

Range Imaging Metrologie: Einführung, Untersuchungen und Weiterentwicklung

T. Kahlmann, H. Ingensand

Mit den seit kurzem auf dem Markt erhältlichen Range Imaging Kameras stehen 3D Sensoren mit einer erstaunlichen Leistungsfähigkeit zur Verfügung. Die technologische Grundlage bildet die Fähigkeit jedes einzelnen Bildelements, Distanzen zu messen und somit 3D Koordinaten mit Videobildraten zu erzeugen. In diesem Beitrag werden Untersuchungen zur Kalibrierung derartiger Messsysteme vorgestellt. Insbesondere die Qualifizierung und Quantifizierung der verschiedenen Einflussparameter stehen dabei im Vordergrund. Schließlich wird die erfolgreiche Implementierung eines Systems zur Kompensation temperaturinduzierter Driften vorgestellt und validiert.

1 Einführung

Laufzeitbasierte Range Imaging (RIM) Kameras sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich. Seit ihrer Erfindung vor ca. 14 Jahren (nicht-militärischer Markt) haben sie in vielen Anwendungen Einzug gehalten. Im Bereich der Vermessung ist das detaillierte Wissen um diese neuartige Sensorik eher gering. Viele Einzelheiten bezüglich der Eigenschaften des RIM sind wenig erforscht. In diesem Beitrag werden einige Aspekte näher beleuchtet.

Wie Abbildung 1 zeigt, besteht eine RIM Kamera aus zwei wesentlichen Komponenten. Ein Signalemitter sendet modulierte Strahlung aus. Die dabei verwendeten Modulationsarten basieren bei den aktuellen Sensoren in der Regel auf dem Prinzip der Amplitudenmodulation. Ein Teil der ausgesendeten Strahlung wird im Objektraum reflektiert und teilweise von einer vorgeschalteten Optik auf einem speziellen Bildsensor abgebildet. Die Besonderheit dieses Bildsensors liegt darin, dass jedes einzelne Pixel in der Lage ist, die empfangene Strahlung zu demodulieren, d.h. die Phasenlage bzw. die Laufzeit des Signals zu bestimmen. LANGE (2000), OGGIER et al. (2004), OGGIER et al. (2005), und BÜTTGEN et al. (2005) beschreiben das indirekte Time-of-Flight-Messverfahren (Phasenlage) in Bezug auf das RIM näher.

Am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich sind zwei RIM Kameras verfügbar: SwissRanger

SR-2 und SwissRanger SR-3000 von CSEM (Schweiz). Abbildung 2 zeigt diese beiden Kameras, welche beide sehr geringe Außenmaße aufweisen. Für einige Untersuchungen stand auch ein Modell 3k-S von PMD Technologies (Deutschland) zur Verfügung. Die Grundtechnologie aller drei Kameras ist, bis auf einige Unterschiede in der Ausführung, dieselbe. Alle basieren auf dem indirekten Laufzeitmessverfahren. Einzelheiten können in der entsprechenden Literatur nachgelesen werden. Darüber hinaus berichten NICLASS et al. (2005) von einer erfolgreichen Implementierung von Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) in CMOS-Bildsensoren. Dadurch wird das direkte Laufzeitmessverfahren realisiert, mit der die Distanzmessung auf eine Laufzeitmessung reduziert wird. Im Weiteren wird ausschließlich die Untersuchung von RIM-Kameras, welche auf dem indirekten Laufzeitmessverfahren basieren, vorgestellt.

Die Demodulation der empfangenen Strahlung wird bei den SwissRanger- und PMD-Kameras über vier sequentielle Intensitätsmessungen vollzogen. Dabei wird in jedem Pixel die sinusförmige, amplitudenmodulierte Welle mithilfe von vier, um 90° verschobenen, integrierenden Intensitätsmessungen rekonstruiert (demoduliert). Aus diesen vier Messungen kann dann mithilfe einfacher Zusammenhänge die Phasenlage und damit die zurückgelegte Distanz berechnet werden (vgl. LANGE, 2000). Auf-

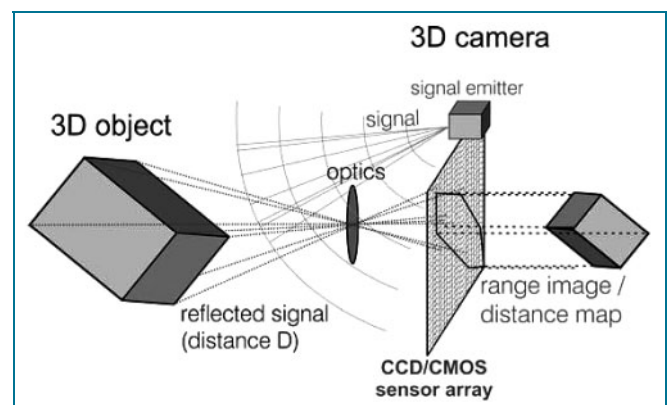


Abb. 1: Range Imaging (RIM) Grundprinzip. Moduliertes Licht wird ausgesendet und mithilfe einer geeigneten Optik auf einem speziellen Bildsensor abgebildet. Dieser Sensor ist in der Lage, in jedem Pixel die Phasenlage (indirektes Laufzeitverfahren) oder die Laufzeit (direktes Laufzeitverfahren) zu bestimmen. Daraus kann zu jedem Bild eine korrespondierende 3D Koordinate berechnet werden.



Abb. 2: Einige der zurzeit auf dem Markt verfügbaren RIM Kameras: SR-2 (links), SR-3000 (Mitte), beide von CSEM (Schweiz) und eine 3k-S von PMD Technologies (Deutschland). Die untersuchten Kameras von CSEM haben ca. 20 000 (SR-2) bzw. 25 000 (SR-3000) Pixel. Die 3k-S besitzt ca. 3000 Pixel (eine ca.19 000-Pixel-Kamera ist auch von PMD verfügbar). Alle Sensoren sind standardmäßig auf 7,5 m Messdistanz ausgelegt.

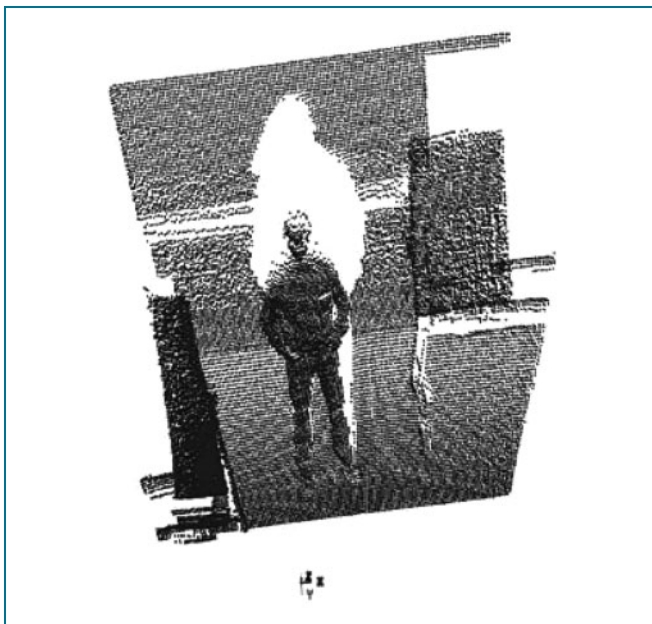


Abb. 3: 3D Punktwolke einer Person und einigen Objekten. Die Koordinaten wurden aus Messungen eines SR-3000 abgeleitet. Insbesondere die Kombination der hohen Auflösung mit Videobildraten (bis zu etwa 50 Hz) und der entsprechenden Simultaneität der Daten zeigen die wesentlichen Vorteile der RIM-Technologie.

grund der geometrischen Beziehungen im Kamerasystem kann nun für jedes Pixel aus den Pixelkoordinaten und der Distanz eine dreidimensionale Koordinate gerechnet werden. Aufgrund der Simultaneität der Distanzmessung in allen Pixeln kann mit jedem Bild ein entsprechendes 3D Modell abgeleitet werden. Abbildung 3 zeigt eine Punktwolke, welche aus den Messungen einer SR-3000-Kamera berechnet wurden.

RIM ist ein für viele Anwendungen einsetzbares Messverfahren, welches aufgrund seiner vielen Vorzüge immer mehr Verbreitung finden wird. Insbesondere die Automobilindustrie und die Robotik sind die treibenden Kräfte hinter der Weiterentwicklung dieser Technologie. Abbildung 4 zeigt einige wesentliche Anwendungen des RIM innerhalb eines Kraftfahrzeugs (vgl. auch FRITZSCHE (2007) und ZYWITZA et al. (2005)). Auch in der Vermessung wird der Einsatz derartiger Sensoren diskutiert. Dabei werden vor allem die weniger klassischen Gebiete der Vermessung, wie das Tracking von Personen, die schnelle Erfassung von bewegten Objekten und die Ergänzung bzw. der Ersatz des terrestrischen Laserscanning, angesprochen. Auch eine Anwendung in Tachymetern oder in Kombination mit GPS ist denkbar (KAHLMANN et al., 2006b).

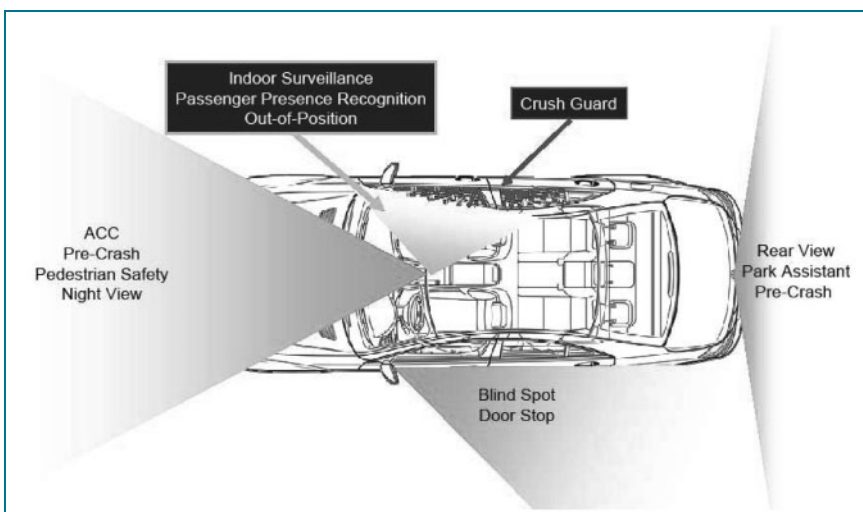


Abb. 4: Anwendungen der RIM-Technologie innerhalb eines Kraftfahrzeugs (nach FRITZSCHE, 2007). Insbesondere Fahrerassistenzsysteme und Sicherheitsapplikationen stehen im Vordergrund. Einige der hier gezeigten Einsatzgebiete werden in naher Zukunft in die Serienproduktion einfließen.

2 Kalibrierung von RIM Kameras

Bei der Verwendung von RIM-Kameras stellen sich dieselben Fragen, wie bei jeglicher Art Sensorik: Wie genau und zuverlässig sind die erhaltenen Daten? Welches sind die Einflussfaktoren? Aufgrund der wenigen Erfahrungen mit RIM-Sensoren sind geeignete Kalibrierprotokolle erst noch zu entwickeln. Dazu müssen aber die Eigenschaften des Systems bekannt sein. Am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich wurden daher einige Systeme untersucht und Kalibrieransätze entwickelt, welche die Einflussgrößen, nach einer Qualifizierung und Quantifizierung, mit in den Kalibrierprozess einbeziehen. Abbildung 5 zeigt einen Vorschlag, wie RIM-Sensoren des untersuchten Typs sinnvoll kalibriert werden können. Im Hinblick auf eine vollständige Kalibrierung eines Sensorsystems ist es notwendig, dass alle entsprechenden Einflussfaktoren bekannt sind und ihre Auswirkungen auf das Messsystem reproduzierbar aus dem Messergebnis rechnerisch oder mittels eines geeigneten Messaufbaus eliminiert bzw. minimiert werden können. Dieser Ansatz führt in der Regel zunächst zu einer Komponentenkalibrierung, wie sie in Abbildung 5 auf der linken Seite und in der Mitte aufgeführt ist. Um von den (sekundären) Rohmessdaten auf kalibrierte 3D Koordinaten zu kommen, können Einflussfaktoren (Streulicht/Scattering, Reflektivität, Distanz, Fixed-Pattern-Noise, evtl. Auftreffwinkel) erfasst werden und entsprechende Korrekturfunktionen eingesetzt werden. Des Weiteren kann eine photogrammetrische Kamerakalibrierung dazu verwendet werden, um Abbildungsabweichungen vom Idealfall zu berücksichtigen. Hier wäre auch eine kombinierte Kalibrierung, welche die Schätzung von Distanz- und Abbildungsparametern gemeinsam schätzt, denkbar (WESTFELD, 2006).

Bleiben nach der komponentenweisen Kalibrierung noch systematische Restabweichungen bestehen, so kann eine Systemkalibrierung (integral calibration = Gesamtkalibrierung) eingeführt werden. Diese kann zum Beispiel als mehrdimensionale Look-Up-Tabelle ausgeprägt sein. Restabweichungen des Messsystems nach erfolgter (evtl. nur teilweiser) Komponentenkalibrierung werden dann im 3D Koordinatenraum mittels vektorieller Verbesserungen korrigiert (KAHLMANN et al., 2006). Die Vorteile dieses Kalibrieransatzes wurden schon von HENNES et al. (2000) diskutiert. Gerade bei immer komplexer werdenden Messsystemen, deren Komponenten nur teilweise oder gar nicht bekannt sind, ist diese „Black-Box“-Kalibrierung von Vorteil.

3 Untersuchungen

Die vorgängig eingeführten Kalibrierprozesse sind nur umsetzbar, wenn die einzelnen Parameter, welche Einfluss auf die Messungen der RIM Kamera haben, bekannt sind und reproduzierbar berücksichtigt werden können. Dazu wurden am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich zahlreiche Versuche durchgeführt (KAHLMANN, 2007). Im Folgenden werden nur

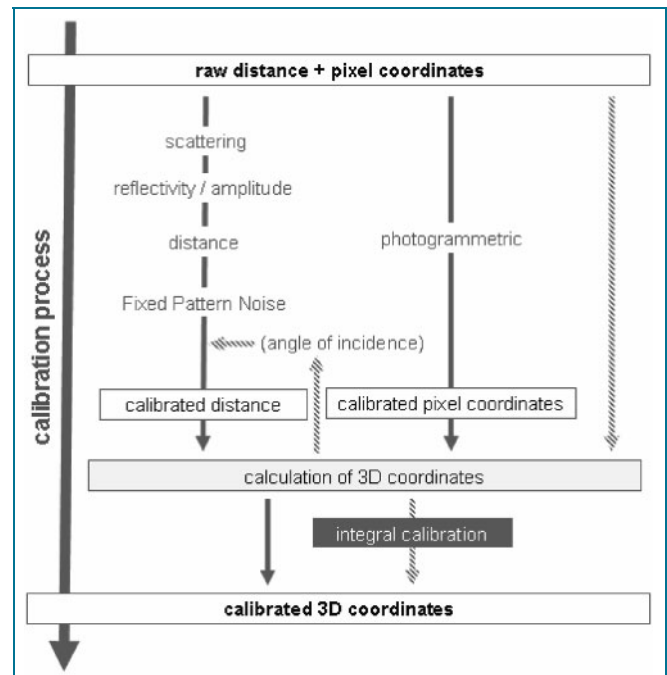


Abb. 5: Vorschlag für einen Kalibrierablauf bei RIM-Kameras. Neben der Komponentenkalibrierung (Distanz und optische Abbildung) wird eine Systemkalibrierung (integral calibration = Gesamtkalibrierung) eingeführt, welche Restabweichungen aus den vorangegangenen Kalibrieraspekten abfängt (KAHLMANN et al., 2007).

eine dieser Versuche kurz beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse festgehalten.

3.1 Linearität

Einer der wesentlichsten Aspekte bei der Charakterisierung eines Distanzmesssystems ist die Linearität der gemessenen Distanz, d.h. die Abhängigkeit des Distanzoffsets und -maßstabs von der Messdistanz. Im Falle der untersuchten RIM-Kameras hat LANGE (2000) bereits einige Aussagen gemacht und prädiziert, dass zyklische Effekte zu erwarten sind. Ursache dafür sind harmonische Anteile ungraden Grades in der Modulation der emittierten Strahlung. Drei Kameras wurden auf der interferometrischen Kalibrieranlage des IGP untersucht: SR-2 und SR-3000 von CSEM und eine 3k-S von PMD Technologies. Abbildung 6 zeigt Messresultate der Linearitätsmessungen. Wie deutlich zu sehen ist, treten zyklische Effekte von ca. $\pm 5-10$ cm auf. Da der funktionale Verlauf stetig ist, kann gezeigt werden, dass die Linearität der Sensoren mithilfe einer Kalibrierfunktion oder einer Look-Up-Tabelle hergestellt werden kann.

Da bisher nur jeweils ein zentrales Pixel betrachtet wurde, stellt sich die Frage nach der Homogenität des Chips. Um einen Eindruck davon zu bekommen, wurden beim SR-3000 dreizehn verschiedene Pixel im mittleren Messbereich auf ihre Linearität untersucht. Wie Abbildung 7 zeigt, kann neben der Variation des Distanzoffsets, welcher wiederum mithilfe der FPN-Kalibrierung aufgefangen werden kann, eine Phasenverschiebung bezüglich der verschiedenen Pixel festgestellt werden. Die Ursachen

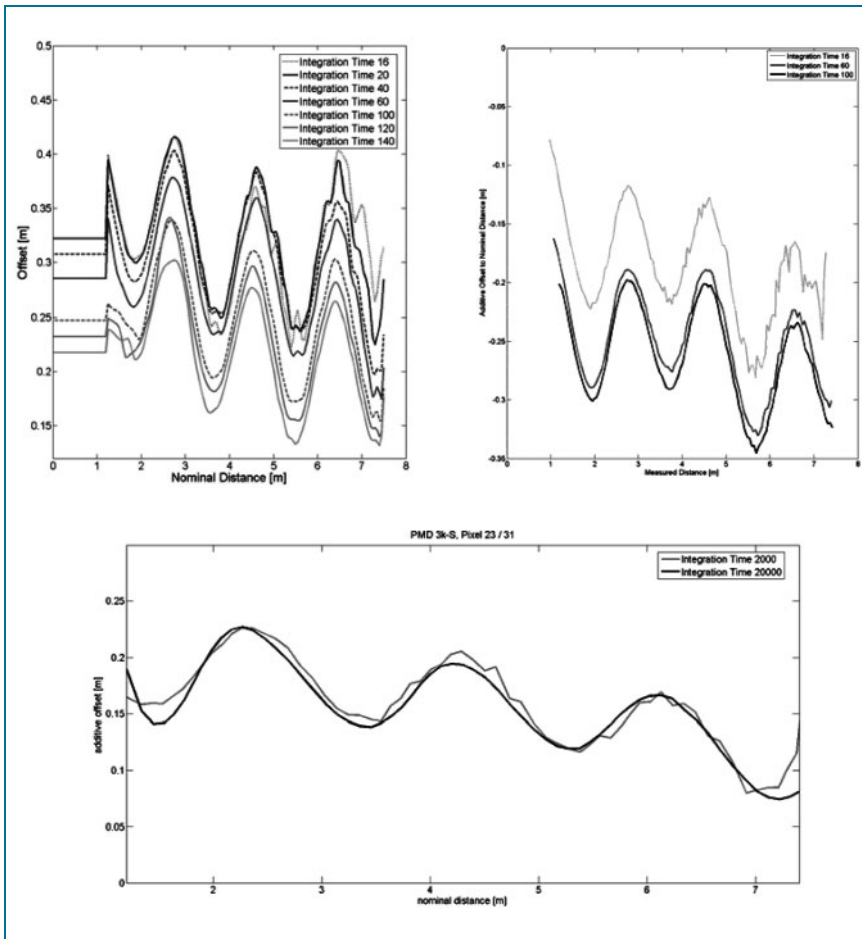


Abb. 6: Linearitätsabweichungen von drei unterschiedlichen RIM-Kameras. Oben zwei Kameras von CSEM (SR-2 links, SR-3000 rechts) und unten eine Kamera von PMD Technologies (3k-S). Der zyklische Effekt ist klar erkennbar, ist bereits von Lange (2000) prädictiert worden und macht etwa $\pm 5\text{--}10$ cm aus. Die Ähnlichkeit der verschiedenen Sensoren zeigt, dass die Technologiegrundlagen nicht stark voneinander abweichen.

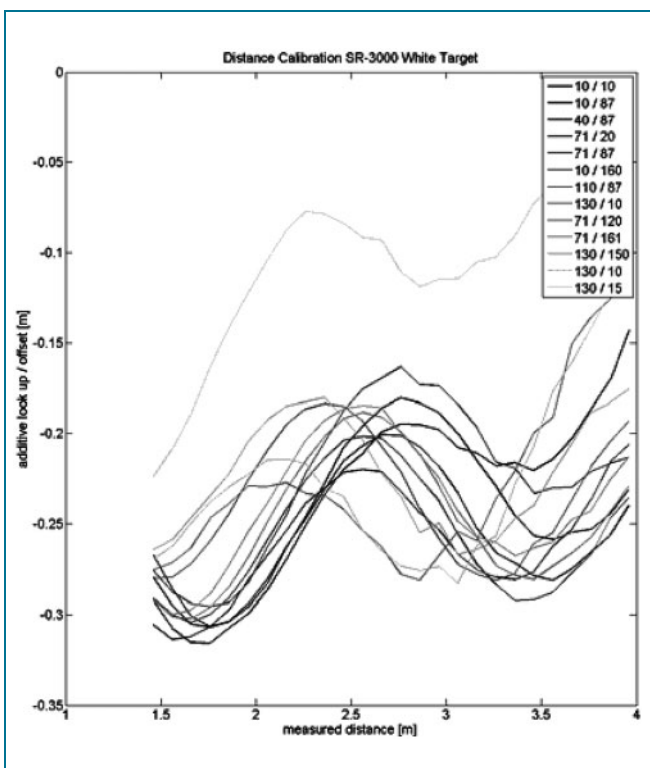


Abb. 7: Variation der Linearität verschiedener Pixel beim SR-3000. Neben den verschiedenen Offsetvariationen kann ganz deutlich eine Phasenverschiebung des zyklischen Effekts festgestellt werden.

dafür werden in der elektronischen Ansteuerung der einzelnen Pixel vermutet. Auf jeden Fall ist dieser Effekt bei der Kalibrierung des Sensors zu berücksichtigen. Ob dieser Effekt auch bei anderen RIM-Kameras auftritt, ist nicht bekannt.

3.2 Reflektivität

Neben der Distanz selbst, spielt die demodulierte Amplitude eine wesentliche Rolle bei der RIM-Messung. Diese spiegelt die Reflektivität des korrespondierenden Oberflächenelements wider und ist ein Maß für die Präzision der Distanzmessung. An dieser Stelle soll evaluiert werden, ob es einen Einfluss auf die Genauigkeit der Distanzmessung, d.h. auf die Nullpunktabweichung, gibt. Dazu wurde das in Abbildung 8 gezeigte Experiment durchgeführt.

Ein Grauwertkeil wird in einem Abstand von ca. 2 m vor der RIM-Kamera verschoben und die Distanz in senkrechter Richtung in einem Pixel gemessen. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs. Dabei wurden drei verschiedene Integrationszeiten verwendet. Alle Messungen wurden auf die jeweilige Asymptote reduziert, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen. Der Einfluss der Amplitude auf die Distanzmessung macht mehrere Zentimeter aus. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Korrelation zum nachfolgend beschriebenen Scatteringeffekt.

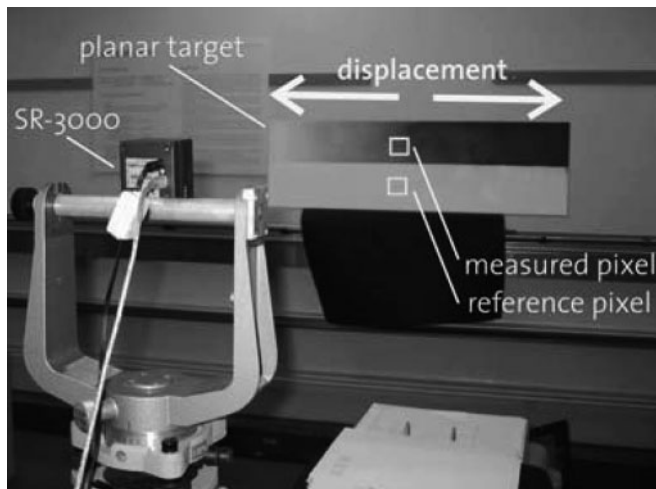


Abb. 8: Messaufbau zur Ermittlung eines etwaigen Einflusses der demodulierten Amplitude und damit der Reflektivität des Ziels auf die Distanzmessung beim SR-3000. Ein im Grauwert variierendes Ziel wird tangential vor der Kamera in einem senkrechten Abstand von etwa 2 m verschoben.

3.3 Scattering (Streulichteinfluss)

Unter Scattering ist der Streulichteinfluss auf die Distanzmessungen benachbarter Pixel zu verstehen. Der Idealfall des RIM geht davon aus, dass jedes Pixel des RIM-Sensors ausschließlich Strahlung von dem entsprechend korrespondierenden Oberflächenelement empfängt. In der Realität ist aber davon auszugehen, dass innerhalb des optischen Systems und ebenso innerhalb des Sensor-

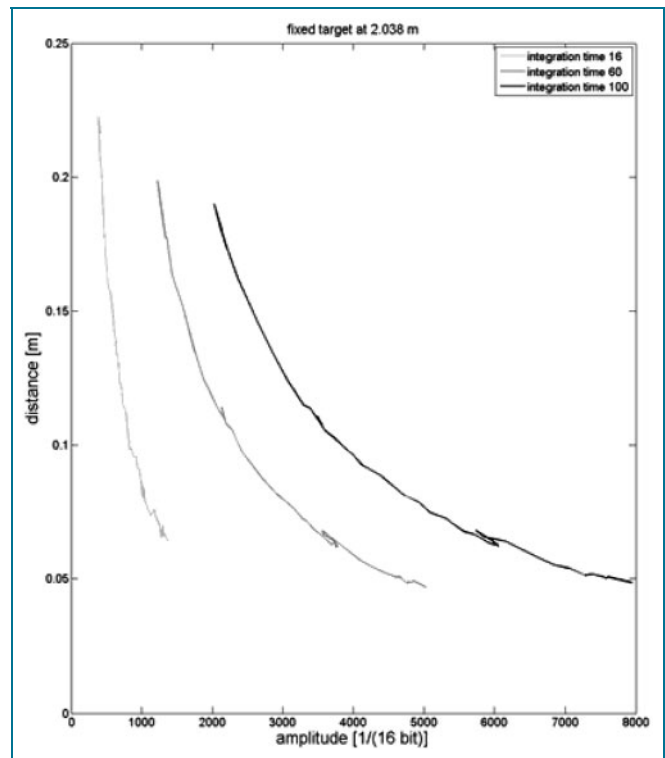


Abb. 9: Distanzmessungsvariationen auf einen Grauwertkeil mit drei verschiedenen Integrationszeiten. Die Messungen wurden auf die Asymptote der Distanzmessung reduziert, um die Werte vergleichbar zu machen. Der Einfluss der Amplitude ist deutlich erkennbar und macht mehrere Zentimeter aus. Die Korrelation zwischen Amplitude und Scattering bleibt noch zu klären.

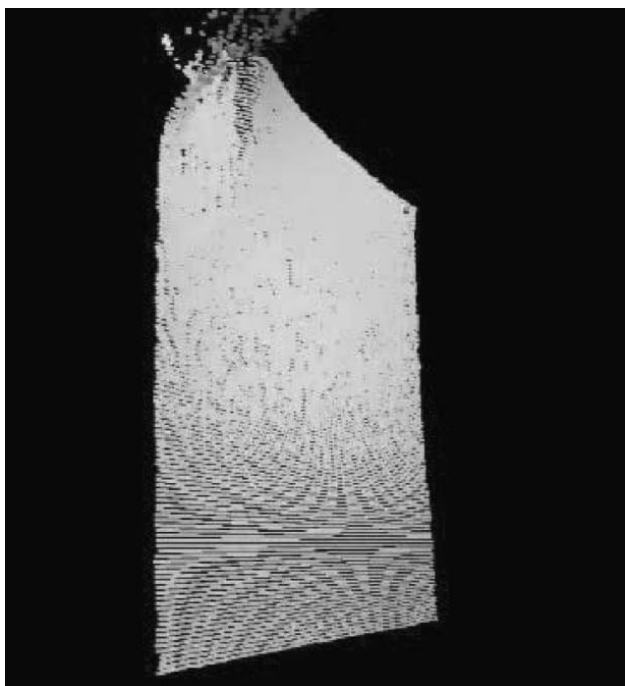


Abb. 10: Scattering wird im Wesentlichen durch Streustrahlung innerhalb der RIM-Kamera erzeugt. Strahlung, welche geometrisch zu anderen Pixeln gehört, beeinflusst die Distanzmessung des betreffenden Pixels. Auf der linken Seite ist eine Aufnahmesituation eines weitgehend ebenen Ziels zu sehen (Effekte am oberen Rand stammen aus einem speziellen Sensoraufbau und sind irrelevant). Auf der rechten Seite ist der Einfluss eines zwischen Sensor und Hintergrundziel eingeführten Ziels zu sehen. Zu erwarten wäre eine klare Stufe (Kante) in den Koordinaten. Demgegenüber steht der gleitende Übergang der Distanzen. Dies deutet auf eine Korrelation der in den Pixeln gemessenen Distanzen hin.

gehäuses Streuungen und Reflektionen auftreten, sodass ein Pixel auch Strahlung und damit Informationen empfängt, die zu einem anderen Pixel gehören. Dadurch werden die Amplitude und Distanz verfälscht. Abbildung 10 zeigt diesen Effekt eindrücklich. Auf der linken Seite ist eine ungestörte Punktwolke zu sehen. Im unteren Bereich ist klar eine ebene Zielfläche zu erkennen. Auf der rechten Seite ist dieselbe Aufnahmesituation, allerdings mit einem zwischengelagerten Hindernis, zu erkennen. Dieses Hindernis sollte eigentlich eine klare Kante in der Punktwolke erzeugen. Abgesehen von Mischpixeln ist davon auszugehen, dass lediglich eine kleine Anzahl von Pixeln betroffen sein sollte. Wie Abbildung 10 auf der rechten Seite eindeutig zeigt, ist der Einfluss aber auch noch in weit von der Störzone entfernten Punkten, in Form einer Verschiebung, wirksam. MURE-DUBOIS et al. (2007) zeigen eine Möglichkeit, diesen Effekt mittels einer Filterfunktion zu reduzieren. Außerdem werden bei neueren Ausführungen spezielle Antireflectionsschichten eingesetzt, um Streustrahlung zu vermeiden. In der vorliegenden Version dieses RIM-Sensors stellt das Scattering jedoch bislang (ohne Filterung usw.) einen genauigkeitsbegrenzenden Faktor dar.

Abbildung 11 zeigt einen weiteren Versuch, der die Existenz des Scatteringeffekts eindrücklich demonstriert. Der SR-3000 wurde vor einer weißen Wand aufgebaut. Der

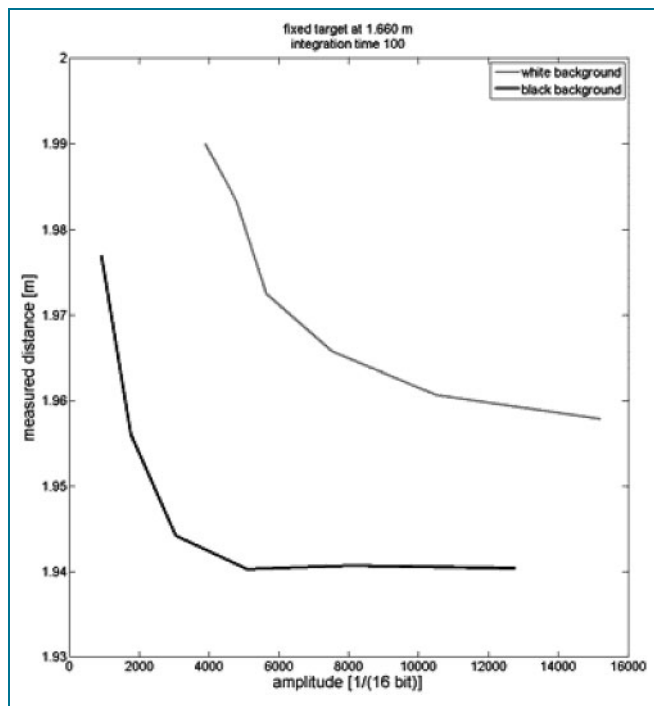


Abb. 11: Nachweis des Scatteringeffekts mit einem weiteren Experiment. Der SR-3000 wurde vor einer weißen Wand aufgebaut. Der Reihe nach wurden im Bereich eines zentralen Pixels verschiedene Zieltafeln angebracht, deren Größe etwas mehr als der Projektion der Pixelgröße entspricht. Die verschiedenen Zieltafeln unterscheiden sich in der Reflektivität. Der klar erkennbare Einfluss wurde bereits weiter oben aufgezeigt (Abbildung 9). Ein Wechsel der Hintergrundreflektivität (schwarze Wand) bringt einen deutlichen Distanz-Offset von mehreren Zentimetern mit sich, obwohl die Reflektivität der Zieltafel nicht verändert wurde.

Reihe nach wurden im Bereich eines zentralen Pixels verschiedene Zieltafeln angebracht, deren Größe etwas mehr als der Projektion der Pixelgröße entspricht. Die verschiedenen Zieltafeln unterscheiden sich in der Reflektivität. Der klar erkennbare Einfluss wurde bereits weiter oben aufgezeigt (Abbildung 9). Ein Wechsel der Hintergrundreflektivität (schwarze Wand) bringt einen deutlichen Distanz-Offset von mehreren Zentimetern mit sich, obwohl die Reflektivität der Zieltafel nicht verändert wurde.

3.4 Temperatur

Ein weiterer limitierender Faktor der Genauigkeit der Distanzmessung des RIM ist in der Temperaturabhängigkeit zu finden. Um den Einfluss der Temperatur auf die demodulierte Distanz zu untersuchen, wurden verschiedene Versuchsmessungen innerhalb einer Klimakammer durchgeführt. Ein typischer Versuch und die entsprechenden Resultate werden im Folgenden präsentiert.

Der SR-3000 wurde innerhalb einer Klimakammer in einer Distanz von ca. 2 m vor einer weißen Zieltafel aufgebaut. Die Temperatur wurde von 10 °C auf – 10 °C abgekühlt und danach auf ca. 40 °C angehoben (vgl. Abbildung 12). In der ganzen Zeit wurde die Distanz in einem Pixel zur Zieltafel gemessen, während weder Sensor noch Zieltafel bewegt wurden. Wie Abbildung 12 weiter gut zeigt, gibt es eine Korrelation zwischen gemessener Distanz und Temperatur. KAHLMANN et al. (2005b) haben bereits gezeigt, dass dies auch beim SR-2 der Fall ist. In Abbildung 12 sind aber Sprünge von mehreren Zentimetern in der Distanz zu erkennen, welche nicht durch einfache Temperaturveränderungen erklärbar sind. Es wird vermutet, dass dies im Zusammenhang mit der temperaturge-

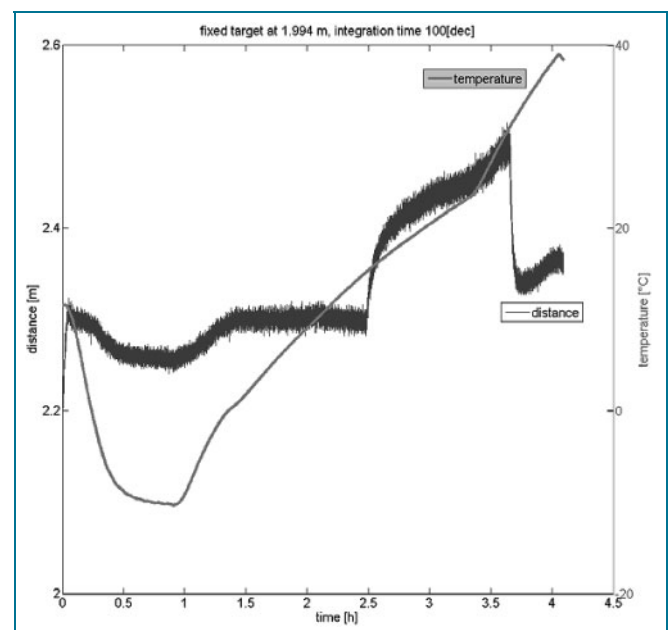


Abb. 12: Temperaturabhängigkeit der Distanzmessungen (zentrales Pixel). Aufgrund verschiedener Ursachen kann eine funktionale Korrektur der Distanzmessung bezüglich der Temperatur nicht gegeben werden. Teilweise treten erratische Fluktuationen auf. Daher muss zur Lösung dieses Problems ein geeigneter Ansatz gefunden werden.

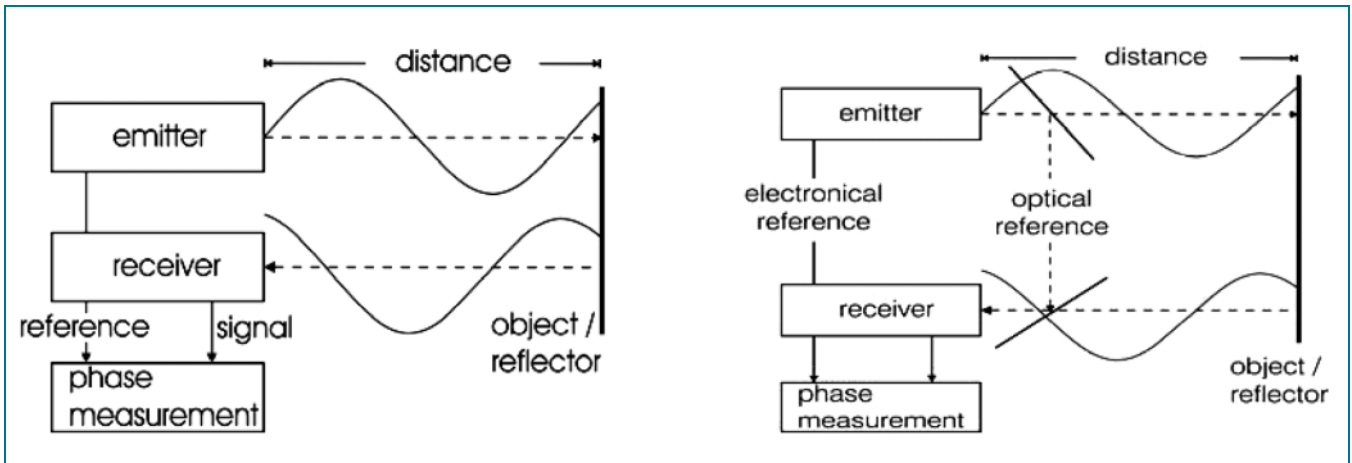


Abb. 13: Distanzmessprinzip nach der indirekten Laufzeitmessung mit dem Phasendifferenzverfahren. Um die Einflüsse der Temperatur auf die Distanzmessung zu eliminieren, wird eine optische Referenzstrecke eingeführt. Es wird angenommen, dass diese Referenzstrecke denselben Drifteffekten unterliegt wie die extern gemessene Distanz. Die extern gemessene Distanz kann dann mittels der Drift der Referenzstrecke korrigiert werden.

steuerten Belüftung der Kamera steht. Letztlich verunmöglichen diese unvorhersagbaren Distanzsprünge eine sinnvolle Kalibrierung der Distanz mit Bezug auf die Temperatur. Daher musste eine Möglichkeit gefunden werden, wie temperaturinduzierte Driften aus den Messdaten eliminiert oder zumindest reduziert werden können.

4 Interner Lichtweg: Temperaturunabhängigkeit

Eine der wesentlichen Voraussetzungen bei der Verwendung eines Distanzmesssystems ist die Zuverlässigkeit der erhaltenen Daten. Wie jedoch weiter oben beschrieben, stellen zwei entscheidende Aspekte Unsicherheitsfaktoren dar, welche nur zum Teil mit geeigneten Filtertechniken behoben werden können. Während für die Reduktion des Scattering bereits Lösungsansätze existieren, sind für das bereits vorgestellte Temperaturabhängigkeitsproblem noch Lösungen zu optimieren. Hier soll ein Ansatz vorgestellt werden, der aus der elektrooptischen Distanzmessung bekannt ist, dessen Umsetzung in Bezug auf das RIM aber noch nicht weiter bekannt ist. Zuerst wird kurz die dahinter stehende Theorie erläutert. Danach wird die umgesetzte Implementierung präsentiert. Abschließend wird das Potential dieser Methode validiert.

4.1 Theorie

Differentielle Messanordnungen zur Reduktion von Drifteffekten sind in der Geodäsie schon seit langem aus der hochgenauen Satellitenvermessung und aus der elektrooptischen Distanzmessung bei Totalstationen bekannt. Auch im Laserscanning wird dieser Ansatz zur Verbesserung der Distanzmesstagen verwendet. Die Grundidee ist die Korrektur der eigentlichen Messdaten mithilfe einer Referenzstrecke, welche genau bekannt ist. Es wird angenommen, dass diese Referenzstrecke denselben Driften wie die extern gemessene Strecke unterliegt. Abbil-

dung 13 zeigt die Einführung dieser Referenzstrecke in den messtechnischen Aufbau. Die mathematische (vereinfachte) Grundlage dieses Zusammenhangs liefert folgendes Modell:

$$D_{ext_corr} = D_{ext} - D_{int} + D_{int_corr}$$

wobei D_{ext} die extern gemessene Distanz, D_{int} die intern gemessene Referenzstrecke, D_{int_corr} die nominelle Referenzdistanz und schließlich D_{ext_corr} die korrigierte externe Strecke ist.

4.2 Implementierung

Es sind verschiedene Umsetzungen dieses Ansatzes im Bereich des RIM denkbar. Neben der Implementierung der Referenzstrecke für jedes einzelne Pixel (Referenzbild) oder eines zusätzlichen Referenz-RIM-Chips, wird hier ein anderer Weg gezeigt, welcher etwas einfacher zu realisieren war. Außerdem bietet dieser Ansatz den

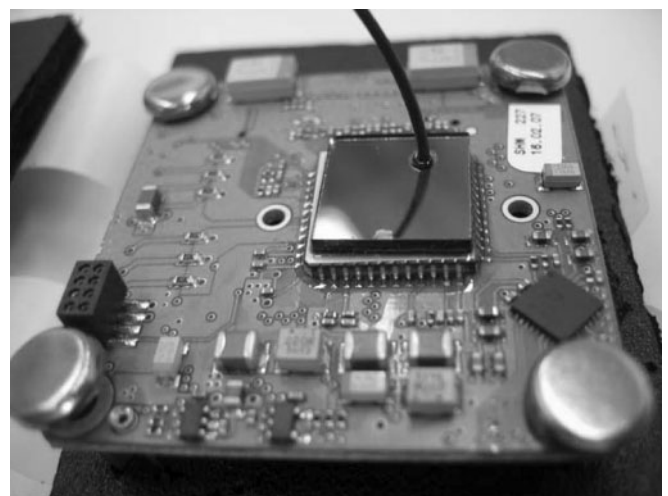


Abb. 14: Einsatz einer Glasfaser als Referenzstrecke bei einem SR-3000. Die Faser, kommend vom LED-Sendesystem, leitet die Referenzstrahlung durch den NIR-Filter auf eine Ecke des sensitiven Bereichs des RIM-Chips.

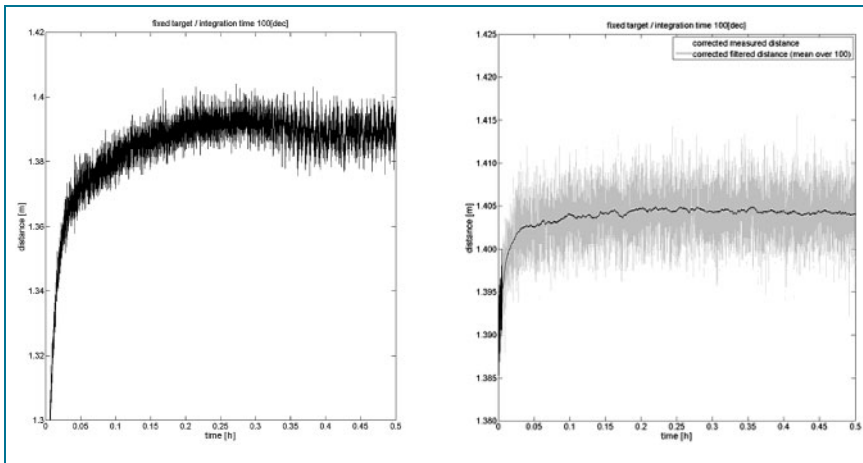


Abb. 15: Temperaturinduzierte Distanzdrift in den ersten Minuten der Aufwärmphase des SR-3000. Auf der linken Seite ist deutlich eine Drift von etwa 10 cm innerhalb der ersten Minuten zu erkennen. Nach der Reduktion um die Drift der Referenzstrecke wird dieser Effekt drastisch reduziert. Neben der Verkleinerung der Dimension wird die Dauer der Aufwärmphase deutlich verkürzt.

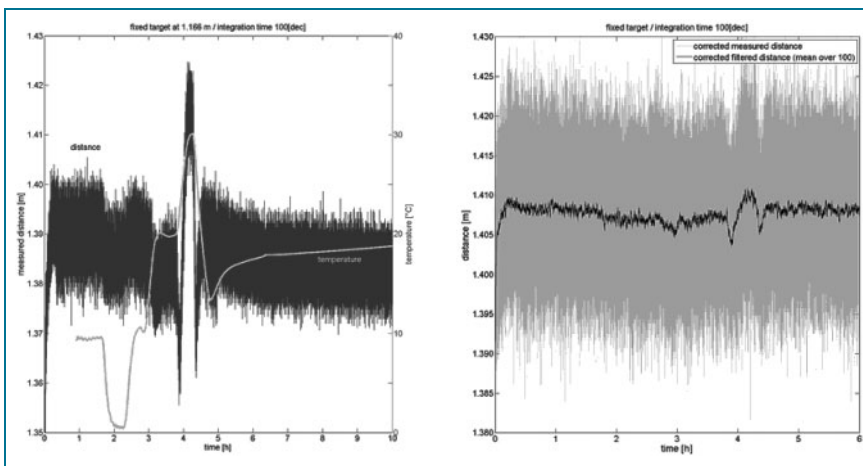


Abb. 16: Mithilfe der Referenzwegkorrektur können die enormen temperaturinduzierten Driften des SR-3000 (links) signifikant reduziert werden (rechts).

Vorteil, dass Teile des Originalchips benutzt werden und eine strenge Gleichzeitigkeit der Referenzmessung und der externen Messung stattfindet. Abbildung 14 zeigt die Einbindung einer Glasfaserverbindung vom Sendesystem zu einer Ecke des Sensors.

4.3 Validierung – Reduktion des Aufwärmeffekts

Zuerst soll die Auswirkung auf die (bisher nicht gezeigte) Aufwärmphase des Sensors untersucht werden. Abbildung 15 zeigt auf der linken Seite die aufwärmbedingte Distanzvariation des SR-3000. Deutlich ist eine Drift von etwa 10 cm in den ersten Minuten zu erkennen. Nach einer Korrektur der extern gemessenen Distanz mithilfe der aus der Referenzstrecke bestimmten Drift, ist eine deutliche Verkürzung der Aufwärmphase erkennbar. Außerdem wird die Drift um etwa 80–90 % kleiner. Trotzdem bleibt ein kleiner Resteffekt bestehen. Die mögliche Ursache und deren Beseitigung werden zum Schluss noch kurz erläutert.

4.4 Validierung – Reduktion externer Temperatureinflüsse

Zwei Temperaturexperimente sollen zeigen, wie wirksam die Referenzwegkalibrierung im RIM ist. Dazu wurde der SR-3000 wiederum in einer Klimakammer in einem Abstand von ca. 1,2 m vor einem planaren, weißen Ziel auf-

gebaut. Die Temperatur in der Klimakammer wurde, wie in Abbildung 17 (links) gezeigt, zwischen 0 °C und 30 °C variiert. Wie Abbildung 17 (rechts) zeigt, stellen sich wiederum zum Teil erratische Variationen der gemessenen Distanz ein. Nach einer Referenzkorrektur können diese Driften um etwa 80 % reduziert werden. Ein weiteres Experiment mit extremen Temperaturbereichen bestätigt diese Ergebnisse (Abbildung 17).

4.5 Ausblick

Wie bisher gezeigt werden konnte, kann mithilfe des Einsatzes einer geeigneten Referenzstrecke des internen Lichtwegs, eine signifikante und weitgehende Reduktion der temperaturinduzierten Driften der Distanzmesswerte erreicht werden. Dennoch bleiben Resteffekte bestehen. Eine wesentliche Ursache dieser Resteffekte ist in der, an dieser Stelle nicht berücksichtigten Korrektur des zyklischen Effekts, wie er oben beschrieben wurde, zu suchen. Die Länge der Referenzstrecke beträgt etwa 1 m. In diesem Messbereich liegen aber noch keine Kalibrierdaten der Linearität vor.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Einbindung der Glasfaser: wie können Streustrahlung und Einkopplung stabil gestaltet werden? Die hier vorgestellte Implementierung einer Referenzstrecke ist nur eine Möglichkeit der Umsetzung. Es bleibt abzuwarten, ob andere Ansätze erfolgreicher bzw. einfacher zu realisieren sind.

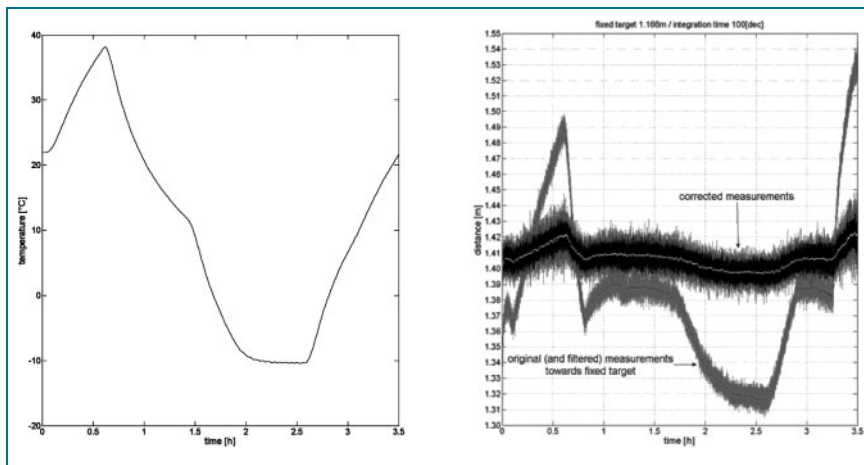


Abb. 17: Temperaturexperiment unter Einsatz einer Referenzstrecke. Deutlich ist eine Reduktion der, durch die Temperatur (links) hervorgerufenen Drift, zu erkennen (rechts). Die Reduktion erreicht ca. 80 %.

Zusammenfassung

Range Imaging (RIM) ist in den letzten Jahren immer mehr zu einer Technologie geworden, deren Einsatz in vielen Anwendungen diskutiert wird, weil die entsprechenden Sensoren mittlerweile verfügbar sind. Insbesondere in der Automobilindustrie und der Robotik wurden bereits viele Umsetzungen präsentiert. Auch für viele Applikationen, die im geodätischen Alltag eine Rolle spielen, hauptsächlich photogrammetrischer Natur (Nahbereich), werden RIM Kameras eine immer wichtigere Alternative oder Ergänzung der klassischen Sensorik. Nichtsdestotrotz ist das Verstehen um die Eigenschaften und Eigenheiten dieser Technologie nicht sehr weit verbreitet. In diesem Artikel wurden einige Besonderheiten bestehender Kamerasysteme näher untersucht und Vorschläge zur Verbesserung und Kalibrierung der Messdaten gemacht. Neben Linearitätsmessungen und der Verifizierung des Einflusses der Reflektivität des Messobjekts konnten Aussagen über Genauigkeitsbegrenzende Faktoren getroffen werden. Insbesondere Streustrahlung und Temperatureinflüsse wurden näher erläutert. Für die Eliminierung temperaturinduzierter Driften konnte eine sehr erfolgreiche Umsetzung einer geeigneten Messanordnung bzw. Zusatzausrüstung vorgestellt werden. Trotz der starken Reduktion des Einflusses der Temperatur auf die Distanzmessungen, bleibt Raum für weitere Forschungsbemühungen, um diesen Einfluss gänzlich zu eliminieren.

Es kann zusammenfassend gesagt werden, dass der vorliegende Beitrag dazu dient, das Verständnis um das RIM zu vertiefen. Das hohe Genauigkeitspotential von wenigen Millimetern und die besonderen Eigenschaften dieser Tech-

nologie, wie hohe Datenrate und räumliche Simultaneität, machen neugierig auf die weitere Entwicklung in diesem Bereich der Sensorik.

Stichworte: Range Imaging, RIM, 3D Kamera, Time-of-Flight, Kalibrierung, Temperaturdrift-Kompensation

With the upcoming range imaging cameras, new 3-D sensors with a performance never seen before are available on the market. These cameras provide a distance measurement system in each pixel and therefore produce 3-D data with up to video frame rates. This contribution will present results of research about the calibration of range imaging cameras. Special emphasis is given to the determination of the influence of the diverse parameters on the distance measurement accuracy. A successful implementation of temperature-drift compensation by means of a differential setup is presented.

Avec l'essor des «range imaging cameras», de nouveaux senseurs 3-D avec des performances encore jamais vues auparavant sont disponibles sur le marché. Ces caméras ont la capacité de mesurer la distance pour chaque pixel et de produire ainsi des coordonnées 3-D avec une fréquence d'acquisition comparable à celle d'une caméra vidéo. Cette contribution présente les résultats de recherches concernant la calibration de ce type de système de mesure. La qualification et la quantification des différents paramètres influents y sont plus particulièrement abordées. De plus, une application concrète d'un système compensant un biais du à la température est présentée et validée.

Literatur

- [1] BÜTTGEN, B.; OGGIER, T.; LEHMANN, M.; KAUFMANN, R.; 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 at ETH Zurich, ISBN 3-906467-57-0, 2005
- [2] FRITZSCHE, M.: „Einsatz von 3D Entfernungsbildkameras im Fahrzeug“, Presentation at the PMD[vision] Day – Automotive, Munich, Germany, 2007
- [3] HENNES, M.; INGENSAND, H.: „Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung“, in: Proceedings of the XIII. International Course on Engineering Surveying, 2000
- [4] KAHLMANN, T.; INGENSAND, H.: „Calibration and improvements of the high-resolution range-imaging camera SwissRanger™“, SPIE, Vol. 5665, pp. 144–155, 2005
- [5] KAHLMANN, T.; INGENSAND, H.: „Investigation of the Range-Imaging-Camera SwissRanger™“, Optical 3-D Measurement Techniques VII, Vol. I, pp. 227–236, 2005
- [6] KAHLMANN, T.; INGENSAND, H.: „METHOD AND SYSTEM FOR ACQUIRING AZIMUTH INFORMATION USING SIGNALS PROVIDED BY SATELLITES“, Patent Request PCT/CH2006/000334 – WO/2007/000067, 2006
- [7] KAHLMANN, T.; REMONDINO, F.; INGENSAND, H.: „Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger™“, in: Proceedings of the ISPRS Com. V Symposium ‚Image Engineering and Vision Metrology‘, 2006
- [8] KAHLMANN, T.; REMONDINO, F.; GUILLAUME, S.: „Range imaging technology: new developments and applications for people identification and tracking“, Videometrics VIII, Electronic Imaging, San Jose, USA, SPIE, Vol. 6491–12, 2007
- [9] KAHLMANN, T.; INGENSAND, H.: „Increased Accuracy of 3D Range Imaging Camera by Means of Calibration“, Proceedings of Optical 3-D Measurement Techniques VIII, ETH Zurich, Switzerland, ISBN 3-906467-67-8, 2007
- [10] KAHLMANN, T.: „Range Imaging Metrology: Investigation, Calibration and Development“, Dissertation No. 17392, ETH Zurich, Switzerland, in print, 2007
- [11] LANGE, R.: „3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology“, Dissertation, University of Siegen, 2000
- [12] MURE-DUBOIS, J.; HÜGLI, H.: „Time-of-Flight Imaging of Indoor Scenes with Scattering Compensation“, Proceedings of Optical 3-D Measurement Techniques VIII, ETH Zurich, Switzerland, ISBN 3-906467-67-8, 2007
- [13] NICLASS, C.; BESSE, P. A.; CHARBON, E.: „Arrays of Single Photon Avalanche Diodes in CMOS Technology: Picosecond Timing Resolution for Range Imaging Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH Zurich in Switzerland, Editors: Ingensand, Hilmar and Kahlmann, Timo, ISBN 3-906467-57-0, 2005
- [14] OGGIER, T.; LEHMANN, M.; KAUFMANN, R.; SCHWEIZER, M.; RICHTER, M.; METZLER, P.; LANG, G.; LUSTENBERGER, F.; BLANC, N.: „An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger™)“, SPIE, Vol. 5249, 2004
- [15] OGGIER, T.; BÜTTGEN, B.; LUSTENBERGER, F.; BECKER, G.; RÜGG, B.; HODAC, A.: „SwissRanger SR3000 and First Experiences based on Miniaturized 3D TOF Cameras“, Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH Zurich in Switzerland, Editors: Ingensand, Hilmar and Kahlmann, Timo, ISBN 3-906467-57-0, 2005
- [16] SEITZ, P.: „Unified analysis of the performance and physical limitations of optical range-imaging techniques“, Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH Zurich in Switzerland, Editors: Ingensand, Hilmar and Kahlmann, Timo, ISBN 3-906467-57-0, 2005
- [17] WESTFELD, P.: „Ansätze zur Kalibrierung des Range-Imaging-Sensors SR-3000 unter simultaner Verwendung von Intensitäts- und Entfernungsbildern“, Beiträge Oldenburger 3D Tage 2007, Hrsg. Th. Luhmann, Verlag Herbert Wichmann, 2007
- [18] ZYWITZA, F.; MASSEN, J.; BRUNN, M.; LANG, C.; GÖRNIC, T.: „One-to-Three-dimensional Ranging for Future Automotive Safety Systems“, Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH Zurich in Switzerland, Editors: Ingensand, Hilmar and Kahlmann, Timo, ISBN 3-906467-57-0, 2005

Anschriften der Verfasser:

T. KAHLMANN
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
 ETH Zürich, 8093 Zürich, Schweiz,
 kahlmann@range-imaging.com;
 Telefon + 41 76 33-9 92 21

H. INGENSAND
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
 ETH Zürich, 8093 Zürich, Schweiz,
 ingensand@range-imaging.com;
 Telefon + 41 44 63-3 24 85; fax 41 44 63-3 11 01