturen (Stuck, Gusseisen). Ferner muss bei der Aufnahme auf Passanten Rücksicht genommen werden, was die Aufstellungsmöglichkeiten einschränkt.

Um trotz der großen Objektdistanzen Distanzbeobachtungen hoher Präzision zu erhalten wird die Kamera auf einem Stativ montiert und mehrere gleich orientierte Bilder (*statische Sequenz*) gemittelt. Da jedoch die Wahl der Aufstellungspunkte eingeschränkt ist, werden pro Bild nur kleine Teile des Objekts abgebildet, weshalb eine hohe Zahl an Bildern zur Aufnahme der Passage nötig ist. Um deren automatisierte Orientierung zu ermöglichen, wird die Aufnahme der Bildsequenz zwischen den statischen Sequenzen nicht unterbrochen. Es ergibt sich vielmehr eine Bildsequenz, die den gesamten aufgenommenen Teil der Passage abbildet.

Diese Sequenz wird anschließend in statische und dynamische Teilsequenzen segmentiert, und jede statische Sequenz wird zu einem einzigen Bild erhöhter Präzision gemittelt (*Standbild*). In den dynamischen Sequenzen werden Merkmale extrahiert und über die gesamte Teilsequenz hinweg verfolgt. Durch Verwendung der Distanzbeobachtungen und unter Beachtung der exzentrischen Lagerung der Kamera am Stativ werden nun die relativen Orientierungen zweier durch eine dynamische Sequenz getrennter Standbilder bestimmt, wodurch sämtliche Standbilder eine erstaunlich genaue Vororientierung erfahren. Nun werden für alle Standbilder kartesische Punktwolken berechnet und diese durch eine

Variante des ICP (*iterative closest point*) - Algorithmus feinorientiert und abschließend gefiltert und trianguliert.

#### Referenzen

- [1] Buxbaum, B., Lange, R. und Ringbeck, T. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, Kap. 3D-imaging. 187-197.
- [2] Conroy, R. M., Dorrington, A. A., Künnemeyer, R. und Cree, M. J. (2009): Range imager performance comparison in homodyne and heterodyne operating modes. In Conf. Three-Dimensional Imaging Metrology. Bd. 7239 von SPIE.
- [3] Árni Guðmundsson, S., Aanæs, H. und Larsen, R. (2007): Environmental effects on measurement uncertainties of time-of-flight cameras. In International Symposium on Signals, Circuits and Systems.
- [4] Kahlmann, T. (2007): *Range imaging metrology: investigation, calibration and development*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.
- [5] Karel, W. (2008): Integrated *range camera* calibration using image sequences from hand-held operation. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS, Peking, China, Bd. XXXVII, 945-952.
- [6] Karel, W. (2008): *Range imaging: 3DPunktwolken in Echtzeit*. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 96(1), 12-26.
- [7] Karel, W. und Pfeifer, N. (2009): *Range camera calibration based on image sequences and dense comprehensive error statistics*. In Three Dimensional Imaging Metrology. SPIE, Bd. 7239 von proc. SPIE.
- [8] Lange, R. (2000): 3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität-Gesamthochschule Siegen.
- [9] Leonardi, F., Covi, D., Petri, D. und Stoppa, D. (2009): Accuracy performance of a time-of-flight CMOS range image sensor system. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58(5), 1563-1570.
- [10] Lindner, M. und Kolb, A. (2006): Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors. In Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., Remagnino, P., Nefian, A., Meenakshisundaram, G., Pascucci, V., Zara, J., Molneros, J., Theisel, H. und Malzbender, T., Hg., Advances in Visual Computing, Springer, Bd. 4292/2006 von Lecture Notes in Computer Science. 524–533.
- [11] Lindner, M. und Kolb, A. (2007): Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-camera. In Casasent, D. P., Hall, E. L. und Roning, J., Hg., Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision. SPIE, Bd. 6764/1, 67640W.
- [12] Marino, R. M. und William R. Davis, J. (2005): Jigsaw: a foliage-penetrating 3d imaging Laser Radar system. Lincoln Laboratory Journal, 15(1), 23-36.
- [13] Mengel, P., Listl, L., Koenig, B., Pellkofer, M., Wagner, U. und Wertheimer, R. (2007): Timeof-flight camera for pedestrian protection and collision mitigation. In

- Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Transport Systems and Services. Aalborg, Dänemark.
- [14] Mure-Dubois, J. und Hügli, H. (2007): Optimized scattering compensation for time-of-flight camera. In Two- and Three-Dimensional Methods 8 Vermessung & Geoinformation 2/2010 for Inspection and Metrology V. Bd. 6762 von proc. SPIE.
- [15] Niclass, C., Favi, C., Kluter, T., Gersbach, M. und Charbon, E. (2008): A 128x128 singlephoton imager with on-chip column-level 10b time-to-digital converter array capable of 97ps resolution. In IEEE International Solid-State Circuits Conference. 44-46.
- [16] Niedermayr, S. (2010): Vervollständigung von Stadtmodellen mittels Distanzkameras. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien. Im Druck.
- [17] 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.
- [18] Stettner, R., Bailey, H. und Richmond, R. D. (2004): Eye-safe laser radar 3D imaging. In Kerman, G. W., Hg., Laser Radar Technology and Applications IX. SPIE, Bd. 5412/1, 111-116.
- [19] Stettner, R., Bailey, H. und Silverman, S. (2006): Three dimensional Flash LADAR focal planes and time dependent imaging. In International Symposium on Spectral Sensing Research. Bar Harbor, Maine, USA.
- [20] Stone, W., Juberts, M., Dagalakis, N., Stone, J. und Gorman, J. (2004): Performance analysis of next-generation Ladar for manufacturing, construction, and mobility. NISTIR 7117, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

#### Weblinks (Stand: Februar 2010)

Adv. Scient. Conc.: [www.advancedscientificconcepts.com/](http://www.advancedscientificconcepts.com/)  
 Project Natal: [www.xbox.com/en-US/live/projectnatal/](http://www.xbox.com/en-US/live/projectnatal/)  
 MESA Imaging: [www.mesa-imaging.ch](http://www.mesa-imaging.ch)  
 PMDTechnologies: [www.pmdtec.com](http://www.pmdtec.com)  
 CanestaTM: [www.canesta.com](http://www.canesta.com)

#### Anschrift der Autoren:

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

Stefan Niedermayr, Schumannngasse 70/8, A- 1170 Wien  
 E-Mail: [s.niedermayr@atn.nu](mailto:s.niedermayr@atn.nu)

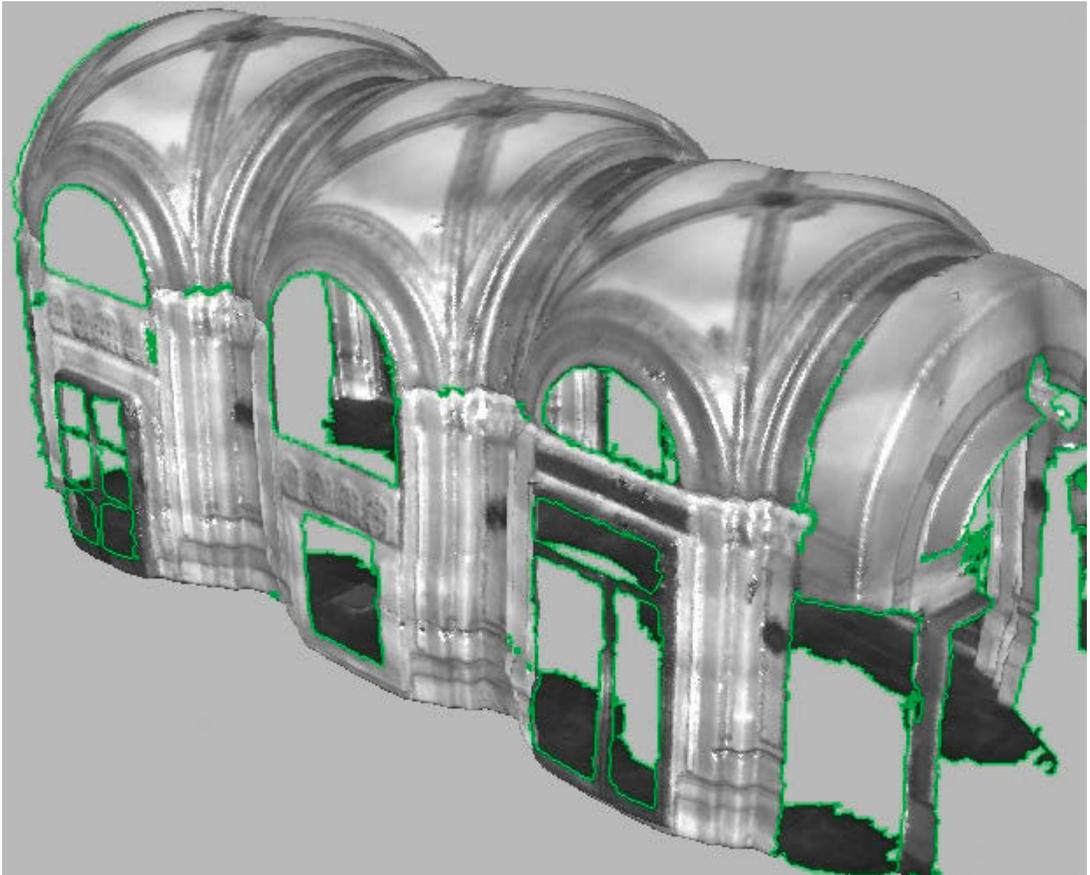


Abb. 3: Ansicht des triangulierten Modells aus [16]