

Integrierte Bündelblockausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten

Danilo Schneider
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Technische Universität Dresden
01069 Dresden
danilo.schneider@tu-dresden.de

1 Einleitung

Die kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten wird heutzutage von mehreren Softwarepaketen unterstützt, da die Kombination dreidimensionaler Punktwolken und hochauflösender Bilder aufgrund der weitgehend komplementären Natur der Daten viel versprechende Möglichkeiten bietet. Aus diesem Grunde wird von mehreren Herstellern terrestrischer Laserscanner eine digitale Kamera auch hardwareseitig im Laserscannersystem integriert (Mulsow et.al., 2004). Meistens stellt dabei der Laserscanner die Hauptkomponente dar, während die Bildinformationen nur sekundär zur nachträglichen Kolorierung der 3D-Punktwolke, zur Texturierung einer Oberfläche oder zur besseren Orientierung innerhalb der Laserscanner-Daten in einer interaktiven Auswertumgebung dienen. Weiterhin wurde in bisherigen Ansätzen die Verwendung von Bildern zur automatischen Registrierung von Laserscannerdaten vorgeschlagen (Al-Manasir & Fraser, 2006; Dold & Brenner, 2006), sowie die automatische Generierung von Orthobildern auf Grundlage von Bild- und Entfernungsdaten beschrieben. Eine kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscanner und photogrammetrischer Bilddaten bietet jedoch ein weitaus größeres Potenzial (Jansa et.al., 2004; Wendt & Heipke, 2006). Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften der beiden Sensortypen im Rahmen einer gemeinsamen Ausgleichung können sich Laserscanner und Kamera bei der Bestimmung von Objektgeometrien und bei der Kalibrierung gegenseitig stützen (Ullrich, et.al., 2003). Besonders viel versprechend ist die Verwendung hochauflösender Kameras in einem kombinierten System, da damit höhere Genauigkeiten senkrecht zur

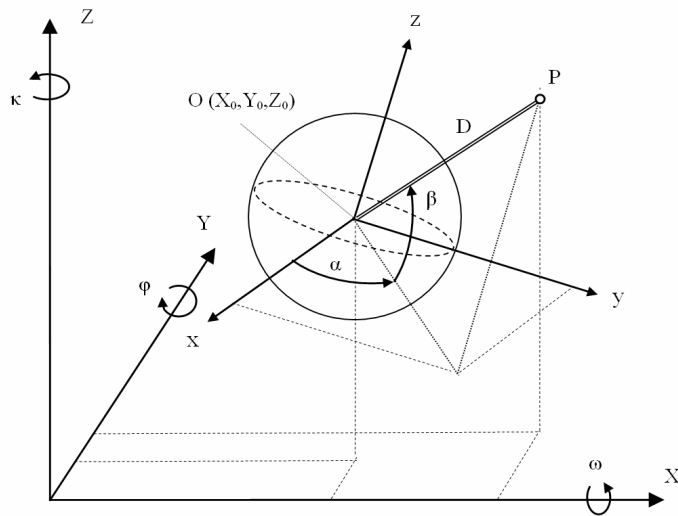
Aufnahmerichtung zu erwarten sind, als die Winkelmessgenauigkeit des Laserscanners bietet. Angepasst an die Funktionsweise der meisten Scanner, die ein horizontales Gesichtsfeld von 360° abdecken, bietet sich insbesondere die Nutzung von Panoramakameras an. Panoramakameras besitzen oft eine hohe Auflösung und damit ein großes Genauigkeitspotenzial bei der Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten (Luhmann & Tecklenburg, 2004; Schneider & Maas, 2005) Basierend auf den geometrischen Modellen von Laserscanner und Kamera bzw. Panoramakamera (Schneider & Maas, 2006) wurde eine kombinierte Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Ausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bild- bzw. Panoramabilddaten implementiert. Da es sich dabei um verschiedene Typen von Beobachtungen handelt, ist es notwendig, den unterschiedlichen Beobachtungen bei der gemeinsamen Ausgleichung unterschiedliche Gewichte zuzuordnen. Dies kann entweder in Form fester Werte erfolgen oder die Gewichte werden im Zuge der Ausgleichung durch eine Varianzkomponentenschätzung automatisch bestimmt, wodurch die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden und zudem oft eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht wird (Klein, 2001; Sieg & Hirsch, 2000). In diesem Beitrag wird die Implementierung der kombinierten Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung vorgestellt und anhand mehrerer Laserscanneraufnahmen, Bilder und Panoramabilder analysiert.

2 Geometrische Modelle

Vorraussetzung für die gemeinsame Auswertung verschiedener Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner) ist die Kenntnis der zugrunde liegenden geometrischen Modelle sowie deren mathematische Beschreibung. Dies ermöglicht zum einen die Berechnung von Objektinformationen (z.B. Koordinaten von Objektpunkten) unter Nutzung der verschiedenen Messungen (Bildkoordinaten, Strecke, Winkel) und zum anderen erlaubt es die Kalibrierung der Messgeräte sofern die Modelle entsprechende Zusatzparameter beinhalten. Kameras mit Flächensensoren entsprechen dem bekannten Modell der Zentralperspektive. Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben. Üblicherweise werden diese Abbildungsgleichungen durch Korrekturterme erweitert, die zusätzliche Parameter, u.a. zur Korrektur der Objektverzerrung, enthalten. Um die Daten unterschiedlicher Aufnahmegereäte (Laserscanner, Panoramakamera, etc.) in einer gemeinsamen Bündelblockausgleichung verarbeiten zu können, ist die Definition geometrischer Modelle notwendig.

2.1 Terrestrischer Laserscanner

Ursprüngliche Messdaten terrestrischer Laserscanner sind sphärische Koordinaten, d.h. Strecke, Horizontal- und Vertikalwinkel. Entsprechend lässt sich das geometrische Modell durch die Umrechnung kartesischer in sphärische Koordinaten ausdrücken (Gleichung 1). Durch die Anwendung von Gleichung 2 wird das lokale Laserscanner-Koordinatensystem in das gemeinsame übergeordnete System integriert.



$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \Delta D$$

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x} + \Delta \alpha \quad (1)$$

$$\beta = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta \beta$$

$$x = R^{-1}(X - X_0) \quad (2)$$

Abb. 1: Geometrisches Modell Laserscanner

Ebenso wie beim Kameramodell können beim geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner Zusatzparameter in den Korrekturtermen ΔD , $\Delta \alpha$ und $\Delta \beta$ berücksichtigt werden, die individuelle Eigenschaften der jeweiligen Scannertypen erfassen und deren Kalibrierung erlauben (Schneider, 2009):

$$\Delta D = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 e^{-a_4 D} \sin\left(\left(D - a_5\right) \frac{2\pi}{a_6}\right) \quad (3)$$

$$\Delta \alpha = \frac{b_Z}{\cos \beta} + b_K \tan \beta + b_{T_1} \sin(\alpha + b_{T_2}) + \arcsin \frac{b_E}{D_a} \quad (4)$$

$$\Delta\beta = c_H + c_{T_1} \sin(\beta + c_{T_2}) + \arcsin \frac{c_E}{D_a} \quad (5)$$

mit:

- a_0 konstanter Anteil der Nullpunktkorrektur
- a_1 Maßstab (u.a. Frequenzkorrektur)
- a_2 quadratischer Anteil der Nullpunktkorrektur
- a_3, a_4, a_5 zyklische Abweichungen
- a_6 Dämpfungsparameter
- b_Z Zielachsabweichung
- b_K Kippachsabweichung
- b_{T1}, b_{T2} Teilkreisexzentrizität horizontal
- b_E Zielachsexzentrizität (bezüglich der Stehachse)
- c_H Höhenindexabweichung
- c_{T1}, c_{T2} Teilkreisexzentrizität vertikal
- c_E Zielachsexzentrizität (bezüglich der Kippachse)

Bei der Kalibrierung terrestrischer Laserscanner besteht oft die Schwierigkeit, dass bereits durch den Hersteller im Scanner geometrische Korrekturen angebracht werden und das zu Grunde liegende geometrische Modell nicht bekannt ist. Entsprechend lassen sich oft keine signifikanten systematischen Effekte in den Residuen der Beobachtungen erkennen.

2.2 Digitale Panoramakamera

Panoramakameras erlauben die Aufnahme sehr großer horizontaler Öffnungswinkel (bis zu 360°) in einem Bild, was besonders für die Aufnahme von Räumen oder komplexen Anlagen von Vorteil ist. Technisch wird dies meist durch eine rotierende Sensorzeile realisiert. Panoramakameras bieten ein hohes Auflösungs- und damit auch Genauigkeitspotenzial. Die Panoramaabbildung lässt sich jedoch nur noch in einer Bildkoordinatenrichtung mit dem Modell der Zentralperspektive beschreiben. Geometrisch lässt sich der Abbildungsvorgang durch die Projektion auf einen Zylindermantel (Abb. 2) darstellen (Amiri Parian, 2007; Luhmann & Tecklenburg, 2004). Die Abbildungsgleichungen für zentralperspektivische und panoramische Bilder lauten wie folgt:

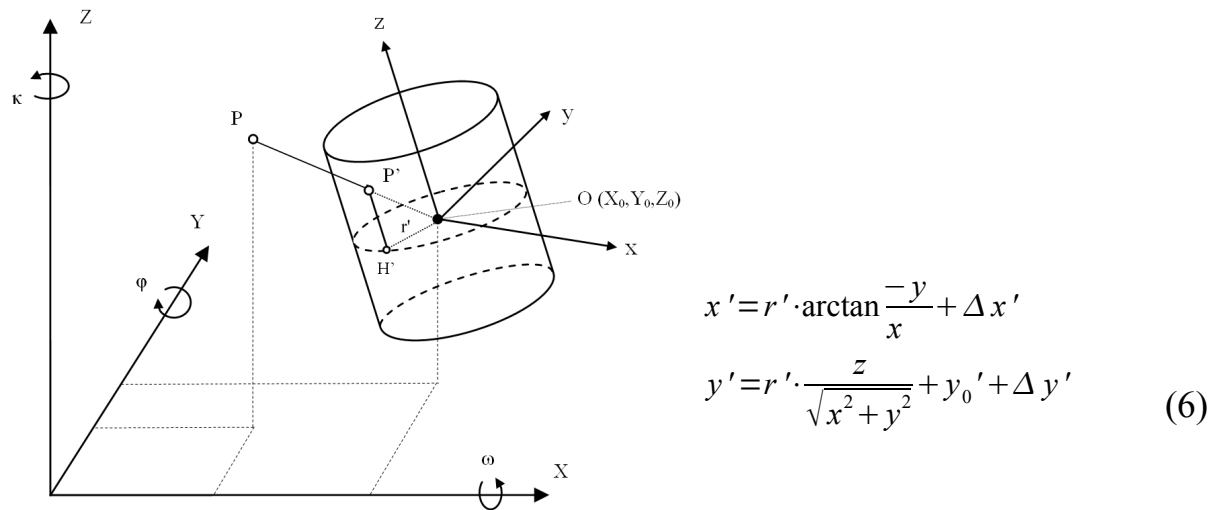


Abb. 2: Geometrisches Modell Panoramakamera

Die Additionsterme $\Delta x'$ und $\Delta y'$ enthalten Zusatzparameter zur Korrektur systematischer Effekte, die durch die physikalischen Eigenschaften des Aufnahmegerätes hervorgerufen werden (Schneider & Maas 2006).

2.3 Kamera mit Fisheye-Objektiv

Terrestrische Laserscanner sind meist in der Lage große Winkelbereiche ihrer Umgebung zu erfassen (z.B. bis zu 360° horizontal, 150° vertikal). Um den gleichen Bereich mit zentralperspektiven Bildern zu erfassen, werden zahlreiche Aufnahmen benötigt. Deshalb bietet sich die Verwendung eines Fisheye-Objektives mit einem Öffnungswinkel von bis zu 180° an. Die Projektionsgeometrie von Kameras, die mit einem Fisheye-Objektiv ausgestattet sind, weicht vom Modell der Zentralperspektive ab. Diese Abweichung lässt sich nicht durch Zusatzparameter beschreiben sondern bedarf der Definition eines eigenen geometrischen Modells (Schwalbe, 2005).

Es existieren mehrere Fisheye-Projektionsgeometrien: Equi-distante, equi-solid-angle und orthographische Projektion (Ray, 1994; Backstein & Pajdla, 2002; Abraham & Förstner, 2005). Das geometrische Konzept aller Projektionen basiert auf der Abhängigkeit des Bildradius vom Einfallswinkel des Abbildungsstrahles (Schneider et. al., 2009).

3 Stochastisches Modell

Bei einer kombinierten Bündelblockausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten werden unterschiedliche Typen von Beobachtungen gleichzeitig verwendet, um die unbekannt Parameter zu schätzen. Aus diesen Gründen ist es notwendig, den Beobachtungsgruppen (Bildkoordinaten in zentralperspektivischen und panoramischen Bilddaten, Distanzmessung und Winkelmessung des Laserscanners) angemessene Gewichte zuzuordnen. Die Definition von Gewichten kann dabei in Form fester Werte erfolgen, wenn a priori Standardabweichungen der Messungen, z.B. aus Herstellerangaben, oder Erfahrungswerte vorliegen. Dabei wird jedoch der Informationsgehalt der Beobachtungen nicht voll ausgeschöpft. Durch das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung ist es möglich, optimale Gewichte für die einzelnen Beobachtungsgruppen sowie die Standardabweichungen der Beobachtungen im Zuge der eigentlichen Bündelblockausgleichung zu schätzen (Koch, 2004). Dadurch wird zum einen eine Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Messungen möglich und zum anderen wird meist eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht, da die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden (Klein, 2001; Sieg & Hirsch, 2000). Werden die Horizontal- und die Vertikalwinkelmessung des Laserscanners, sowie die horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten der Panoramakamera in verschiedene Beobachtungsgruppen aufgeteilt, lassen sich zusätzlich Aussagen über die Charakteristik der Messgeräte treffen. Darüber hinaus können auch Messgeräte mit unterschiedlichen Genauigkeiten berücksichtigt werden.

4 Integrierte Bündelblockausgleichung

Als integrierten Bündelblockausgleichung wird die gleichzeitige rechnerische Einpassung aller Aufnahmen (Bilder, Panoramas, Punktwolken) der beteiligten Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner) bezeichnet. Die Berechnung erfolgt unter der Forderung, dass sich alle Strahlen zwischen Objektpunkt und Messgerät optimal in einem Objektpunkt schneiden. Als Beobachtungen gehen die sphärischen Koordinaten von mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkten und die mit einer Kamera bzw. Panoramakamera gemessenen Bildkoordinaten in eine gemeinsame Koeffizientenmatrix ein. Die Berechnung erfolgt als Ausgleichung nach kleinsten Quadraten (MkQ-Schätzung), das Resultat sind die Koordinaten der Objektpunkte, die Position und Orientierung aller beteiligten Aufnahmen, die Kalibrierparameter der Aufnahmegeräte und statistische Größen zur Beurteilung der Korrelationen und Genauigkeiten.

5 Berechnungsbeispiele

5.1 Laserscanner und Panoramakamera

In einem Innenhof auf dem Gelände der TU Dresden wurden an den umliegenden Fassaden ca. 75 Zielmarken befestigt. Diese Zielmarken dienen als Verknüpfungspunkte für eine integrierte Bündelblockausgleichung (Abb. 3). Die Berechnung erfolgte als freie Netzausgleichung und es wurde eine Selbstkalibrierung der beteiligten Messgeräte (Laserscanner Riegl LMS-Z420i, Panoramakamera Eyescan metric M3, zwei zentralperspektiv abbildende Kameras) im Zuge der Ausgleichung durchgeführt.

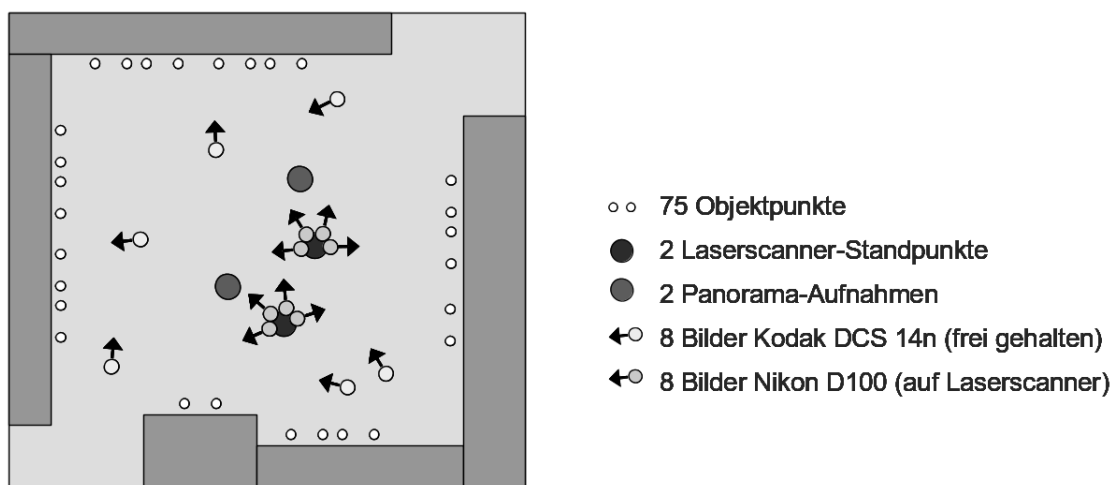


Abb. 3: Berechnungsbeispiel Bündelblockausgleichung (Verknüpfungspunkte an den umliegenden Fassaden eines ca. 45 m x 45 m großen Innenhofes)

Die Berechnungsergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Zuerst wurden nur die Beobachtungen (Distanz, Winkelmessung) von 2 Laserscanner-Standpunkten verwendet. Die Beobachtungen (Mittelpunkte der kreisrunden, retro-reflektierenden Zielmarken) ergeben sich durch die Anwendung eines Schwerpunktoperators im Reflektivitätsbild des Laserscanners. Aus der Berechnung der Bündelblockausgleichung resultiert eine durchschnittliche Messgenauigkeit im Objekt (RMS_{XYZ}) von 4,09 mm (1. Zeile). Dieser Wert liegt bereits über der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit des Laserscanners, aufgrund der ausgenutzten Redundanz der Punktwolke bei Verwendung des Schwerpunktoperators und der Verwendung konvergenter Laserscannerstrahlen,

die besonders in lateraler Koordinatenrichtung die reine Winkelmessgenauigkeit des Scanners unterstützt. Werden weitere Laserscanner-Standpunkte hinzugezogen reduziert sich RMS_{XYZ} auf 2,71 mm (2. Zeile). Werden allerdings anstelle weiterer Laserscans die Bildbeobachtungen einer Panoramakamera in die Berechnung einbezogen ist die Verbesserung der Genauigkeit (trotz geringerer Redundanz bei der Ausgleichungsberechnung) noch stärker (3. Zeile). Dies zeigt, dass sich die Verwendung unterschiedlicher Geräte mit unterschiedlichen Eigenschaften positiv auf die Gesamtgenauigkeit auswirken kann. Insbesondere kommt hier die im Vergleich zur Winkelmessung des Laserscanners hohe Genauigkeit der Panoramabildkoordinaten zum Tragen, die sich im Objekt besonders auf die laterale Koordinatenrichtung wirkt. Im Gegenzug unterstützt die Distanzmessung des Laserscanners die Bestimmung der Koordinaten in Tiefenrichtung, die sich ansonsten nur durch den Schnitt der Panoramabildstrahlen ergibt. Durch die Berücksichtigung weiterer Beobachtungen zentralperspektiver Bilder wird RMS_{XYZ} weiter reduziert (4. und 5. Zeile).

Tab. 1: Berechnungsergebnisse

| Anzahl Scans | Anzahl Panoramas | Anzahl Bilder (freihand) | Anzahl Bilder (auf TLS) | Redundanz | RMS_{XYZ} (mm) |
|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------------|
| 2 | - | - | - | 154 | 4,09 |
| 4 | - | - | - | 562 | 2,71 |
| 2 | 2 | - | - | 394 | 2,27 |
| 2 | 2 | 8 | - | 628 | 1,99 |
| 2 | 2 | 8 | 8 | 948 | 1,87 |

5.2 Geologische Anwendung

In diesem Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Geologie (Kurz et. al., 2008) wird eine hyperspektrale Panoramakamera eingesetzt, um den Grad der Dolomitisierung von Gesteinsarten an einem geologischen Aufschluss (Abb. 4) unterscheiden zu können. Die Panoramabilder werden spektral klassifiziert und das Klassifizierungsergebnis soll anschließend als Textur für das aus den Punktwolken eines terrestrischen Laserscanners erstellte Oberflächenmodell dienen. Es ist demzufolge notwendig, eine präzise gegenseitige Referenzierung der Daten von Panoramakamera und Laserscanner zu durchzuführen. Die Genauigkeit der Registrierung wird in Tab. 2 durch die a-posteriori Standardabweichung der Panoramabildkoordinaten repräsentiert.



Abb. 4: Panoramabild (ca. 120°) einer geologischen Aufschlusszone, aufgenommen mit der hyperspektralen Panoramakamera HySpex SWIR-320m

Bei der üblichen Vorgehensweise, bei der Bilder im räumlichen Rückwärtsschnitt zu den Laserscannerdaten orientiert werden, wird durchgeführt (1. und 2. Zeile). Die mit einem Laserscanner Riegl LMS-Z420i gemessenen 3D-Koordinaten von im Objekt aufgestellten Zielmarken dienen dabei als Passpunkte. Es verbleibt ein Restfehler von 3,35 Pixel, bzw. bei Berücksichtigung einer Selbstkalibrierung der Panoramakamera von 1,73 Pixel (bei 30 µm Pixelgröße und 40 mm Brennweite).

Tab. 2: Berechnungsergebnisse

| Berechnung | Selbst-Kalibrierung | Varianzkomponentenschätzung | $\hat{s}_{x',y'}$ (Pixel) | RMS _{XYZ} (cm) |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Räumlicher-Rückwärtsschnitt | - | - | 3,35 | - |
| Räumlicher-Rückwärtsschnitt | Panoramakamera | - | 1,73 | - |
| Bündelblockausgleichung | Beide Geräte | - | 0,99 | 3,5 |
| Bündelblockausgleichung | Beide Geräte | ✓ | 0,63 0,95 | 3,0 |

Für ein optimales Ergebnis zur Interpretation der geologischen Gegebenheiten wäre eine Registriergenauigkeit besser als 1 Pixel wünschenswert. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob durch die Berechnung einer integrierten Bündelblockausgleichung, höhere Genauigkeiten erreichbar sind. Die mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkte dienen nur als Näherungswerte und zur Festlegung des Koordinatensystems für eine freie Netzausgleichung. Die mittleren Standardabweichungen der Objektkoordinaten, sowie auch die Standardabweichungen der Elemente der äußeren Orientierung für alle Scans und

Panoramabilder wurden nun mit Zentimetergenauigkeit bestimmt. Das Potenzial der Kombination beider Daten in einem gemeinsamen Berechnungsschritt kann jedoch erst durch die richtige Gewichtung innerhalb der Ausgleichung genutzt werden. Es ist davon auszugehen, dass die a-priori Standardabweichungen der Beobachtungen zur Festlegung geeigneter Beobachtungsgewichte unter den gegebenen Aufnahmebedingungen nicht bekannt sind. Dies wird durch die Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse bei Berücksichtigung einer Varianzkomponentenschätzung deutlich, bei der für alle Beobachtungen optimale Gewichte geschätzt werden. Die a-posteriori Standardabweichungen der Panoramabildkoordinaten liegen für Horizontal- (0,63 Pixel) und Vertikalkomponente (0,95 Pixel) im Subpixel-Bereich. Bei der Bestimmung dieser Werte wurden Zusatzparameter für den terrestrischen Laserscanner im Ausgleichungsansatz berücksichtigt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass eine optimale und in sich konsistente Orientierung der Laserscanner- und Panoramakamera- Standpunkte erst durch die integrierte Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung der beteiligten Aufnahmegeräte möglich wird.

5.3 Laserscanner und Kamera mit Fisheye-Objektiv

Einige Hersteller terrestrischer Laserscanner bieten die Option, auf dem Scanner eine Kamera mit Fisheye-Objektiv zu montieren. Die Fisheye-Bilder werden dann üblicherweise nach der Referenzierung zu den Laserscannerdaten über einen räumlichen Rückwärtsschnitt zum Kolorieren der Punktwolke oder zum Texturieren eines aus den Laserdaten erzeugten Oberflächenmodells genutzt. Dabei liegt die Frage nahe, ob die Bilddaten nicht gleichzeitig auch für die Bestimmung dreidimensionaler Objektkoordinaten verwendet werden können. Aus diesem Grunde wurde eine Testumgebung mit ca. 100 im gesamten Raum verteilten Zielmarken mit insgesamt 6 Laserscanner-Standpunkten und 5 Kamerastandpunkten erfasst (Abb. 5) und die Beobachtungen in einer integrierten Bündelblockausgleichung ausgeglichen (Schneider & Schwalbe, 2008).

Tabelle 3 listet die mittleren Fehler der ausgeglichenen Objektpunktkoordinaten (RMS_{XYZ}) für unterschiedliche Aufnahmekonfigurationen auf. Dabei zeigt sich zum einen, dass konvergente Laserscanneraufnahmen zu höheren Genauigkeiten führen, weil zusätzlich zur Winkelmessung auch der Strahlenschnitt für die Bestimmung der Neupunktkoordinaten genutzt wird. Zum anderen wird deutlich, dass das Einbeziehen der Fisheye-Bildbeobachtungen zu einer signifikanten Verbesserung der RMS_{XYZ} führt.

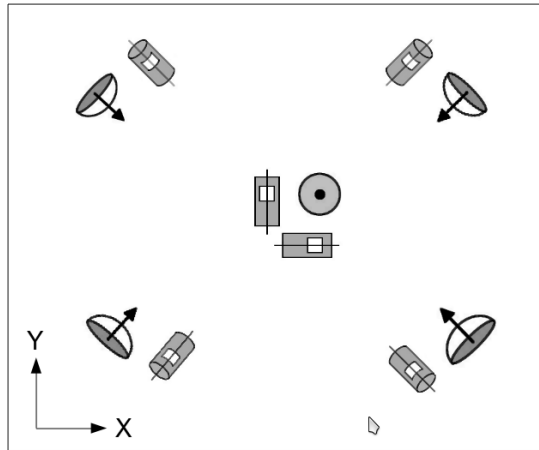


Abb. 5: Testraum (ca. 5 m x 5 m) Laserscanner- und Fisheye-Kamera-Positionen im Grundriss

Tab. 3: Berechnungsergebnisse

| Anzahl Scans | Anzahl Fisheye-Bilder | Redundanz | RMS _{XYZ} (mm) |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|
| 2 (aus der Raummitte) | - | 122 | 9,64 |
| 2 (aus gegenüberliegenden Raumecken) | - | 140 | 2,20 |
| 6 | - | 769 | 0,96 |
| - | 5 | 330 | 1,06 |
| 2 (aus der Raummitte) | 4 | 536 | 0,70 |

Eine aus den Ergebnissen abgeleitete effektive Vorgehensweise könnte demzufolge darin bestehen, eine für die Erfassung der Raumgeometrie minimale Anzahl von Laserscanner-Standpunkten zu verwenden und zur Stärkung der Geometrie zusätzliche konvergente (Fisheye-) Bilder aufzunehmen. Die gesamte Aufnahmedauer wird im Vergleich zur Erhöhung der Anzahl an Laserscanner-Standpunkten deutlich minimiert bei gleichzeitiger Verbesserung der Objektpunktgenauigkeit. Außerdem erfolgt durch die Bündelblockausgleichung eine optimale Registrierung der Datensätze, wodurch sich die Bilder selbstverständlich auch zur Kolorierung/Texturierung eignen.

6 Zusammenfassung

In vielen Anwendungen werden terrestrische Laserscanner und Kameras kombiniert. Insbesondere bietet sich die Kombination mit 360°-Panoramakameras und Kameras mit Fisheye-Objektiv an, da das Gesichtsfeld dieser Geräte dem von terrestrischen Laserscannern ähnlich ist. Die Bilddaten werden meist zur Kolorierung oder Texturierung von Laserscannerdaten genutzt. Das sich aus der Komplementarität von Bild- und Laserscannerdaten ergebende Potential wird bisher meist nicht vollständig genutzt. Deshalb wird in dem Beitrag vorgeschlagen die Daten in einer integrierten Bündelblockausgleichung gemeinsam auszuwerten. Das setzt eine strenge geometrische Modellierung aller beteiligten Aufnahmegeräte sowie ein geeignetes stochastisches Modell voraus. Für verschiedene Aufnahmegeräte wurden deshalb geometrische Modelle entwickelt und um Zusatzparameter, welche die Kalibrierung des Aufnahmesystems erlauben, erweitert. Das stochastische Modell baut auf der Implementation einer Varianzkomponentenschätzung auf, bei der für die unterschiedlichen Beobachtungstypen voneinander unabhängige Gewichte geschätzt werden.

In mehreren praktischen Untersuchungen wurde das Potential des Ansatzes der integrierten Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung und Varianzkomponentenschätzung analysiert. Dabei können folgende Punkte hervorgehoben werden:

- optimale Nutzung komplementärer Eigenschaften
- optimale Referenzierung der unterschiedlichen Datensätze zueinander
- gegenseitige Unterstützung der Aufnahmegeräte bei der Bestimmung von Objektgeometrie und Kalibrierung
- sehr hohe Genauigkeit möglich (insb. Genauigkeit der Objektkoordinaten)
- Selbstkalibrierung alle Aufnahmegeräte unter den aktuellen Aufnahmebedingungen
- Beurteilung der Charakteristik der Messgeräte (anhand der durch die Varianzkomponentenschätzung unabhängig geschätzten Standardabweichungen der einzelnen Beobachtungstypen)
- Erhöhung der Zuverlässigkeit der Parameter- und Koordinatenbestimmung

Bei allen Laserscanner-Projekten, bei denen gleichzeitig Bilddaten aufgenommen werden, könnte das vorgestellte Verfahren Anwendung finden. Insbesondere erscheint es als sinnvoll, diese Berechnungsmethode in die Aufnahme- und Auswertesoftware terrestrischer Laserscannerdaten zu integrieren.

Literatur

- Abraham, S., Förstner, W., 2005: Fisheye-stereo calibration and epipolar rectification. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 59 (2005): 278 – 288.
- Al-Manasir, K., Fraser, C., 2006: Registration of terrestrial laserscanner data using imagery. *The Photogrammetric Record*, Volume 21 (115), pp. 255-268, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- Amiri Parian, J., 2007: Sensor modelling, terrestrial panoramic camera calibration and close-range photogrammetric network analysis. Dissertation ETH Zürich.
- Backstein, H., Pajdla, T., 2002: Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens. *Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp. 60-67, IEEE press.
- Dold, C., Brenner, K., 2006: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVI, Part 5.
- Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A., Kager, H., 2004: Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXV, Part B5.
- Klein, B., 2001: Untersuchungen zur Feldprüfung geodätischer Instrumente mittels Varianzkomponentenschätzung. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, unveröffentlicht.
- Koch, K.-R., 2004: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler Verlag, Bonn, 4. Auflage.
- Kurz, T.H., Buckley, S.J., Howell, J.A., Schneider, D., 2008: Geological outcrop modelling and interpretation using ground based hyperspectral and laser scanning data fusion. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII-B5.
- Luhmann, T., Tecklenburg, W., 2004: 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. *International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXIV, 5/W16.
- Mulsow, C., Schneider, D., Ullrich, A., Studnicka, N., 2004: Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. Luhmann, T. (Hrsg.): *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*: 108-113, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Ray, S. F., 1994: *Applied photographic optics – lenses and optical systems for photography, film, video and electronic imaging*. 2nd Edition, Focal Press.
- Schneider, D., Maas, H.-G., 2006: A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. *The Photogrammetric Record*, 21(115): 198-210, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.

- Schneider, D., Schwalbe, E., 2008: Integrated processing of terrestrial laser scanner data and fisheye-camera image data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVII, Part B5.
- Schneider, D.; Schwalbe, E.; Maas, H.-G., 2009: Validation of geometric models for fisheye lenses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 64/3, Pages 259-266.
- Schneider, D., 2009: Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *Proceedings ISPRS Workshop on Laserscanning*, Paris, France.
- Schneider, D., 2009: Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten. *Dissertation TU Dresden*.
- Sieg, D., Hirsch, M., 2000: Varianzkomponentenschätzung in ingenieur-geodätischen Netzen; Teil 1: Theorie. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 3/2000: 82-90.
- Ullrich, A., Schwarz, R., Kager, H., 2003: Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 91. Jahrgang (2003), 4: 281-287.
- Wendt, A., Heipke, C., 2006: Area-based orientation of brightness, range and intensity images. *PFG*, Heft 3, 2007, pp. 187-196.