

Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamera Systems

Christian MULSOW, Danilo SCHNEIDER, Andreas ULLRICH
und Nikolaus STUDNICKA

Zusammenfassung

Auf dem Laserscannermarkt erscheinen zunehmend Systeme, welche neben dem eigentlichen Scanner mit auch Komponenten zur digitalen Bilderfassung ausgestattet sind. Diese zusätzliche Informationsquelle wird dabei zum Einfärben der vom Laserscanner erzeugten Punktwolke oder zur Texturierung modellierter Objekte genutzt. Für diesen Vorgang ist eine geometrische Referenzierung zwischen Punktwolke und Bilddaten unabdingbar. Diese basiert unter anderem auf den Parameterwerten aus einer Kamerakalibrierung. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Referenzierung wird umso gewichtiger, wenn eine über die bloße Kolorierung der Punktwolke hinausgehende Integration beider komplementären Datenquellen beabsichtigt ist.

In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse von Untersuchungen eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamera-Systems vom Typ Riegls LMS-Z420i, welches am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden seit November 2003 vorhanden ist, vorgestellt. Es wird dabei ebenfalls auf grundsätzliche Fragen der Kombination derartiger Systemkomponenten eingegangen.

1 Messsystem Riegls LMS-Z420i – Spezifikationen und Charakteristik

Das integrierte System besteht aus dem Laserscanner LMS-Z420i der Firma Riegls und einer über eine Montagevorrichtung fest verbundenen Still-Video-Kamera vom Typ NIKON D100.



Abb. 1: Scanner Riegls LMS-Z420i mit aufgesetzter NIKON D100

Laserscanner LMS-Z420i	
Reichweite	bis 800m (bei Reflektivität von 0,8) bis 250m (bei Reflektivität von 0,1)
Entfernungsmessgenauigkeit	< 10 mm
Eigenschaften des Laserstrahls	Austrittsdurchmesser 10 mm Divergenz 0,25 mrad
Scanbereich	0-360° horizontal 0-80° vertikal
Scanauflösung	Bis 0,004°
Messgeschwindigkeit	Bis 8000 Punkte/Sekunde

Still-Video-Kamera NIKON D100	
Objektiv	NIKKOR, Brennweite 14 mm
Öffnungswinkel	80° x 58°
Auflösung	3008 x 2000 Pixel

In den in Abb.1 enthaltenen Tabellen sind die wichtigsten Eigenschaften beider Systemkomponenten komprimiert dargestellt. Der Grund für die Verwendung eines 14mm Objektivs liegt in der Angleichung der vertikalen Sichtbereiche beider Komponenten (bei Hochkant-Montage der Kamera auf dem Scannergehäuse). In dieser Kombination werden 7 Kameraaufnahmen zur Abdeckung eines 360°-Panorama benötigt.

Beide Komponenten ergänzen sich im Gesamtsystem mit folgenden Charakteristika:

- Der Laserscanner generiert zuverlässige 3 D-Koordinaten in Form einer Punktwolke bzw. eines Tiefenbildes. Die Intensität des reflektierten Laserimpulses kann ebenfalls gemessen werden, wobei diese aufgrund von Rauscheinflüssen nur eingeschränkt nutzbar ist.
- Die Kamera liefert 2-D Farbinformationen mit einem hohen Maß an Interpretierbarkeit und hoher geometrischer Auflösung. Diese Datenquelle kann zunächst zum Einfärben der Laserscanner-Punktwolke und im weiteren zur Texturierung der vermaschten Punktwolke genutzt werden.

2 Theoretische Betrachtungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Für die weiteren Betrachtungen ist es zweckmäßig, Laserscanner und Kamera zunächst getrennt zu behandeln.

Die im System integrierte Kamera NIKON D100 besitzt nach den bisherigen Erfahrungen aus der digitalen Mehrbildphotogrammetrie ein planimetrisches Genauigkeitspotential von mindestens 1/20 Pixel, wenn Subpixeloperatoren zur Bildmessung genutzt werden. Übersetzt in den Objektraum entspricht dies einer Richtungsmessgenauigkeit von 0,028 mrad bei Verwendung eines 14mm Objektivs. Die Tiefeninformation eines aufgenommenen Objektes lässt sich aus Bilddaten allein nur über Mehrbildverfahren ermitteln. Diese bedürfen eines gewissen Rechenaufwandes und unterliegen in vielen Anwendungen einer eingeschränkten Zuverlässigkeit. Zudem lässt sich die Tiefenkoordinate eines Objektpunktes photogrammetrisch i.d.R. weniger genau bestimmen als dessen Lagekoordinate.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Genauigkeitspotentiale

Kamera NIKON D100	Subpixelmessgenauigkeit 0,05 Pixel Richtungsmessgenauigkeit 0,028 mrad (14 mm Objektiv)
Laserscanner LMS-Z420i	Entfernungsmessgenauigkeit < 10 mm Richtungsgenauigkeit (abgeleitet aus Auflösung der Winkelmessung)
	vertikal 0,035 mrad
	horizontal 0,044 mrad

Die Tiefengenauigkeit des Laserscanners wird ausschließlich durch die Entfernungsmessung bestimmt. Die Standardabweichung für eine Einzelmessung liegt bei diesem Gerätetyp bei <10mm und ist nur einer geringen Entfernungsabhängigkeit unterworfen. Die Winkelmessauflösung wird vom Hersteller mit 0,04mrad angegeben und ist damit ca. 50% geringer als die erreichbare Genauigkeit der Kamera.

Da aufgrund der bewegten Teile im System und Erfahrungen aus der geometrischen Modellierung von Rotationszeilen-Panoramakameras (Schneider & Maas 2003) eventuell systematische Fehler in den durch polares Anhängen bestimmten Objektkoordinaten zu erwarten sind, soll dem Vergleich der Richtungsmessung durch den Laserscanner und die Kamera im folgenden besondere Beachtung geschenkt werden.

3 Kamerakalibrierung und Orientierung

Für die korrekte Fusion von Bild- und Scandaten ist die Kenntnis über die relative Orientierung von Kamera und Laserscanner sowie die Kameraparameter unerlässlich. Mathematisch beschrieben werden kann die relative Orientierung über eine Translation und eine Rotation zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem Scannerkoordinatensystem (Ullrich et al.,2003) (Abb.4). Die Transformationsparameter können im Rahmen einer speziellen Kalibrierung oder on-the-Job über vom Laserscanner gemessene Passpunkte und den dazugehörigen Bildpunktkoordinaten ermittelt werden. Auf den gleichen Ausgangsdaten basiert die Bestimmung der inneren Orientierung sowie der Verzeichnung der integrierten Kamera, welche wie die relative Orientierung in der Auswertesoftware RiSCAN PRO softwaretechnisch realisiert ist.

3.1 Relative Orientierung von Scanner und Kamera

Die Transformationsparameter zwischen Scanner und Kamera (3 Translationen, 3 Rotationen können im Rahmen einer speziellen Kalibrierung oder on-the-Job über vom Laserscanner gemessene Passpunkte und die dazugehörigen Bildpunktkoordinaten ermittelt werden.

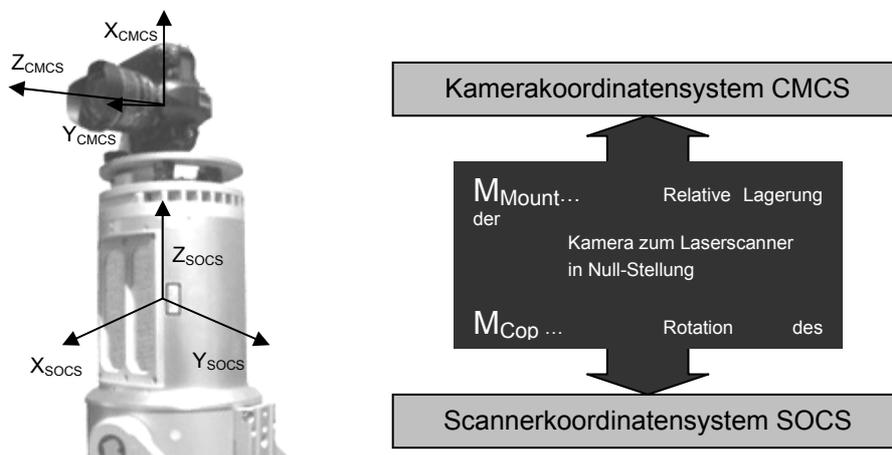


Abb. 2: Systemfestlegungen und relative Orientierung von Kamera und Laserscanner

Die notwendigen Algorithmen sind in der Auswertesoftware RiSCAN-PRO implementiert und können dort unter einem gesonderten Menü zur Berechnung der Orientierung genutzt werden. Neben den eigentlichen Kalibrierparametern werden dabei auch die mittleren Restklaffungen an den Bildpunkten als statistische Größen ausgegeben. Diese Werte können zur Beurteilung der Güte der Fusion von Laserscanner- und Bilddaten herangezogen werden. In der Regel liegt der Gewichtseinheitsfehler beim Rückwärtsschnitt der Kamerabilder auf die durch den Laserscanner bestimmten Passpunkte im Bereich von 0,3 – 0,6 Pixel.

3.2 Kamerakalibrierung basierend auf Scandaten

In diesem Abschnitt werden die in der vom Scannerhersteller mitgelieferten Steuer- und Auswertesoftware RiSCAN PRO implementierten Kamerakalibrierverfahren erläutert. Zum einen besteht hier die Möglichkeit der Kamerakalibrierung über ein 3-D Punktfeld aus Retromarken und zum anderen die Nutzung einer vertikalen Zeile aus Retromarken.

Bei ersterem Verfahren wird ein räumlich geeignet verteiltes Feld aus Retromarken durch den Scanner koordinatenmäßig bestimmt. Durch die Kamera wird dann eine Aufnahme des Feldes erstellt und die Bildkoordinaten der Marken mittels Schwerpunktoperator gemessen. Passpunktkoordinaten und Bildkoordinaten gehen dann in einen räumlichen Rückwärtsschnitt ein, wodurch die relative Orientierung zum Scanner, die Elemente der inneren Orientierung sowie die Verzeichnungsparameter rechnerisch bestimmt werden.

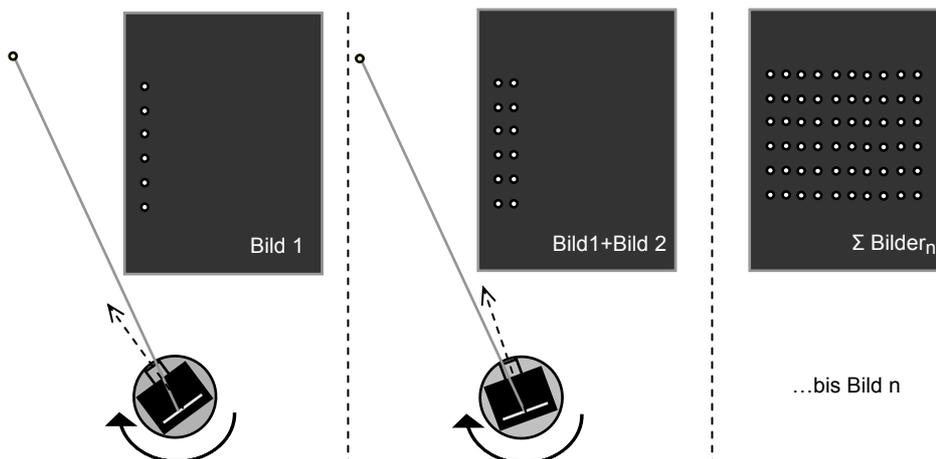


Abb. 3: Kamerakalibrierung mittels Zeile aus Retromarken

Das zweite Verfahren benötigt nur eine vertikale Zeile aus Retromarken (Material- und Zeitersparnis gegenüber der Anlage eines Feldes aus Retromarken). Diese wird ebenfalls durch den Laserscanner bestimmt. Im folgendem werden mehrere Bilder der Zeile durch die Kamera erstellt. Nach jeder Aufnahme wird die Kamera durch die Rotation des Scanners in der in ihrer Aufnahmerichtung verändert. Somit wird sequentiell jeder Bereich des Kamerasensors durch Aufnahmen der Passpunktzeile abgedeckt. Es werden dann die Bildkoordinaten der Retromarken in jeder Aufnahme mittels Schwerpunktoperator gemessen

und *einem* synthetischen Bild zugeordnet. Die anschließende Vervielfältigung der Koordinaten der Passpunktzeile erfolgt mit der Intention, jedem Punkt des synthetischen Bildes einen entsprechenden Bezug im Objektraum zu geben. Dies geschieht durch mehrmalige Transformation der Ausgangskordinaten der Retromarken auf der Basis der während des Bildaufnahmezyklus erfolgten horizontalen Drehungen des Scanners. Die Bildkoordinaten und die synthetischen Passpunktkoordinaten gehen dann in einen Rückwärtsschnitt zur Bestimmung der Kameraparameter ein. Vorteil dieses Verfahrens ist die vereinfachte Anlage des räumlichen Punktfeldes durch die wiederholte Aufnahme weniger Punkte.

Beide Verfahren liefern Ergebnisse vergleichbarer Genauigkeit. In der Regel liegt der Gewichtseinheitsfehler des Rückwärtsschnittes bei $< 0,4$ Pixel. Das Genauigkeitspotential der Kamera von etwa 0,05 Pixel wird demnach noch nicht voll ausgeschöpft. Dieser Umstand indiziert, dass die Passpunktgenauigkeit nicht den Anforderungen der Kamerakalibrierung genügt, bzw. dass das Genauigkeitspotential der Kamera der Genauigkeit des auf diese Weise erstellten Referenzpunktfeldes überlegen ist.

Sowohl für die relative Orientierung von Scanner und Kamera wie auch für die Kamerakalibrierung ist die Streckenmessgenauigkeit des Laserscanners bei einer im Vergleich zum Abstand von Laserscanner zur Kamera (ca. 30cm) großen Ausdehnung des Referenzpunktfeldes weitgehend irrelevant. Das Ergebnis des Rückwärtsschnittes liefert somit primär ein Indiz für die Messgenauigkeit im Bild oder die Richtungsgenauigkeit des Scanners. Daraus ergibt sich ein Ansatzpunkt für die weitere Verbesserung des Genauigkeitspotentials des Scanners durch eine integrierte Auswertung.

4 Praktische Tests

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von praktischen Genauigkeitstests vorgestellt. Als Grundlage diente ein Testfeld (200m x 140m) aus 40 Retromarken (\varnothing 5cm), welches mit einer dem Laserscanner übergeordneten Genauigkeit geodätisch aufgemessen wurde. Von drei Standpunkten aus erfolgte dann jeweils eine Positionierung des Laserscanners über das Anmessen der Passpunkte. Dies wurde über eine Transformation der im Scanner-eigenen System gemessenen Punktkoordinaten in das Referenzsystem der Passpunktkoordinaten realisiert. Die mittleren Abweichungen an den Passpunkten können dann als Kriterium für die Beurteilung der Messgenauigkeit des Laserscanners herangezogen werden.

Tabelle 3: Abweichungen zu Referenzkoordinaten

Scanner-Standpunkt	Mittlere Abweichungen zu Referenzkoordinaten (34 Punkte)
Position 1	3,5 mm
Position 2	3,6 mm
Position 3	3,6 mm

Die Untersuchung des Entfernungsmessrauschen des Scanners erfolgte ebenfalls im Rahmen der Tests. Zu diesem Zweck wurde ein Teil einer ebenen Platte (1m x 1m) mit höchster Auflösung ($0,004^\circ$) im Abstand von 6m gescannt, in die Punktwolke (200.000 Punkte) eine ausgleichende Ebene gerechnet und dann die Punktabstände zu dieser Ebene

betrachtet. Der RMS-Wert der Abstände betrug 7,5 mm, was ungefähr dem vom Hersteller angegebenen Entfernungsmessrauschen entspricht. Zur Untersuchung der Verteilung wurden außerdem die Abweichungen in einem Histogramm dargestellt (Abb.3).

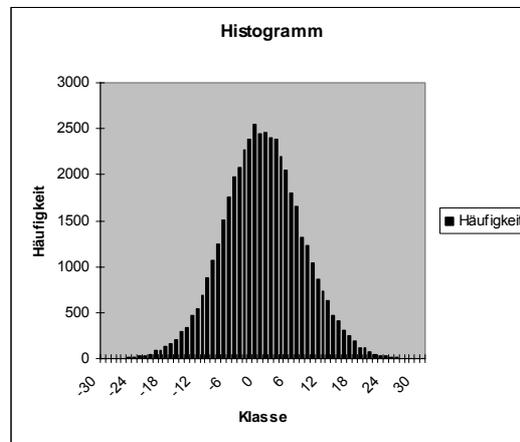


Abb. 4: Histogramm der Punktabstände [mm] zur ausgleichenden Ebene

5 Ausblick

Der Riegl LMS-Z420i mit hochauflösender Still-Video-Kamera stellt ein leistungsfähiges und vielseitig einsetzbares Messinstrument dar. Erste Tests beweisen das gute Genauigkeitspotential des Laserscanners. Die Bilddaten der Kamera können mit einer Genauigkeit von unter 1 Pixel auf die Laserscannerdaten referenziert werden und sind damit gut zur Kolorierung der Punktwolke bzw. zur Texturierung von Objektmodellen geeignet.

Die Ergebnisse der Orientierung und Kalibrierung der Kamera zeigen aber auch, dass das Genauigkeitspotential des Gesamtsystems noch nicht voll ausgeschöpft ist, und dass durch eine integrierte Systemkalibrierung eine weitere Genauigkeitssteigerung zu erwarten ist.

Literatur

Schneider D. & H.-G. Maas, (2003): *Geometric modelling and calibration of a high resolution panoramic camera*. In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Volume II, S. 122-129

Ullrich A., et al., (2001): *Time-of-Flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing.*, In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques V*, S. 2-9

Ullrich A., Schwarz R. & H. Kager, (2003): *Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system*. In: Grün/Kahmen (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Volume I, S. 298-305