

Range Imaging*

Timo Kahlmann und Hilmar Ingensand

Zusammenfassung

Mit dem Range Imaging (RIM) steht ein neues und zugleich für die Vermessung hochinteressantes dreidimensionales Messverfahren zur Verfügung. RIM ist eine Verschmelzung von zwei unterschiedlichen Technologien. Es integriert die Distanzmessung in zweidimensionale Bildmesstechnologien. Eine spezielle Sensormatrix (z. B. CMOS) ermöglicht jedem Pixel, den Abstand in Richtung zum entsprechenden Gegenstandspunkt zu messen. Die Distanzmessung wird durch das time-of-flight-Verfahren realisiert.

Weil die RIM-Technologie aber noch sehr jung ist, fehlt das Bewusstsein für deren hohes Potential bezüglich Auflösung, Genauigkeit und Geschwindigkeit. In den meisten Anwendungen, wie Automations- und Messsystemen, liegt die erforderliche Genauigkeit bei einigen Millimetern. Die Rohdaten der RIM-Kameras erreichen z. Zt. dieses Niveau nur mit Hilfe einer eingehenden Kalibrierung. Nachfolgend werden einige Charakteristika, Kalibrieransätze sowie Anwendungsbereiche des RIM gezeigt.

Summary

Range Imaging (RIM) is a new suitable choice for measuring and modeling in many different applications. RIM is a fusion of two different technologies. It integrates distance measurement as well as imaging functionality. A specialized imaging array (e. g. CMOS sensor) enables each pixel to measure the distance towards the corresponding object point. The distance measurement principle is dominated by the time-of-flight principle.

But due to the technology's relatively new appearance on the market, with a few different realizations, the knowledge of its capabilities is not wide spread. In most applications, like robotics and measurement systems, the required accuracy lies at some millimeters. The raw data of range imaging cameras do not reach this level. Therefore, the calibration of the sensor's output is generally needed. In the following, some characterizations, calibration approaches and applications of RIM are shown.

1 Einleitung

In den letzten Jahren sind 3D-Messsysteme wie Lasertracker, Laserscanner, Video- und Photogrammetriesysteme so weit entwickelt worden, dass sie zurzeit, selbst in militärischen Systemen, den aktuellen Standard für die Erfassung der Umgebung darstellen. Aber wegen ihrer Messprinzipien sind sie entweder langsam und da-

her nicht echtzeitfähig (Laserscanning bzw. Tachymetrie) oder die reine Erfassung der 3D-Daten benötigt enorme Rechenkapazitäten (Photogrammetrie). Vor einigen Jahren ist eine weitere Technik entwickelt worden, die direkt eine 3D-Information durch die Kombination von CMOS- und EDM-Technologien generiert. So genannte Range Imaging RIM-Kameras sind inzwischen auch auf dem nicht-militärischen Markt erhältlich. Diese Kameras sind in der Lage, ihr Blickfeld mit hoher Genauigkeit, hoher Geschwindigkeit und einer hohen Wiederholungsrate (bis zu mehr als 50 Hz) zu erfassen. Wegen ihrer hohen Auflösung von mehreren tausend Bildpunkten (aktuell bis ca. 84 k Pixel) bieten sie eine dichte räumliche Erfassung. Diese 3D-Videokameras haben ein hohes Potential und werden in naher Zukunft bestehende 3D-Erfassungssysteme entweder ersetzen oder ergänzen. Neben dem Einsatz in der Robotik und der Automobilindustrie finden sich Anwendungsbereiche in der Überwachung und Vermessung. In diesem Beitrag wird in Ansätzen gezeigt, wie Range-Imaging-Kameras dazu beitragen können, die Umgebung schnell und präzise dreidimensional zu erfassen. Dabei wird vor allem darauf eingegangen, auf welche Art und Weise das Potential der Systeme für Anwendungen in der Geodäsie und in benachbarten Gebieten möglichst gut ausgenutzt werden kann. Die Kalibrierung spielt hier eine wesentliche Rolle. Auf einige typische Charakteristika wird näher eingegangen.

2 Grundlagen der Range-Imaging-Technologie

Range Imaging basiert auf der elektrooptischen Distanzmessung. Dabei liegt eine der Hauptherausforderungen in der Implementierung dieser Technologie in eine CMOS- bzw. CMOS/CCD-Struktur. Das Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA Zürich (CSEM) beispielsweise hat einige Sensoren entwickelt, die eine spezielle elektrooptische Distanzmessung in einen kombinierten CMOS/CCD-Chip integriert. Letztlich wird ein Bildsensor generiert, der neben der Intensität auch die Distanz in jedem einzelnen Bildpunkt messen kann. Aus dieser Konstellation können zunächst mittels einfacher geometrischer Beziehungen dreidimensionale Koordinaten berechnet werden.

2.1 Elektrooptische Distanzmessung (time-of-flight)

Grundsätzlich werden drei verschiedene Arten der elektrooptischen Distanzmessung unterschieden: Triangulation, Interferometrie und das time-of-flight-Verfahren. Die Beziehungen der verschiedenen Verfahren, aber insbeson-

* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrags beim 72. DVW-Seminar »Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006)« am 9. und 10. November 2006 in Fulda. Die Beiträge zum Seminar sind als Band 51 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden. Weitere Informationen siehe Rückseite innen in dieser zfv.

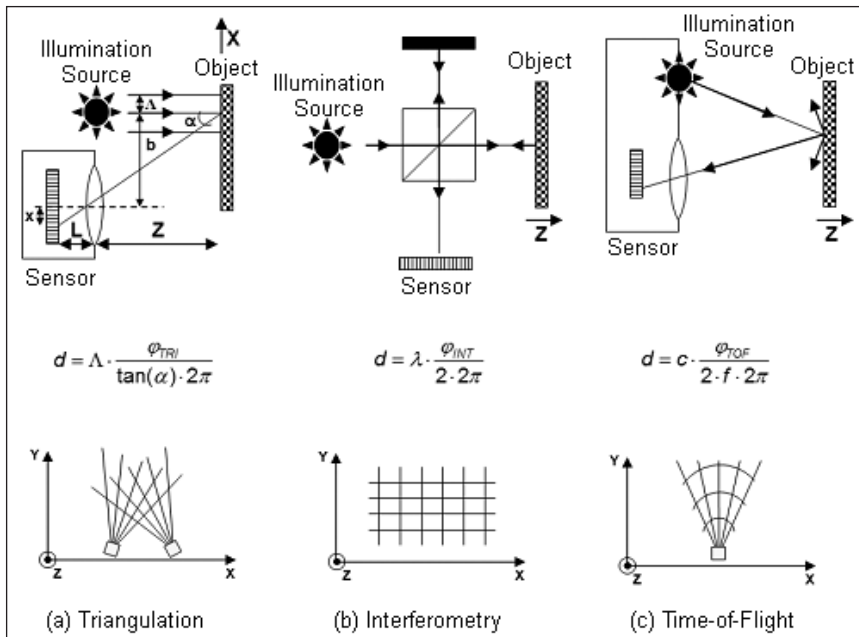


Abb. 1: Optische Range-Imaging-Methoden (nach Seitz 2005)

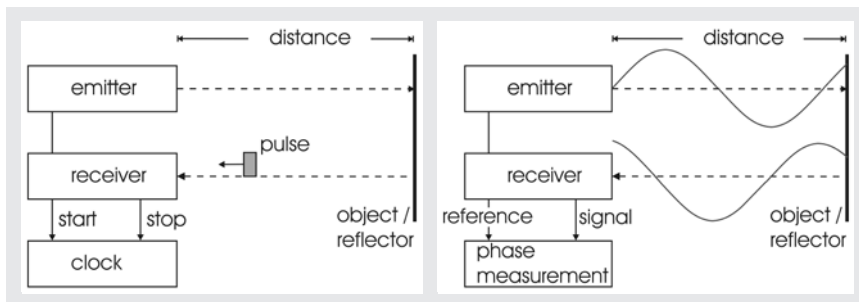


Abb. 2: Time-of-flight-Distanzmessung (Pulslaufzeit (links) und Phasendifferenz (rechts))

deren Ähnlichkeiten, werden bei Seitz (2005) näher beschrieben. Abb. 1 vermittelt einen Überblick.

Triangulation (Scanning und Photogrammetrie) und das Time-of-flight-Prinzip (*tof*) (Laserscanning und RIM-Kameras) werden für die Erzeugung von RIM eingesetzt. In diesem Beitrag werden RIM-Kameras beschrieben, die auf dem tof-Prinzip beruhen. Wenn davon ausgegangen wird, dass elektromagnetische Strahlung eine begrenzte Ausbreitungsgeschwindigkeit hat, dann kann dies für eine Distanzmessung genutzt werden. Abb. 2 (links) zeigt schematisch das Grundprinzip: Ein Lichtimpuls wird ausgesendet, an einem Objekt reflektiert und von einem Empfänger erfasst. Die Zeit, welche der Lichtpuls dafür benötigt, wird direkt gemessen. Die durch den Puls zurückgelegte Distanz wird danach berechnet zu:

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

wobei d = Distanz zwischen Sensor und Objekt
 c = Lichtgeschwindigkeit
 t = Laufzeit (tof)

Die Messung der Laufzeit kann direkt oder indirekt geschehen. Die EPF Lausanne (Schweiz) hat einen CMOS-

Chip entwickelt, der die Laufzeit mit Hilfe einer externen Uhr direkt messen kann (Niclass et al. 2005). Jedes Sensorelement ist als Single Photon Avalanche Diode (SPAD) konzipiert und kann die Ankunft einzelner Photonen registrieren.

Die zweite Möglichkeit der tof-Distanzmessung besteht in der indirekten Zeitmessung. Dabei wird die Phasenverschiebung eines modulierten emittierten Signals gemessen (Abb. 2 rechts). Die Art der Modulation kann dabei variieren. So sind Sinus-, Rechteck- oder Pseudo-Noise-Modulationen denkbar. Um die Phasenverschiebung einer in der Intensität sinusmodulierten Welle bestimmen zu können, werden die spezifizierenden Parameter mit Hilfe einer z.B. vierfachen Intensitätsmessung ermittelt. Diese Rekonstruktion wird auch als *Demodulation* bezeichnet.

Abb. 3 zeigt eine empfangene Welle. Mit Hilfe von vier Sample-Punkten, die durch die emittierte Welle getriggert sind, können die charakteristischen Parameter bestimmt werden (z.B. Lange 2000):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right) \quad (2)$$

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4} \quad (3)$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2} \quad (4)$$

wobei φ = Phasenverschiebung der empfangenen Welle zur ausgesendeten Welle

B = Intensität

A = Amplitude

Die Phasendifferenz ist direkt proportional zur gesuchten Distanz und wird wie folgt berechnet:

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

wobei d = Distanz zwischen Sensor und Objekt

λ_{mod} = Modulationswellenlänge

φ = Phasendifferenz

Oggier et al. (2005) und Seitz (2005) haben gezeigt, dass die zu erwartende Distanzpräzision für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten RIM-Kameras bei etwa 5–10 mm liegt. Des Weiteren ist zu bemerken, dass Lange (2000) ermittelt hat, dass Unregelmäßigkeiten in der Modulation, harmonische Funktionen ungeraden Grades, in

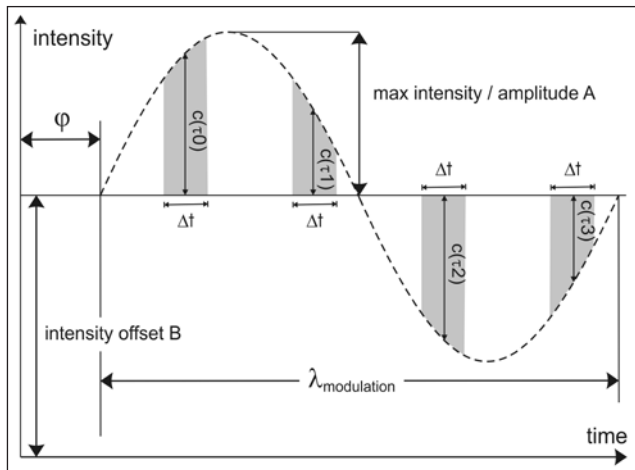


Abb. 3: Phasendifferenzmessprinzip

periodischen Abweichungen der Linearität der Distanzmessung folgen. Im Abschnitt über die Kalibrierung wird dies noch einmal interessant sein. Auf der Grundlage der pixelweisen Distanzmessungen und der optischen Beziehungen innerhalb des Kamerasystems können dreidimensionale Koordinaten abgeleitet werden (Kahlmann und Ingensand 2005).

2.2 Range Imaging Pixel

Wie zuvor gezeigt, kann eine Distanzmessung mittels Intensitätsmessungen von emittiertem, reflektiertem und empfangenem Licht durchgeführt werden. Um die Intensität des empfangenen Lichts zu messen, können Fotogates verwendet werden, die die empfangenen, lichtgenerierten Elektronen in einem Siliziumchip sammeln. Abb. 4a zeigt einen Schnitt durch ein typisches Pixel, wie es in RIM-Chips eingesetzt wird. Zwei Fotogates sind derart angeordnet, dass sie die durch die empfangene Strahlung erzeugten Ladungen im Silizium entweder zu der

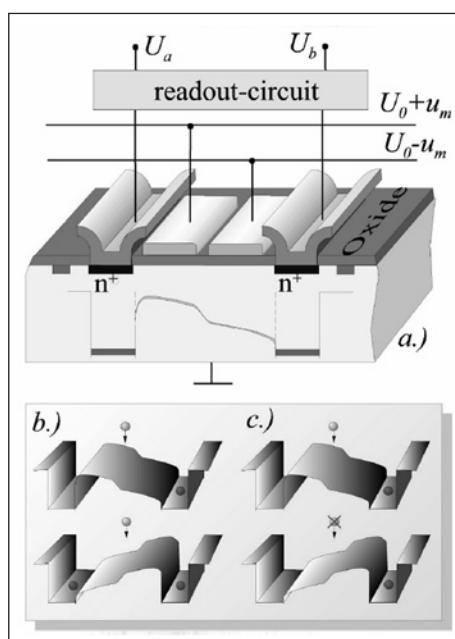


Abb. 4: Photonen-generierte Ladungen werden mit Hilfe einer speziellen Chipstruktur getrennt. Dieser Aufbau macht die Demodulation des empfangenen Signals möglich (Möller et al. 2005)

einen oder der anderen Seite transportieren (Feldgeneration). Abb. 4b zeigt diesen Vorgang schematisch. Der Schaltvorgang der Gates ist so auf die empfangene Strahlung getriggert, dass die Demodulation nach Abb. 3 möglich ist. Um den Signal-to-Noise-Quotienten zu erhöhen, kann der Vorgang wiederholt werden (Integration). Erst anschließend werden die Ladungen ausgelesen. Da die in Abb. 4 gezeigte Struktur (2-tap) nur zwei Messungen ermöglicht, müssen sequentiell zwei weitere Intensitätsmessungen durchgeführt werden. Büttgen et al. (2005) haben eine Pixelstruktur gezeigt, die mit vier Speicherzellen ausgerüstet ist (4-tap). Sowohl Lange (2000) als auch Büttgen et al. (2005) haben das Potential und die Einschränkungen der Range-Imaging-Technologie im Detail gezeigt.

2.2.1 Die RIM-Kameras SwissRanger™ SR-2 und SR-3000 von CSEM

Zwei verschiedene RIM-Kameramodelle wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen verwendet. Beide Kameras wurden von CSEM Zürich entwickelt. Obwohl es sich bei beiden Modellen um funktionsfähige Produkte handelt, ist die Grundidee, welche hinter beiden Modellen steht, ein Muster zu entwickeln, welches die Machbarkeit und die Möglichkeiten der Technologie zeigen soll. Dabei handelt es sich nicht um ein Produkt im eigentlichen Sinne. Einige der Untersuchungen zeigen daher Effekte, die bei einem speziell an die Bedürfnisse eines Kunden angepassten Produkt für den Kunden nicht mehr zu sehen sein sollten. Bei den verwendeten Kameras handelt es sich zum einen um den SwissRanger SR-2 und den Nachfolger SR-3000, der in einigen wichtigen Details verbessert worden ist. Die Spezifikationen beider Modelle sind in Tab. 1 zu finden. Der wesentliche Unterschied der beiden Kameras liegt in der neu eingeführten Hintergrundlichtunterdrückung des SR-3000. Diverse Publikationen beschäftigen sich mit den näheren Eigenschaften beider Sensoren. Oggier et al. (2005), Oggier et al. (2004) und Oggier et al. (2004b) seien hier exemplarisch erwähnt.

2.2.2 Weitere Sensoren

Neben den SwissRanger-Kameras von CSEM gibt es eine Reihe weiterer Hersteller und Institutionen, die sich mit der Range-Imaging-Technologie beschäftigen. Dabei kommen im Wesentlichen zwei verschiedene Techniken zum Einsatz. Zum einen das oben beschriebene Phasendifferenzmessverfahren. Dieses wird z.B. von PMDtec (Möller et al. 2005), Canesta (Gokturk et al. 2004), der Shizuoka University (Izhal et al. 2005), dem ITC-irst (Stoppa et al. 2005) und Matsushita (Matsushita 2004) eingesetzt. Die direkte Messung der Pulslaufzeit wird vom EPFL (Niclass 2005) eingesetzt. Die Beschreibung der jeweiligen Sensoren kann über die entsprechende Literatur nachvollzogen werden.

Tab. 1: Spezifikationen der verwendeten RIM-Kameras SwissRanger SR-2 und SR-3000

Modell	SR-3000	SR-2
Auflösung [Pixel]	176 × 144	124 × 160
Gesichtsfeld [Grad]	ca. 40 × 40	47.5 × 39.6
Eindeutiger Messbereich [m]	7.5 (variabel)	7.5
Optische Leistung [W]	< 1	ca. 0.8
Wellenlänge [nm]	850	870
Modulationsfrequenz: [MHz]	20 (variabel)	20
Bildrate [fps]	Variabel 1 bis ca. 55	Variabel 1 bis ca. 30
Objektivgewinde	M12 × 0.5	M12 × 0.5
Optisches System	f/1.4	f/1.4
Schnittstelle	USB2.0 (variabel)	USB2.0
Gehäusedimensionen [mm ³]	50 × 67 × 42.3	146 × 32 × 38
Gewicht [g]	162	
Stromversorgung [V]	12	12
Typ. Energieverbrauch [W]	12	

3 Eigenschaften

Um eine hohe Genauigkeit sowohl der Distanzmessungen und Pixelkoordinaten als auch der daraus abgeleiteten Koordinaten zu gewährleisten, ist es von entscheidender Bedeutung, die Eigenschaften und Verhaltensweisen des gesamten Systems genau zu kennen. Einige der untersuchten Aspekte werden im Folgenden näher erläutert und aufgezeigt. Zuerst steht die Distanzmessgenauigkeit der einzelnen Pixel im Vordergrund. Danach wird die Abhängigkeit des Sensors von Temperatureinflüssen gezeigt. Zum Teil können Vergleiche zwischen den beiden untersuchten Systemen gemacht werden.

3.1 Distanzmesspräzision

Für die Bestimmung der Präzision der Distanzmessung wurden die RIM-Kameras vor eine weiße Wand gestellt und mittels eines speziellen Messaufbaus senkrecht dazu ausgerichtet. Nach einer Aufwärmphase wurde eine Serie von 200 RIM akquiriert. Aus diesen Messungen wurde die Präzision der Einzelmessung bestimmt. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse für beide Sensoren.

Deutlich erkennbar ist die ansteigende Standardabweichung der Einzelmessung mit zunehmendem Abstand von der Sensormitte. Die Standardabweichung der Distanzmessung des SR-2 steigt von ca. 6 mm in der Mitte

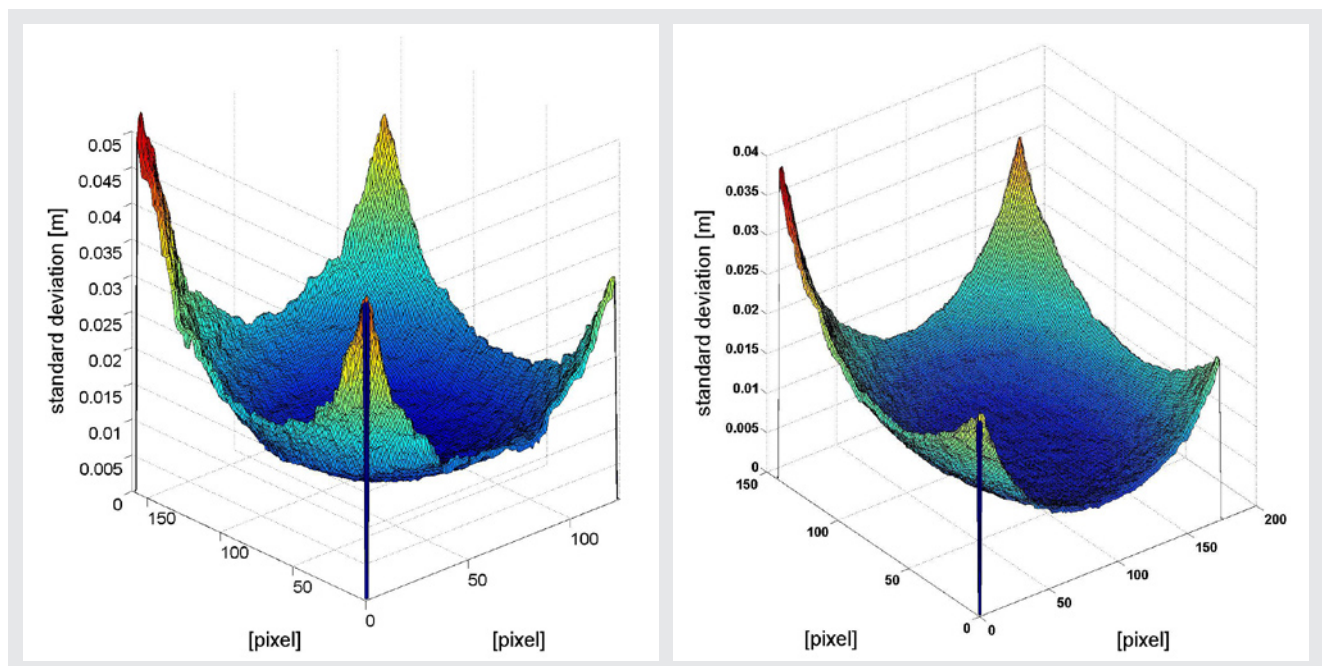


Abb. 5: Distanzmesspräzision einer Einzelmessung der RIM-Kameras SR-2 (links) und SR-3000 (rechts) mit einer 5 × 5 Medianfilterung. 200 Messungen wurden bei einer senkrechten Ausrichtung auf eine weiße Wand in einem Abstand von ca. 2.453 m (SR-2) und 2.463 m (SR-3000) gemacht. Die (interne) Integrationszeit lag bei 100 [intern]. Zu erkennen ist die leicht höhere Präzision des SR-3000.

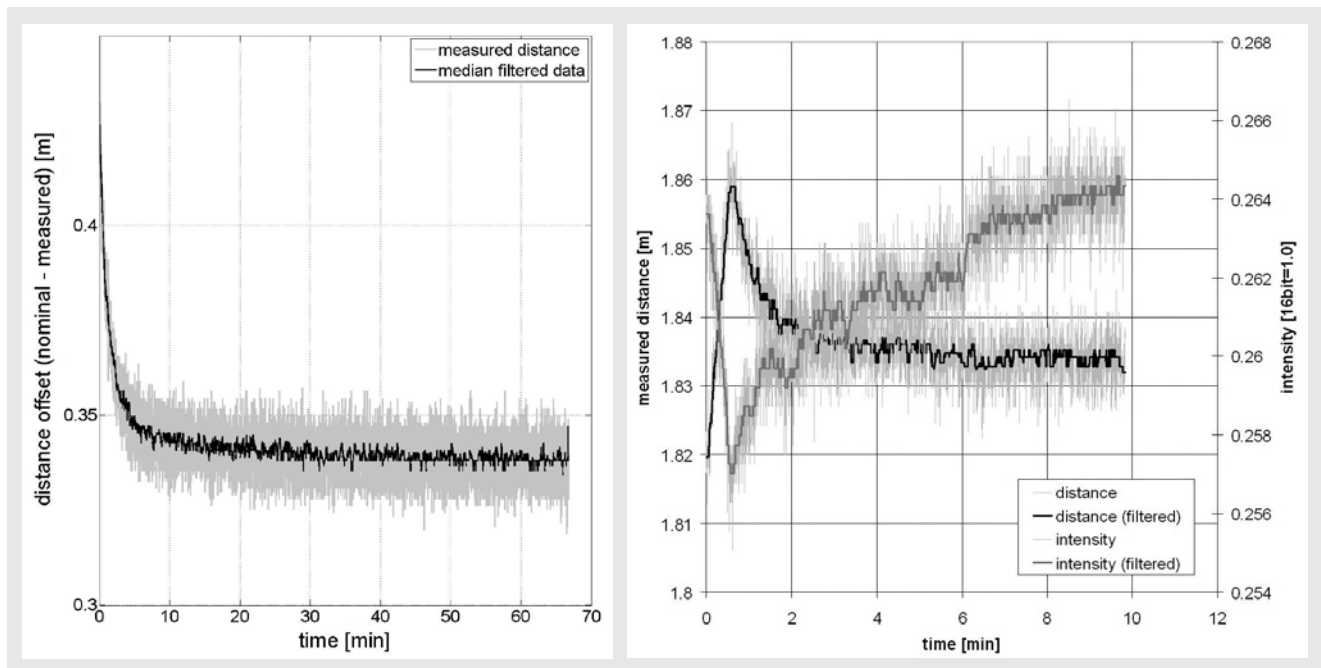


Abb. 6: Aufwärmphase des SR-2 (links, Distanzadditionskonstante) im Vergleich mit dem SR-3000 (rechts, Rohdistanz) in Bezug auf ein weißes Ziel. Die deutlich verkürzte Stabilisierungsphase des SR-3000 aufgrund einer intelligenten, temperaturgesteuerten Kühlung ist deutlich zu erkennen.

bis auf 5 cm an den Rändern des Gesichtsfeldes an. Die Präzision des SR-3000 liegt etwas darunter. Der Verlauf der in Abb. 5 gezeigten Daten bestätigt die theoretischen Grundlagen, wonach geringere optische Energien (Amplitude des demodulierten Signals) größere Streuungen der Messungen hervorrufen (Lange 2000). Verschiedene Gründe können dafür gefunden werden: die nach außen abnehmende Abstrahlleistung der LEDs des Sendesystems und der größer werdende Auftreffwinkel mit zunehmendem Abstand von der Sensormitte her sind hier als Hauptgründe anzuführen. Die einzelnen Pixel haben theoretisch keine Unterschiede bezüglich ihrer Präzision. Es handelt sich bei den gezeigten Effekten also um externe (Auftreffwinkel) oder semiexterne (LEDs, Objektiv) Einflussgrößen.

3.2 Sensor warm-up

Eine der Hauptherausforderungen bei den Untersuchungen der SwissRanger-Modelle ist die starke Abhängigkeit von der verwendeten Ansteuerungssoftware. In den folgenden Abschnitten wird dies besonders deutlich. Es wird vermutet, dass die Wahl der Integrationszeit (Anzahl der Zyklen, über welche integriert wird) Einfluss auf die Distanzmessung hat (Additionskonstante). Während der Akquisition erwärmt sich der Sensor bzw. dessen direkte Umgebung. Dieser Prozess wirkt sich aufgrund der steigenden Anzahl von thermal generierter Ladung auf die Distanzmessung aus. In Abb. 6 sind die durch die Aufwärmphase bedingten Distanzvariationen in Bezug auf ein festes Ziel zu sehen. Deutlich zu erkennen ist, dass der SR-3000 mit etwa sechs Minuten eine deutlich kürzere Stabilisierungs-

phase als der SR-2 hat. Dies liegt unter anderem an der integrierten intelligenten Kühlung der Kamera.

3.3 Einfluss der externen Temperatur

Wie schon zuvor gezeigt, unterliegen die Distanzmessungen einer Drift bezüglich der Temperatur. Neben der internen Aufheizung stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Messsystem. Dafür wurde der SR-2 in einer Klimakabine aufgebaut und auf ein weißes, statisches Ziel ausgerichtet. Danach wurde die Temperatur in der Kammer von -10°C bis auf 40°C schrittweise angehoben. Die Ergebnisse der Mittelung von 200 Messungen in einem Pixel sind in Abb. 7 dargestellt. Die Messungen wurden mit verschiedenen Integrationszeiten durchgeführt. Neben dem systematischen Einfluss der Temperatur auf die gemessene Distanz kann die Abhängigkeit von der Integrationszeit und damit auch der Rechner- und Programmkonstellation festgestellt werden.

4 Kalibrierung

In den letzten Abschnitten wurde über einige Untersuchungen berichtet, die sich mit den Eigenschaften der SR-Modelle beschäftigten. Wie zu sehen ist, liegt den Abhängigkeiten eine starke Systematik zugrunde. Daher drängt sich der Gedanke auf, eine gültige Kalibriervorschrift für derartige Messsysteme finden zu können. Dieser Abschnitt beschäftigt sich eingehender mit der Reduktion

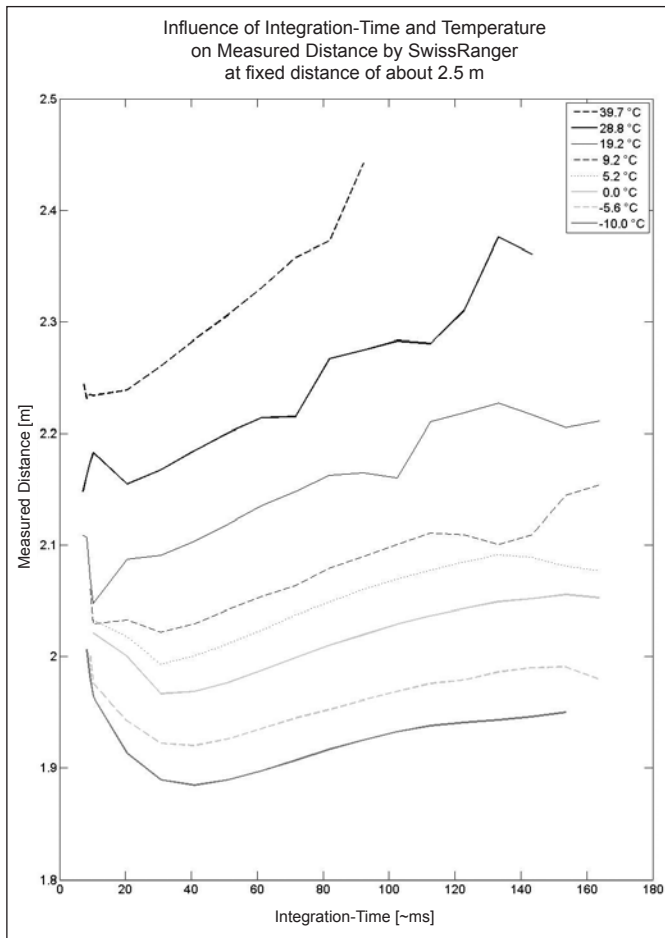


Abb. 7: Einfluss der externen Temperatur auf die Distanzmessung des SR-2 auf ein festes, weißes und ebenes Ziel (ohne Aufwärmsequenz)

dieser systematischen Effekte. Dabei kommen im Wesentlichen zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz. Einerseits besteht eine RIM-Kamera aus verschiedenen Modulen, wie z.B. dem RIM-Chip, dem Objektiv, der Sendeeinheit und anderen elektronischen Bauteilen. Andererseits kann das ganze System auch als Koordinatenmesssystem betrachtet werden. Dann treten die einzelnen Systemteile in den Hintergrund und die ausgegebenen Koordinaten treten in den Mittelpunkt. Hennes und Ingensand (2000) haben sich schon einmal mit diesem Problem beschäftigt und herausgearbeitet, dass eine Kombination von Komponenten- und Systemkalibrierung sinnvoll ist. Im Fall der RIM-Kamera stellt sich in Zukunft die Frage, welche Komponenten zu kalibrieren sind und auf welche Weise eine Systemkalibrierung durchgeführt werden kann. An dieser Stelle wird nur auf einige Eigenschaften der Komponentenkalibrierung und der Systemkalibrierung angesprochen, da die Untersuchungen zur Kalibrierung noch nicht abgeschlossen sind.

4.1 Parametrische Kalibrierung

4.1.1 Distanzkalibrierung

Zuerst wurden einige Aspekte der parameterbasierten Kalibrierung näher untersucht. Dazu wurden die RIM-Kameras auf der automatischen interferometrischen Messbahn des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich analysiert. Die Messbahn ist mit einem Interferometer und einem motorisierten Messwagen ausgestattet. Auf dem Messwagen wurde ein planares, weißes Ziel angebracht. Die Präzision der Messbahn liegt bei einigen Mikrometern; die Genauigkeit (Bestimmung absolute Distanz) liegt aufgrund des Messaufbaus bei etwa 2 mm (minimale Distanz: 1.247 m). Abb. 8 zeigt den Versuchsaufbau für die Messung eines zentralen Pixels.

Abb. 9 zeigt die Resultate der Messungen für beide untersuchten Kameras. Dargestellt ist bereits eine additive Look-Up-Tabelle für die Korrektur der Distanzmessung. Neben der bereits erwähnten Abhängigkeit der Messungen von der Integrationszeit ist deutlich ein zyklischer Effekt zu sehen. Dieser wurde bereits von Lange (2000) theoretisch prädictiert. Ursache dafür sind harmonische Funktionen ungeraden Grades in der Modulation der emittierten Strahlung.

Die Amplitude des zyklischen Effekts liegt bei ca. 10–20 cm. Trotz dieser enormen Größe scheint es klar zu sein, dass die erkennbare Systematik eine Kalibrierung dieses Effekts zulässt.

4.1.2 Fixed Pattern Noise

Bisher wurde nur ein einziges Pixel betrachtet. Stellt sich also die Frage nach der Gleichartigkeit der verschiedenen Pixel. Aufgrund der großen Anzahl an Pixeln ist es nicht sinnvoll, jedes Pixel einzeln auf der Messbahn zu kalibrieren. Relativ einfach kann aber der so genannte Fixed Pattern Noise (FPN) ermittelt werden. Dabei handelt es sich um die Additionskonstante eines jeden Pixels. Dazu wurde der SR-2 senkrecht auf eine weiße Wand ausgerichtet und die Soll-Distanz mit der gemessenen in jedem Pixel verglichen. Abb. 10 zeigt den FPN für den

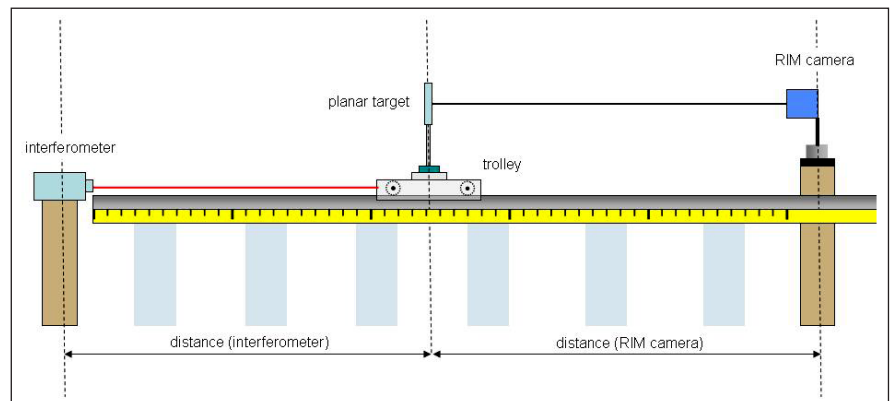


Abb. 8: Automatische, interferometrische Messbahn des IGP der ETH Zürich (Prinzipskizze)

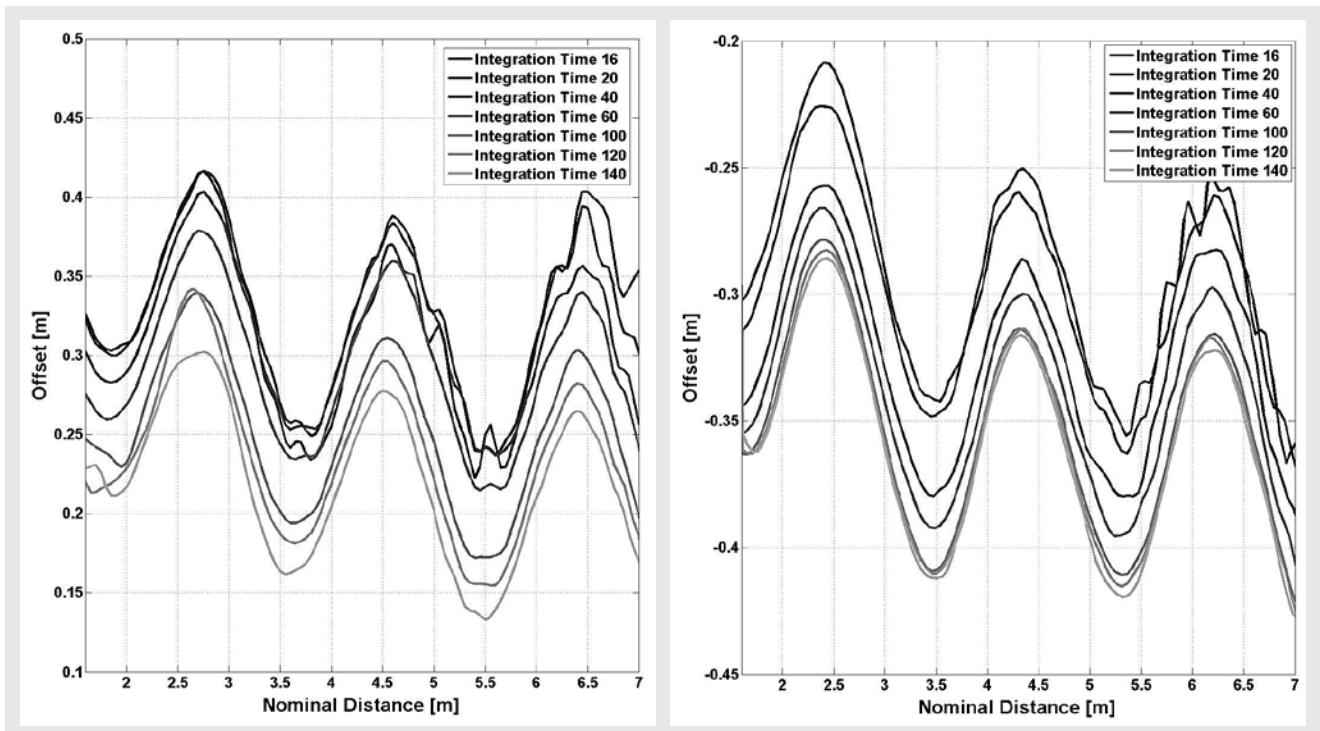


Abb. 9: Distanzkalibrierung (additive Look-Up-Tabelle) für ein zentrales Pixel des SR-2 (links) und des neuen SR-3000 (rechts)

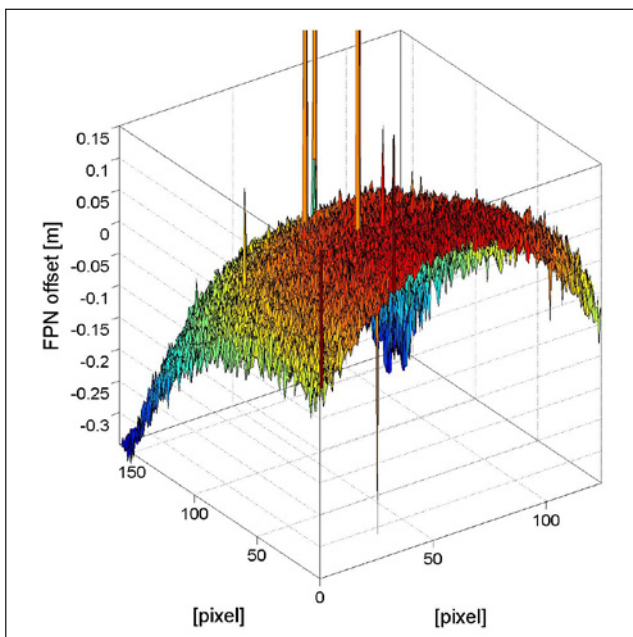


Abb. 10: Fixed Pattern Noise (FPN) Matrix für den untersuchten SR-2 (Messung auf eine weiße Wand in 2.453 m Entfernung).

untersuchten SR-2, bei dem der zyklische Effekt bereits reduziert wurde. Der gleichmäßige Verlauf lässt wiederum den Schluss zu, dass auch dieser Effekt sehr gut kalibrierbar ist.

4.1.3 Photogrammetrische Kamerakalibrierung

Das optische System des SR-2 wurde bereits von Kahlmann et al. (2006) untersucht. Verzerrungen des op-

tischen Systems von der Idealvorstellung sorgen dafür, dass die ermittelten, indirekt gemessenen Koordinaten von der Wirklichkeit abweichen. Wegen der, im Vergleich zu anderen Kamerasystemen, geringen Auflösung des SR-2 sind bereits vorhandene Zieltafeln nicht geeignet, um die nötigen Kalibrierparameter zu bestimmen. Daher wurde eine spezielle Zieltafel entwickelt, die mit Hilfe von NIR LEDs Zielmarken erzeugt, welche im Intensitätsbild des SR-2 automatisch erkannt werden können. Für den SR-3000 ist dieses Verfahren nicht anwendbar, da dieser mit einer Hintergrundlichtunterdrückung ausgestattet ist. Retroreflektoren oder einfach eine kontrastreichere Zieltafel wären hier eine Option. Abb. 11 zeigt die Kalibrier-situation. Aus den Kalibriermessungen wurden der Bildhauptpunkt sowie die radiale Verzeichnung des Objektivs bestimmt. Diese wurden dann in den Kalibrierprozess eingebaut.

4.2 Integrale 3D-Kalibrierung

Bisher wurde lediglich die Kalibrierung der einzelnen Systemkomponenten bzw. Einflussparameter betrachtet. Wegen der Komplexität der Distanzkalibrierung erscheint es sinnvoll zu sein, andere Ansätze zu finden. Einer dieser Ansätze ist es, sich nur noch mit den ermittelten Koordinaten zu beschäftigen. Temperaturabhängigkeiten lassen sich damit nicht beseitigen, aber die photogrammetrische und die Distanzkalibrierung werden durch einen integralen, also ganzheitlichen Ansatz bedingt umgangen bzw. die systematischen Restabweichungen nach einer Parameterkalibrierung können dadurch weiter

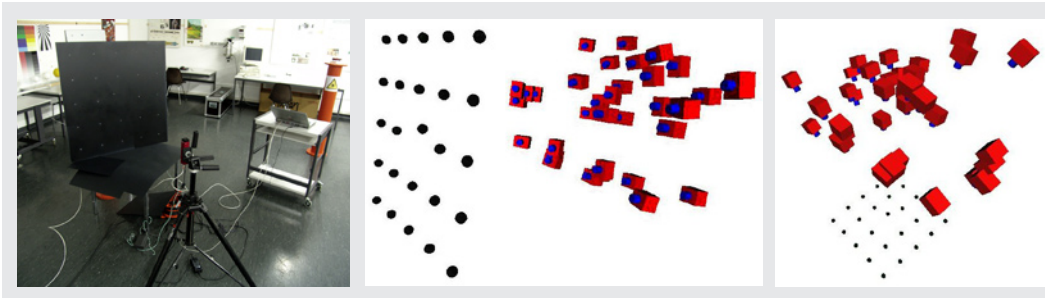


Abb. 11: Kalibriersituation des optischen Systems des SR-2 mittels einer mit NIR LEDs ausgestatteten Platte. Die LEDs können im Intensitätsbild automatisch erkannt werden und dann in eine Bündelblockausgleichung zur Ermittlung der Kalibrierparameter einfließen. Die Aufnahme-positionen sind in der Mitte und rechts abgebildet.

reduziert oder gänzlich eliminiert werden. Dazu wurde ein spezieller Messaufbau entwickelt. Dadurch können Sollkoordinaten erzeugt und mit den vom SR-2 gemessenen Koordinaten verglichen werden. Abb. 12 zeigt den Vergleich von Sollkoordinaten und gemessenen Koordinaten. Dieses 3D-Vektorfeld kann nun in Form einer 3D-Look-Up-Tabelle zur Korrektur von gemessenen Koordinaten verwendet werden.

litärischen Anwendungen, lassen sich gerade im Bereich der Vermessung viele Einsatzmöglichkeiten finden. So muss damit gerechnet werden, dass RIM-Kameras insbesondere Nahbereichsscanner in einem gewissen Maß ersetzen bzw. ergänzen werden. Aufgrund der enorm hohen Akquisitionsgeschwindigkeit lässt sich neben einer hochaufgelösten dreidimensionalen Erfassung auch eine schnelle Wiederholung der Erfassung realisieren. Dadurch zeichnet sich RIM nicht nur zur einmaligen Erfassung,

5 Applikationen

Viele verschiedene Anwendungsgebiete sind geradezu prädestiniert, sich die RIM-Technologie zunutze zu machen. Neben den treibenden Bereichen, der Automobilindustrie, der Robotik und ganz wesentlich den mi-

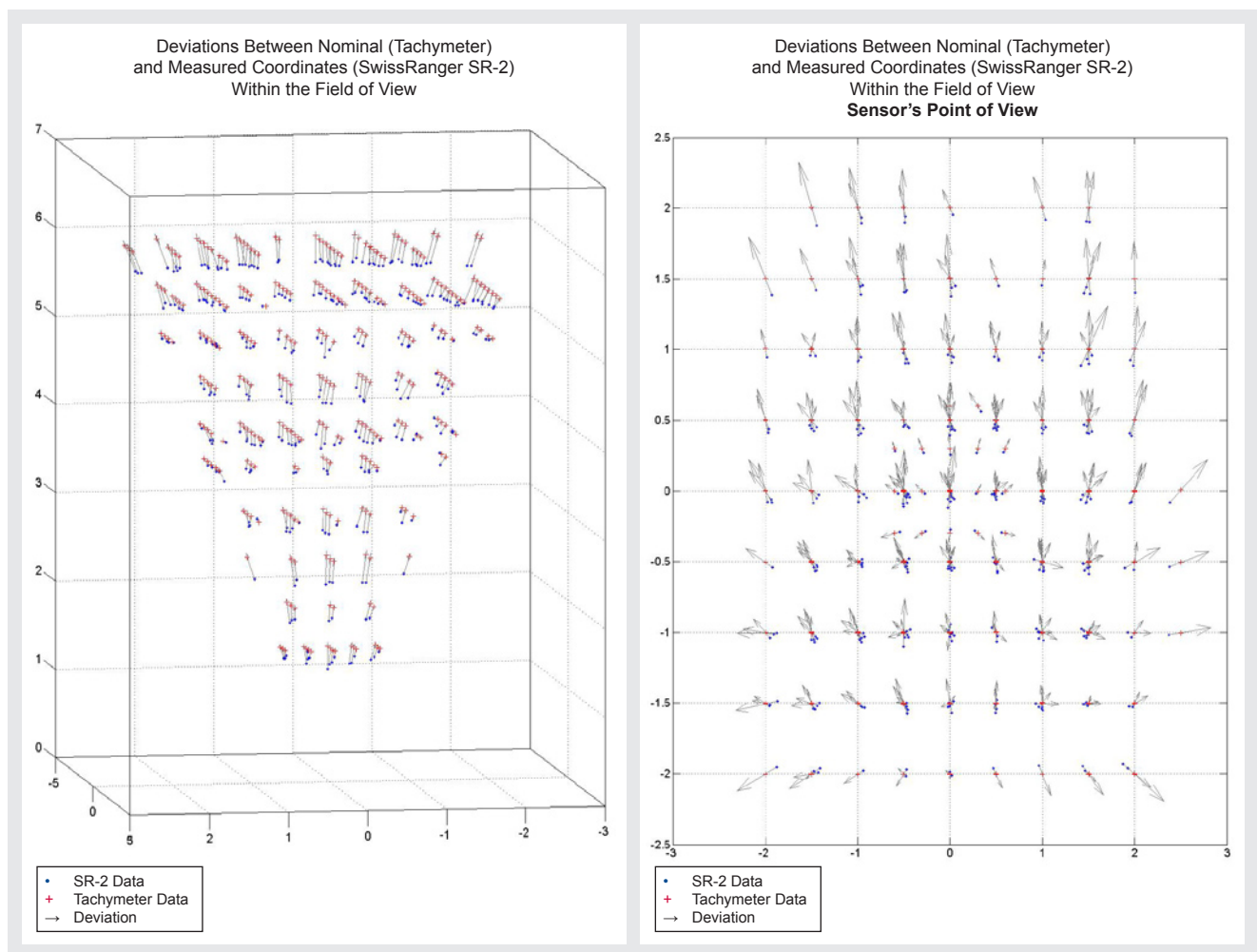


Abb. 12: Links: Vektorfeld zur Kalibrierung der Abweichungen der gemessenen räumlichen Koordinaten (Punkte) von den Sollkoordinaten (Kreuz). Rechts: In der Projektion in die Sensorebene sind die radialen Abweichungen in der Überhöhung sehr deutlich zu erkennen.

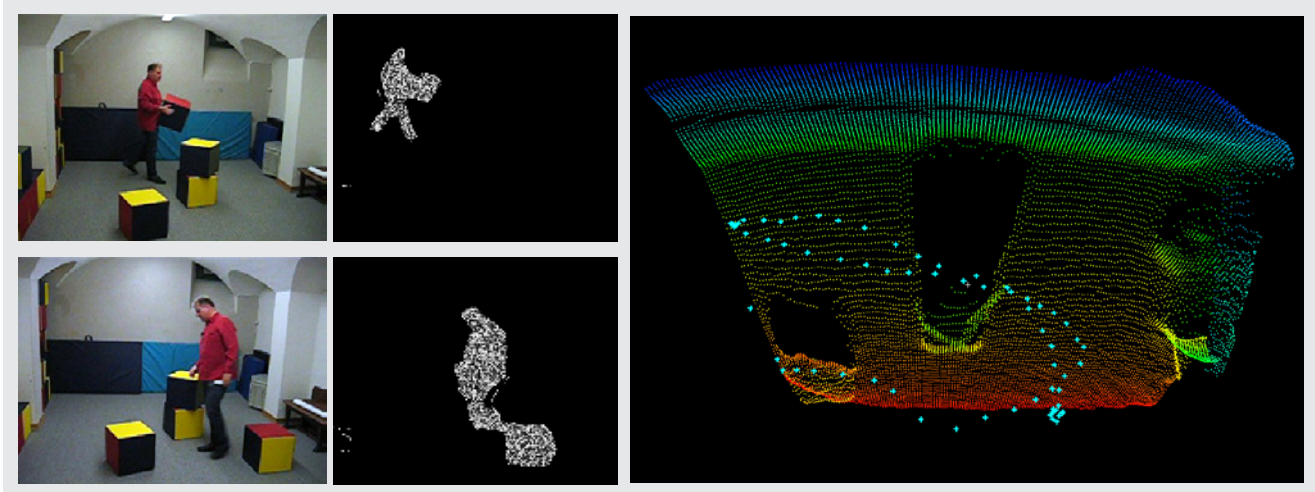


Abb. 13: Innenraum Verfolgung von Personen und Objekten. Die Trajektorie der Person ist rechts zu sehen (Blick von oben). Die Genauigkeit der Verfolgung ließe sich durch eine Kalibrierung stark verbessern.

sondern auch zur räumlichen Überwachung aus. Bisher wurden einige Versuche zur Überwachung von Innenräumen unternommen. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

5.1 Background Subtraction und Threshold

In einem ersten Versuch wurde eine Innenraumszene aufgenommen, in der sich einige Personen frei im Raum bewegen. Zuerst wurde dazu der Innenraum aufgenommen, also eine Grundwahrheit in Form eines 3D-Modells akquiriert. In den nachfolgenden Aufnahmen wurden dann diejenigen Punkte erkannt, welche sich um eine zuvor festgelegte Distanz von dem Hintergrund unterschieden. Die veränderten Punkte werden in Clustern zusammengefasst. Dadurch ist auch die Erkennung separater Objekte möglich. Abb. 13 zeigt auf der linken Seite die Situation und die daraus separierten Punktwolken der zu verfolgenden Person. Auf der rechten Seite ist die Trajektorie, wie sie aus einer Bildsequenz extrahiert wurde, dargestellt. Aufgrund der hohen Datendichte lässt sich die Bewegung der Person sehr detailliert nachverfolgen.

Für diesen Versuch wurden unkalibrierte Daten verwendet. Durch eine entsprechende Kalibrierung ließe sich die Qualität der Trajektorie stark verbessern. In die extrahierten Punktwolken könnte zur Verbesserung und zur Bestimmung von Körperbewegungen ein geeignetes Modell der Person eingepasst werden. Dadurch ließen sich z.B. Arm-, Bein- oder Kopfbewegungen detektieren. Diese Informationen ließen sich danach weiter interpretieren und ließen u.U. einen Rückschluss darauf zu, ob die Bewegungen auffällige Anomalien aufweisen.

5.2 CONDENSATION – Algorithmus-basierter Tracker

Die oben beschriebenen Aufnahmen einer Innenraumscene wurden danach noch einmal mit einer anderen

Methode analysiert und ausgewertet. Dazu wurde ein auf stochastischen Grundlagen basierender Algorithmus verwendet. Ein bayes-basierter Partikelfilter wurde im Rahmen einer Arbeit am IGP umgesetzt und an die gegebenen Daten angepasst (Guillaume 2006). In der Literatur ist dieser Algorithmus auch unter dem Begriff CONDENSATION bekannt und wurde von Isard und Blake (1998) vorgestellt. Abb. 14 zeigt einige Resultate dieser Umsetzung. Ähnlich einem Kalman-Filter wird dabei die nächste Position des zu trackenden Objekts prädiziert und mittels Messung angepasst.

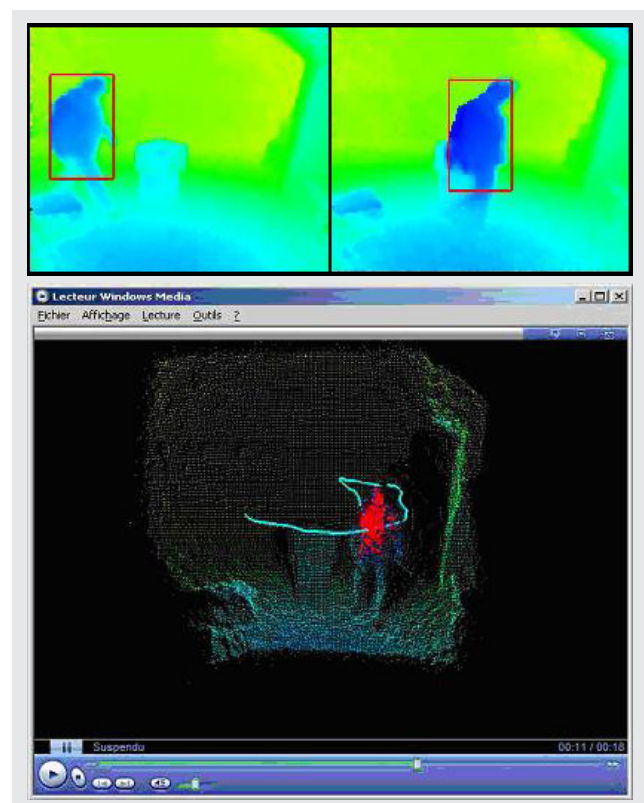


Abb. 14: Verfolgung einer Person, welche danach durch eine Box repräsentiert wird (oben). Unten ist die Trajektorie der Person dargestellt.

In beiden Fällen, der Hintergrundgenerierung mit Grenzwertüberschreitung als auch dem CONDENSATION Tracker, konnten gute Ergebnisse erzielt werden, obwohl unkalibrierte Daten verwendet wurden und das Potential der verschiedenen Algorithmen bei weitem nicht ausgereizt wurde. Es konnte aber gezeigt werden, dass die RIM-Technologie außerordentlich gut für derartige Applikationen geeignet ist. In jedem Fall würde, z.B. durch den Einsatz weiterer RIM-Kameras, eine noch bessere Abdeckung der Raumbofläche erzielt werden können. Dadurch ließen sich die Schattenräume verringern, die beim Einsatz einer einzelnen Kamera entstehen. Dennoch zeigt die hohe räumliche und zeitliche Auflösung der RIM-Sensoren die klaren Vorteile dieser Technologie gegenüber bestehenden Systemen. Aufgrund der matrizenartigen Anordnung der Bildelemente können viele bereits bestehende und hoch entwickelte Algorithmen für den zweidimensionalen Fall mit leichten Variationen auf die Distanzbilddaten übertragen werden.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein kleiner Überblick über den Stand der Range-Imaging-Technologie vermittelt. Im Wesentlichen wurde gezeigt, welches Potential besteht und mit welchen Problemen derzeit noch zu rechnen ist. Im Speziellen wurden die SwissRanger-Kameras von CSEM näher untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Kalibrierung der Systeme notwendig und möglich ist, um das Potential dieser Technologie voll auszunutzen. Diese Schritte sind beim Hersteller bereits softwareseitig vorgesehen. Schließlich wurde eine Anwendung näher erläutert und Ergebnisse ausschnittshaft präsentiert.

Das hohe Potential und die Eigenschaften der aktuellen RIM-Systeme zeigen, dass in Zukunft viele Anwendungen mit derartigen Kameras ausgerüstet werden. Da es sich um ein schnelles und präzises dreidimensionales Messverfahren handelt, spielt es sicherlich auch in der Vermessung zukünftig eine wesentliche Rolle.

Literatur

- Büttgen, B., Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R. und Lustenberger, F.: CCD/CMOS Lock-In Pixel for Range Imaging: Challenges, Limitations and State-of-the-Art. In: Proceedings of the First Range Imaging Research Day an der ETH Zürich, ISBN 3-906467-57-0, 2005.
- Gokturk, S., Burak, Yalcin, H. und Bamji, C.: A Time-Of-Flight Depth Sensor – System Description, Issues and Solutions. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004.
- Guillaume, S.: Identification and Tracking of Moving People in Range Imaging Data. Unpublished Seminar Thesis an der ETH Zürich, 2006.
- Hennes, M. und Ingensand, H.: Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. In: Proceedings of the XIII. International Course on Engineering Surveying, 2000.

- Isard, M. und Blake, A.: CONDENSATION – conditional density propagation for visual tracking. *Int. J. Computer Vision*, 29, 1, 5–28, 1998.
- Izhal, A. H., Ushinaga, T., Sawada, T., Homma, M., Maeda, Y., Kawahito, S.: A CMOS time-of-flight range image sensor with gates on field oxide structure. *Sensors IEEE*, 2005.
- Janesick, J. R.: Scientific Charge-Coupled Devices. SPIE Press, 2001.
- Kahlmann, T. und Ingensand, H.: Investigation of the Range-Imaging-Camera SwissRanger™. *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Vol. I, S. 227–236, 2005.
- Kahlmann, T. und Ingensand, H. (2005): Calibration and improvements of the high-resolution range-imaging camera SwissRanger™, SPIE, Vol. 5665, S. 144–155.
- Kahlmann, T., Remondino, F. und Ingensand, H.: Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger™. In: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*, 2006.
- Lange, R.: 3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology. Dissertation, Universität Siegen, 2000.
- Matsushita Electric Works, Ltd.: Range Camera Becomes Practically Available; Full-fledged Production in Sight. <http://www.mew.co.jp/e/corp/news/2004/0402-01.htm>, zuletzt besucht am 21.09.2006, 2004.
- Möller, T., Kraft, H., Frey, J., Albrecht, M. und Lange, R.: Robust 3D Measurement with PMD Sensors. In: *Proceedings of the First Range Imaging Research Day an der ETH Zürich*, ISBN 3-906467-57-0, 2005.
- Niclass, C., Besse, P. A. und Charbon, E.: Arrays of Single Photon Avalanche Diodes in CMOS Technology: Picosecond Timing Resolution for Range Imaging. In: *Proceedings of the First Range Imaging Research Day an der ETH Zürich*, ISBN 3-906467-57-0, 2005.
- Oggier, T., Büttgen, B., Lustenberger, F., Becker, G., Rüegg, B. und Hodac, A.: SwissRanger SR3000 and First Experiences based on Miniaturized 3D-TOF Cameras. In: *Proceedings of the First Range Imaging Research Day an der ETH Zürich*, ISBN 3-906467-57-0, 2005.
- Oggier, T., Kaufmann, R., Lehmann, M., Metzler, P., Lang, G., Schweizer, M., Richter, M., Büttgen, B., Blanc, N., Griesbach, K., Uhlmann, B., Stegemann, K.-H. und Ellmers, C.: 3D-Imaging in Real-Time with Miniaturized Optical Range Camera. *Proceedings of the Opto-Conference, Nürnberg, Deutschland*, 2004.
- Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R., Schweizer, M., Richter, M., Metzler, P., Lang, G., Lustenberger, F. und Blanc, N.: An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger™). SPIE, Vol. 5249, 2004.
- Seitz, P.: Unified analysis of the performance and physical limitations of optical range-imaging techniques. In: *Proceedings of the First Range Imaging Research Day an der ETH Zürich*, ISBN 3-906467-57-0, 2005.
- Stoppa, D., Viarani, L., Simoni, A., Gonzo, L., Malfatti, M. und Pedretti, G.: A 50×30-pixel CMOS Sensor for TOF-based Real Time 3D Imaging. *IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors*, 2005.

Anschrift der Autoren

Timo Kahlmann | Hilmar Ingensand
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich
 8093 Zürich, Schweiz
kahlmann@range-imaging.com | kahlmann@geod.baug.ethz.ch
ingensand@range-imaging.com | ingensand@geod.baug.ethz.ch