

Ansätze zur Kalibrierung des Range-Imaging-Sensors SR-3000 unter simultaner Verwendung von Intensitäts- und Entfernungsbildern

Patrick WESTFELD

Zusammenfassung

Range-Imaging-Sensoren (3D-Kameras) ermöglichen die simultane Akquisition von Intensitäts- und Entfernungsbildern prinzipiell beliebiger Objektszenen. Für jedes Pixel des Sensors wird zusätzlich zur Bildinformation die Distanz zu einem Objektpunkt gemessen. Als Ergebnis liegt eine räumlich-zeitlich aufgelöste Darstellung des Objektraums vor.

Die Bestimmung der inneren Orientierungsparameter (Kalibrierung) von Teilmesskameras ist insbesondere bei höheren Genauigkeitsanforderungen und einem instabilen optisch-mechanischen Kameraaufbau notwendig. Ferner ist die Modellierung der Sensorgeometrie von 3D-Kameras erforderlich, da der Bezug zwischen Bild- und Objektraum im Rahmen einer on-chip Berechnung der kartesischen Koordinaten über die Parameter der inneren Orientierung realisiert wird.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse einer Kalibrierung unter Verwendung von Intensitätsbildern vorgestellt, entwickelte Ansätze und erste Erkenntnisse für die Auswertung von Intensitätsbildern mit zusätzlichen Beobachtungsgleichungen für den Rangewert aufgezeigt und die simultane Verwendung von drei Beobachtungsarten

- Bildkoordinaten aus Intensitätsbildern,
- Bildkoordinaten aus Entfernungsbildern sowie
- Entfernungsinformationen zwischen korrespondierenden Bild- und Objektpunkten

zur Bestimmung der Sensorparameter diskutiert.

1 Einleitung und Motivation

Zur 3D-Abbildung von Objekten sind derzeit vor allem konventionelle geodätische Verfahren (Totalstation), multiokulare photogrammetrische Aufnahmekonfigurationen und Laserscanner im operationellen Einsatz. Totalstationen liefern hochgenaue Objektpunktkoordinaten. Aufgrund der punktuellen Messtechnik und der Notwendigkeit der Interaktion während der Aufnahme ist der Einsatz zur vollständigen Erfassung von Objektoberflächen wenig geeignet. Photogrammetrische Verfahren generieren, in Abhängigkeit der eingesetzten Sensoren, räumlich hochaufgelöste Abbildungen des Objektraums. Nachteilig sind hierbei die notwendige Aufnahmekonfiguration (Einsatz von mindestens zwei zueinander referenzierten (und synchronisierten) Kameras) sowie die komplexe Datenauswertung aufgrund spatialer und/oder temporaler Zuordnungsschritte. Laserscanner bestimmen sequentiell die 3D-Koordinaten von tausenden – jedoch unsortierten – Objektpunkten mit einer hohen Genauigkeit. Sie sind somit für die Aufnahme kinematischer Vorgänge ungeeignet.

Im Bereich der Tiefenbildsensorik sind Rangekameras (z.B. *SwissRanger 3000* (CSEM 2006, Abb. 1)) gegenwärtig mit einer Sensorgröße von ca. 25.000 Pixeln und einer Bildrate bis 50 Hz erhältlich. Die Verwendung von Modulationstechniken ermöglicht Rangekameras die zu Intensitätsbildern synchrone Akquisition von Entfernungsbildern via Erfassung der Intensität von ausgedehntem und am Objekt reflektierten Infrarotlicht. Die dadurch erhaltenen Distanzbilder weisen pro Pixel eine Entfernungsinformation zu dem zugehörigen Objektpunkt auf. Durch diese kontinuierliche volumenhafte Abtastung des Objektraumes können zeitlich hochauflösende 3D-Daten auf einem diskreten Raster – ohne die Notwendigkeit einer stereoskopischen Zuordnung – gewonnen werden. Ebenfalls vorteilhaft sind die geringen Abmessung und Anschaffungskosten. Nachteilig sind derzeit (noch) die eingeschränkte Reichweite, die geringe räumliche Auflösung sowie die Genauigkeit im Bereich bis weniger Zentimeter.



Abb. 1: SR 3000 (CSEM 2006)

Jede photogrammetrische Mess-, Teilmess- oder Amateurkamera bedarf, in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit, der sie umgebenden Umwelteinflüsse sowie der mechanischen Konstruktion, einer photogrammetrischen Kalibrierung. Bei herkömmlichen Kameras wird über das Modell der zentralperspektivischen Abbildung (Kollinearitätsgleichungen) unter Verwendung der Orientierungsparameter und (korrigierten) Bildkoordinaten der Bezug zwischen Bild- und Objektraum hergestellt. Ein ideales Modell der Zentralprojektion wird ebenfalls für die on-chip Berechnung der kartesischen Koordinaten bei 3D-Kameras unterstellt (Kapitel 2.2). Abweichungen von diesem Idealmodell sind somit auch bei diesem Sensor durch geeignete Kalibrieransätze zu verifizieren und gegebenenfalls zu korrigieren.

Der Einsatz von distanzmessenden Kameras im Bereich der 3D-Datenakquisition ist vielseitig und derzeit nur durch die genannten Nachteile in seinem Umfang beschränkt. Mögliche Anwendungsgebiete existieren, besonders aufgrund der schnellen Akquisition von 3D-Daten, in den Bereichen Roboterüberwachung (KAHLMANN et al. 2006) sowie -navigation (GUDMUNDSSON 2006), Automotive (GOKTURK & RAFII 2005) und Human Machine Interaction (berührungslose Computersteuerung). Darüber hinaus können Tiefenbildsensoren durch ihren mono-sensoriellen Charakter einen wertvollen Beitrag auf dem Gebiet der (menschliche) 3D-Bewegungsanalysen (z.B. Verhaltensanalysen) leisten.

2 Systemspezifikation

2.1 Messprinzip

Die distanzmessende Kamera *SwissRanger 3000* enthält einen 176×144 Pixel CMOS-Bildsensor mit einem zusätzlichen CCD-Element pro Pixel und stellt somit für jedes Pixel zwei Speicherplätze zur Verfügung. Diese Lock-in Pixelstruktur vereint die Vorteile beider Technologien (vgl. BLANC 2001): Die CCD-Technik weist ein geringes Messrauschen und eine hohe Chipsensitivität auf. Die monolithische CMOS-Struktur erlaubt das separate Ansprechen und Auslesen eines jeden Pixels sowie die Signal- als auch Bildverarbeitung

direkte auf dem Chip. Die zeitliche Auflösung des Systems wird primär über die Integrationszeit und sekundär durch die eingesetzte Soft- und Hardwarelösung festgelegt. Der Hersteller gibt hierfür maximal 50 Tiefenbilder pro Sekunde an.

Der maximal eindeutige Messbereich ist abhängig von der ausgestrahlten Energie der Dioden sowie der Frequenz des Modulationssignals und beträgt für den SR-3000 im praktikablen Bereich derzeit max. 7,5 m. Die Genauigkeit der Streckenmessung wird hauptsächlich durch die Entfernung und die Reflektionseigenschaften des aufzunehmenden Objektes beeinflusst und befindet sich im Bereich weniger Millimeter bis Zentimeter (CSEM 2006).

Die Entfernung zwischen jedem Pixel und dem zugehörigen Objektpunkt wird über die Messung der Phasendifferenz zwischen dem ausgesandten und durch das Objekt zurück reflektieren Signal bestimmt (JOECKEL & STOBER 1995).

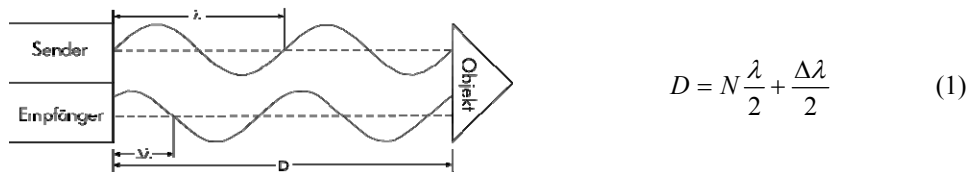
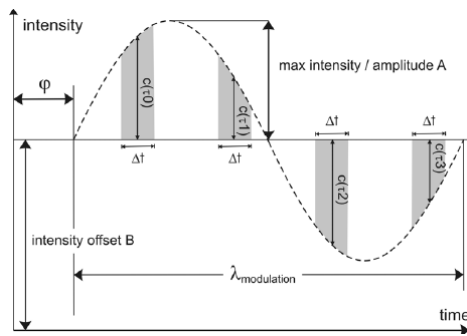


Abb. 2: Prinzip Phasenvergleichsverfahren (JOECKEL & STOBER 1995)

Der Diodenarray strahlt kontinuierlich Licht einer Trägerwellenlänge im Bereich des NIR aus. Um eine Maßeinheit für die Streckenmessung festlegen zu können, wird dem Träger-signal ein sinusförmiges Signal mit einer vorgegebenen Frequenz aufmoduliert. Die ausgesandte Wellenfront wird an der Objektoberfläche innerhalb des Gesichtsfeldes der Kamera reflektiert und somit bei diffuser Reflektion teilweise zur Sende-/Empfängereinheit zurückgestrahlt. Im Vergleich zu dem ausgesandten Signal trifft die eintreffende Welle um ein Wellenreststück $\Delta\lambda_{mod}$ versetzt in der Empfangseinheit ein. Der SR-3000 operiert lediglich mit einem Wellenlängenmaßstab; die durchlaufene doppelte Messstrecke entspricht demzufolge lediglich dem Wellenreststück (vgl. (1), Vielfache der Modulationswellenlänge $N=0$).

In der Praxis wird das Signal vollständig durch Abtastung rekonstruiert (Messung der Intensität). Hierfür sind mindestens drei Abtastpunkte pro Periode notwendig, um die drei Parameter Phasenwinkel φ , Amplitude A und Offset B (Intensität) zu ermitteln. Aufgrund der geringeren Störanfälligkeit werden in der Regel vier gleichabständige Abtastpunkte verwendet (Abb. 3). Nach (LANGE 2000) ergibt eine diskrete Fouriertransformation den Formelsatz (2) zur Berechnung der Unbekannten.

Die Phasenverschiebung des reflektierten Signals, hervorgerufen durch die unterschiedlich entfernten Punkte des Objektes, muss durch jedes Pixel der CMOS/CCD-Matrix gemessen werden können. Dies bedeutet, dass jedes der 25.344 Pixel ein Phasenmesssystem enthält (Demodulationspixel, Lock-in-Pixel), um die eintreffende Welle zu demodulieren.



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

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \left([c(\tau_0) - c(\tau_2)]^2 + [c(\tau_1) - c(\tau_3)]^2 \right)} \quad (2)$$

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{2}$$

Abb. 3: Messprinzip Phasendifferenzverfahren (KAHLMANN et al. 2006)

2.2 Koordinatenberechnung

Die Transformation von Bildkoordinaten x', y' und gemessener Distanz D in kartesische Objektpunktkoordinaten $\underline{X}(X, Y, Z)$ geschieht on-chip. Entsprechend dem geometrischen Modell der Abb. 4 wird eine ideale Zentralprojektion mit folgenden Annahmen unterstellt:

- Der Bildhauptpunkt befindet sich im Sensormittelpunkt.
- Der Koordinatenursprung befindet sich im Sensormittelpunkt.
- Der Brennweitenvektor steht senkrecht auf dem Bildsensor.

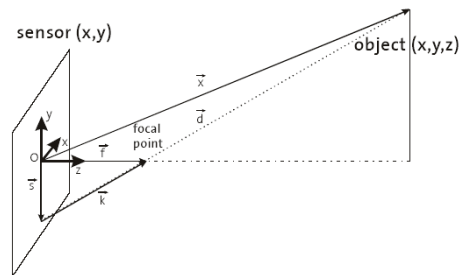


Abb. 4: Zusammenhang zw. Bild- und Objektraum (KAHLMANN et al. 2006)

Diese Annahmen müssen folglich durch adäquate Kalibrierstrategien kontrolliert und gegebenenfalls Korrekturen im mathematischen Modell berücksichtigt werden.

Über den vom Bildhauptpunkt zum Projektionszentrum aufgespannten Brennweitenvektor \underline{f} sowie dem Bildpunktvektor \underline{s} kann der durch das Projektionszentrum verlaufende Strahlengang zwischen jedem Pixel und dem zugehörigen Objektpunkt über \underline{k} quantifiziert werden. Nach einer Verschiebung in den Ursprung des Koordinatensystems (Sensormitte) ergibt sich der Objektpunktvektor:

$$\underline{X} = \underline{d} + \underline{s} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -x' \\ -y' \\ f \end{pmatrix} \frac{D}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + f^2}}$$

mit x', y' : Bildkoordinaten
 f : Kamerakonstante
 D : Gemessene Distanz (3)

3 Photogrammetrische Kalibrierung des *SwissRanger 3000*

3.1 Kalibrierung unter Verwendung von Intensitätsbildern

Die Bestimmung der inneren Orientierungsparameter und der Objektivverzeichnungen wurde in einem ersten Schritt durch die Auswertung der NIR-Intensitätsbilder realisiert. Die eingeschränkte räumliche Auflösung und das, im Vergleich zu konventionellen Digitalkameras, erhöhte Messrauschen der Intensitätsbilder verlangten eine speziell für die 3D-Kamera konzipierte Kalibrierplatte. Verwendung fand ein 3D-Kalibrierfeld mit schwarzen, kreisförmigen und uncodierte Zielmarken in einer Größe von zwei Zentimetern (Abb. 5).

Über die Messung von Bild- und Objektkoordinaten dieser Zielmarken kann durch Umkehrung der photogrammetrischen Punktbestimmung auf das Kameramodell geschlossen werden (räumlicher Rückwärtsschnitt im Bündel). Notwendig sind hierfür mehrere formatfüllende Aufnahmen des Passpunktfeldes (inklusive Rotationsstrategien zur Vermeidung von Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung) mit einer hinreichenden Strahlenschnittgeometrie. Entgegen der üblichen Vorgehensweise wurde nicht die Kamera, sondern das Kalibrierfeld geschwenkt, um den äußerst erschütterungsempfindlichen Kameraaufbau nicht während der Messung zu variieren.

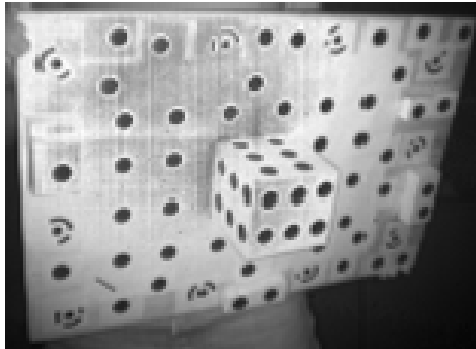


Abb. 5: NIR-Intensitätsbild des verwendeten Kalibrierfeldes

Tabelle 1: Ergebnisse einer Kalibrierung unter Verwendung von Intensitätsbildern

Parameter	Wert	$\bar{\sigma}_0$
f [mm]	7,899	0,00537
x'_H [mm]	0,191	0,01579
y'_H [mm]	0,697	0,01157
A1	0,00250	0,00013
A2	4,86E-5	9,44E-6
A3	fix	fix
B1	0,00018	6,26E-5
B2	0,00018	5,54E-5
C1	0,00039	0,00018
C2	0,00087	0,00017

Die Auswertung erfolgte (semi-) automatisch. Aufgrund des eingeschränkten Sensorformates war eine automatische Bestimmung der Bildpunktkoordinaten über codierte Zielmarken und anschließende Zuordnung mit der Messsoftware *AICON 3D Studio* nicht möglich. Eine interaktive Punktzuordnung und nachfolgende Messung mittels Schwerpunkt- bzw. Ellipsenoperator sowie Definition von Maßstäben im Bild ermöglichte dennoch eine genau und zuverlässige Lösung des Bündels mit Zusatzparametern der Kalibrierung (vgl. Ergebnisse aus Tabelle 1). Die erreichte Bildmessgenauigkeit lag im Bereich von $2,0 \mu\text{m}$ (1/20 Pixel); die a posteriori Standardabweichung der Bündelblockausgleichung bei $1,5 \mu\text{m}$ (1/30 Pixel)

Auffallend bei der Ergebnisanalyse war die zeitlich starke Variation der Hauptpunktlage aufgrund einer instabilen Kameraoptik. Tendenziell liegt der Bildhauptpunkt stets im ersten Quadranten des Sensors. Innerhalb weniger Tage verschob sich dieser in einer Größenordnung von ca. $200\ \mu\text{m}$ in beiden Koordinatenrichtungen (vgl. Abb. 6a.). Weiterhin ist vor allem der radial-symmetrische Anteil der Objektivverzeichnung signifikant (μm -Bereich; vgl. Tabelle 1).

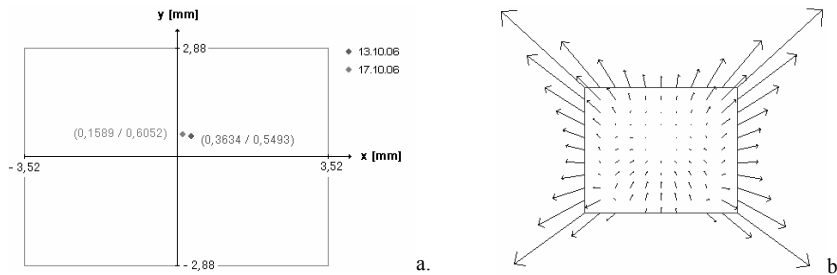


Abb. 6: Variation der Hauptpunktlage (a.) und schematische Darstellung der Gesamtverzeichnung (b.) (HEMPEL 2007)

3.2 Kalibrierung unter Verwendung zusätzlicher Beobachtungsarten

Aufgrund der Natur der Daten einer distanzmessenden Kamera erscheint es wünschenswert, die zusätzliche Entfernungsinformation sowie die Bestimmung von genauen Passpunkt-bildkoordinaten aus Entfernungsbildern in etablierte Kalibrierstrategien (Überblick MAAS 1997) zu integrieren. Die Kombination von Bildkoordinaten, gemessen in Intensitäts- und Entfernungsbildern, und direkter Rangebeobachtung in einem ausgleichenden Modell (räumlicher Rückwärtsschnitt von mehreren Standpunkten) ist somit das Hauptanliegen dieser Arbeit.

Beobachtung (1): Bildkoordinaten aus Intensitätsbildern

Die Messung der Bildkoordinaten im Intensitätsbild der Kamera vollzieht sich als konventionelle Bildpunktmessung. Die Bildkoordinaten werden, in Abhängigkeit der Zielmarkengröße im Bildraum, mittels Schwerpunkt- oder Ellipsenoperator gemessen. Als Ergebnis liegen Passpunktkoordinaten im Subpixelbereich vor. Diese gehen als erste Beobachtungsart in die Ausgleichung ein.

Beobachtung (2): Bildkoordinaten aus Entfernungsbildern

Um Subpixelkoordinaten von Passpunkten aus den akquirierten Entfernungsbildern ableiten zu können, werden neben ebenen kreisförmigen Zielmarken zusätzlich geometrische Primitive (z.B. Pyramide, Kegel, Kugel; vgl. Abb. 7) auf dem Kalibrierfeld integriert. Die kartesischen Objektkoordinaten sind als Funktionen der Orientierungsparameter zu sehen (Kapitel 2.2). Demzufolge sind sie für eine Modellierung der Primitive nicht zu verwenden.

Anstelle dessen gehen die Bildkoordinaten und der jeweils skalierte Rangewert in die best-fit Ausgleichung ein. Die Einpassung eines geeigneten Modells in die Punktwolke und

Ermittlung der Parameter der jeweiligen Abbildungsvorschrift erlauben die Subpixelbestimmung von Pyramiden- bzw. Kegelspitzen sowie Kugelmittelpunkten von Passpunkten aus den Entfernungsbildern der *SR-3000*.

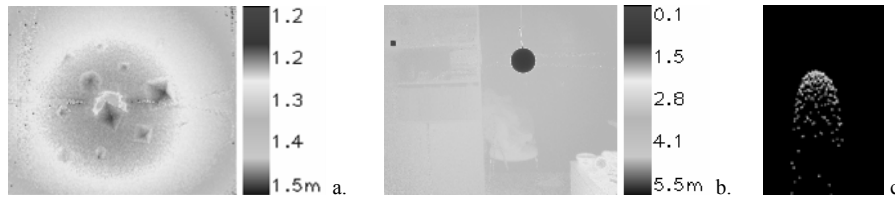


Abb. 7: Farbcodierte Entfernungsbilder geometrischer Primitive (links) und 3D-Darstellung einer Kugel (rechts)

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnte eine vollständige Modellierung der Primitive noch nicht umgesetzt werden. Eine Abschätzung der Güte der zu erwartenden Subpixelbildkoordinaten ist somit ebenfalls noch nicht möglich.

Beobachtung (3): Entfernung zwischen Bild- und Objektpunkten

Die dritte Beobachtungsart stellt die Entfernungen D zwischen Bild- und Objektpunkt dar. Formuliert wird diese über eine Streckengleichung (3D-Pythagoras aus dem Objektpunkt P und dem Projektionszentrum P_0) zu:

$$D = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - X + Z_0)^2} \tag{4}$$

Mit Beobachtungsgleichung (4) ist eine direkte Integration des Rangwertes als Beobachtungsgröße in dem aufzustellenden Ausgleichsmodell und folglich eine Aussage über die a priori Standardabweichung der Entfernungsmessungen möglich. Im Gegensatz zu Beobachtung (1) fällt in diesem Fall die Gewichtung um vier Größenordnungen schwächer aus (Annahme: 1 cm a priori Streckenmessgenauigkeit; 1 μ m a priori Bildmessgenauigkeit).

3.3 Ergebnisse einer simultanen Kalibrierung

Im Folgenden werden erste Ergebnisse der Kalibrierung der distanzmessenden Kamera *SwissRanger 3000* präsentiert. Die Bestimmung der Orientierungsparameter basiert auf einem räumlichen Rückwärtsschnitt von mehreren Standpunkten, welche in einem Ausgleichsmodell unter Integration der in Kapitel 3.2 eingeführten zusätzlichen Beobachtungen berechnet wurden.

Die Entfernungsmessung unterliegt zahlreichen inneren Fehlereinflüssen (KAHLMANN et al. 2006). Insbesondere Schwankungen bei der Modulation des Lichtimpulses führen zu extremen Unsicherheiten. Aus diesem Grund sind die ermittelten Distanzen mit einer im Vorfeld der photogrammetrischen Kalibrierung aufgestellten 4D-Korrekturmatrix (x', y' , mittlere Entfernung, Integrationszeit) zu verbessern. Trotz dieser Distanzkalibrierung traten Abweichungen zwischen gemessener und tatsächlicher Distanz im Bereich bis weniger Dezimeter auf, welche mit den unterschiedlichen Reflektionseigenschaften, in diesem Fall

die Farbe der Objekte, erklärt werden können. Abb. 8 zeigt farbcodierte Aufnahmen der verwendeten Kalibrierplatte.

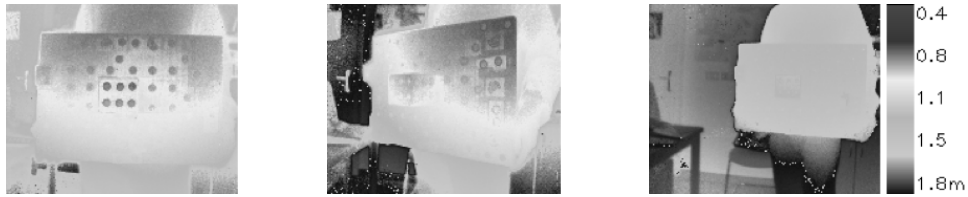


Abb. 8: Farbcodierte Entfernungsbilder einer Kalibrierplatte: Abweichungen der Distanzmessung aufgrund unterschiedlicher Objektfarbe im Bereich bis 2 dm

Deutlich sichtbar ist eine Variation der Streckenmessung, hervorgerufen durch unterschiedliche Intensitäten von Zielmarken (schwarz) und Hintergrund (weiß), in Abhängigkeit des Einfallswinkels sowie der Entfernung. Da schwarze Körper nahes Infrarotlicht am stärksten absorbieren, kommt lediglich ein geringer Anteil der ausgesendeten Strahlung zurück zum Empfänger. Dementsprechend ist eine korrekte Einpassung einer idealen Sinuskurve nicht möglich und führt zu einer ungenauen Rekonstruktion des empfangenen Signals. Entsprechende Grauwertwertkorrekturen konnten bis dato noch nicht angebracht werden.

Tabelle 2: Genauigkeiten und Soll-Ist-Abweichungen der Kalibrierung

	$\hat{\sigma}_0$ [μm]	$\hat{\sigma}_{IOR}$ [mm]	$\hat{\sigma}_{P_0} / \hat{\Delta P}_0$ [mm]	$\hat{\sigma}_R / \hat{\Delta R}$ [qt] / [rad]	σ_D [cm]	$\hat{\sigma}_D / \hat{\Delta D}$ [mm] / [cm]
$n P_0$ mit Beobachtung (1)	≤ 3.0	$f \pm 0.009$ $x_H \pm 0.005$ $y_H \pm 0.005$	≤ 0.3 ≤ 1.0	$\leq 4.0\text{E-}4$ $\leq 1.0\text{E-}3$		
$n P_0$ mit Beobachtung (1), (3)	≤ 1000.0	$f \pm 0.049$ $x_H \pm 0.221$ $y_H \pm 0.140$	≤ 20.0 ≤ 200.0	≤ 0.02 ≤ 0.05	≤ 10.0	≤ 5.0 ≤ 10.0
$1 P_0$ mit Beobachtung (1), (3)	≤ 6.0	$f \pm 0.005$ $x_H \pm 0.047$ $y_H \pm 0.036$	≤ 1.5 ≤ 10.0	≤ 0.002 ≤ 0.01	≤ 0.1	≤ 0.3 ≤ 0.1

Dennoch sind Tabelle 2 erste Ergebnisse einer simultanen Kalibrierung zu entnehmen, wobei die angestrebte Beobachtungskonfiguration (gemeinsame Ausgleichung von (1) und (3)) keine zufriedenstellenden Resultate lieferte. Die Streckenmessungen eines jeden Standpunktes ist um den zu ermittelnden Grauwertwertkorrekturterm verfälscht. Dies äußert sich in einer ungenauen Modellbestimmung (a posteriori Standardabweichung $\hat{\sigma}_0$ bis 1 mm). Die implementierte Ausgleichung konvergiert zwar, jedoch sind nach Anbringen der Verbesserung sowohl die Projektionszentren als auch die Rotationswinkel um bis zu 20 cm verschoben ($\hat{\Delta P}_0$) bzw. einige Grad entgegen der Sollposition verdreht ($\hat{\Delta R}$).

Um die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Ansatzes gleichwohl aufzuzeigen zu können zeigt Tabelle 2, Zeile 3 die Ergebnisse einer simultanen Kalibrierung mit einer Aufnahme (einfacher räumlicher Rückwärtsschnitt) unter Einbezug der Beobachtungsarten (1) und (3). Für diesen Versuch wurden nur Rangebeobachtungen mit einer geringen Diskrepanz zwischen Soll und Ist zur Formulierung der Beobachtungsgleichung (3) herangezogen. Mit geringer 1/10 Pixel a posteriori Standardabweichung des Gesamtmodells und der Tabelle 2 zu entnehmenden a posteriori Genauigkeiten der inneren Orientierungsparameter ($\hat{\sigma}_{IOR}$) zeigt dieser Versuch das Potential der vorgestellten simultanen Kalibrierung. Dennoch ist auch hier die Notwendigkeit zuverlässiger Streckenmessungen zu erkennen, da sowohl Hauptpunktlage als auch Projektionszentrum und Rotationswinkel leichte Unsicherheiten aufweisen. Weiterhin fällt die geschätzte a priori Genauigkeit der Streckenmessung σ_D mit 1 mm zu gut aus (Vergleich mit a posteriori Genauigkeit, Photonenrauschen), was zur nachträglichen Prüfung der in Kapitel 2 aufgestellten Gewichtung führt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von 3D-Kameradaten in der Photogrammetrie bedingt die Kalibrierung des Sensors. Da der Bezug zwischen Bild- und Objektraum über die Parameter der inneren Orientierung herzustellen ist, kann durch die bekannte innere Geometrie der Kamera die Genauigkeit der 3D-Koordinatenberechnung deutlich gesteigert und somit das Einsatzpotential dieser neuartigen Sensorik erhöht werden. Das Ziel dieses Beitrages war die Entwicklung von Ansätzen zur Kalibrierung einer Tiefenbildkamera unter simultaner Verwendung von Intensitäts- und Entfernungsbildern.

Die Arbeiten haben gezeigt, dass eine interaktive photogrammetrische Kalibrierung auf Basis der Infrarotintensitätsbilder mit guter Genauigkeit möglich ist. Die Kalibrierung unter Verwendung von Streckenbeobachtungen ist prinzipiell möglich, setzt allerdings genaue und zuverlässige Entfernungsinformationen voraus. Eine photogrammetrische Kalibrierung unter Verwendung aller drei vorgestellten Beobachtungsarten konnte zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht realisiert werden.

Ausblickend ist zunächst der Einfluss der Objektfarbe auf die Distanzmessung zu untersuchen, gegebenenfalls zu modellieren und zu korrigieren. Im Anschluss steht die Bestimmung von Subpixelkoordinaten aus Entfernungsbildern im Interesse der Arbeit, um abschließend ein Modell unter Einbezug aller vorgestellten Beobachtungsarten aufstellen zu können.

Des Weiteren ist die a priori geschätzte Gewichtung kritisch zu beurteilen. Bei der jetzigen Annahme fällt die erhaltene a priori Genauigkeit der Streckenmessung deutlich zu gut aus. Ein möglicher Ansatz wäre die Übertragung der Streckenmessgenauigkeit in die Bildebene, was in einem stärkeren Einfluss der (vergleichsweise ungenaueren) Tiefenmessung im Gesamtsystem und folglich schlechteren a priori Streckenmessgenauigkeit (bei schlechterer a posteriori Gesamtstandardabweichung) resultiert. Eine iterative Aufstellung der Gewichte auf Basis einer Varianzkomponentenschätzung ist ebenfalls denkbar.

5 Literatur

- Blanc, N. (2001): *CCD versus CMOS - has CCD imaging come to an end?* Photogrammetric Week 2001. pp. 131-137. Wichmann Verlag. Heidelberg. Germany.
- CSEM (2006): *SwissRanger SR-3000. Miniature 3D time-of-flight range camera.* Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique. <http://www.swissranger.ch/>. Mai 2006.
- Gokturk, B. & Rafii, A. (2005): *An occupant classification system - Eigen shapes or knowledge-based features.* IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Workshops. 2005. p. 57.
- Gudmundsson, S. A. (2006): *Robot Vision Applications using the CSEM SwissRanger Camera.* Master's thesis. Informatics and Mathematical Modelling. Technical University of Denmark. Copenhagen. Denmark.
- Hempel, M. (2007): *Validierung der Genauigkeit und des Einsatzpotentials einer distanzmessenden Kamera.* Unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. Professur für Photogrammetrie. Dresden. Deutschland.
- Joeckel, R. & Stober, M. (1995): *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung.* Verlag Konrad Wittwer. Stuttgart. Deutschland.
- Kahlmann, T., Remondino, F. & Ingensand, H. (2006): *Calibration for Increased Accuracy of the Range Imaging Camera SwissRanger.* International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5, pp. 136-141
- Lange, R. (2000): *3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology.* PhD-Thesis. Department of Electrical Engineering and Computer Science at University of Siegen. Siegen. Germany
- Maas, H.-G. (1997): *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie.* Habilitationsschrift. Zürich. Schweiz.