



Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera

Andreas Ullrich ¹, Roland Schwarz ², Helmut J. Kager ³

¹ RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstrasse 48, A-3580 Horn

² RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstrasse 48, A-3580 Horn

³ Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien

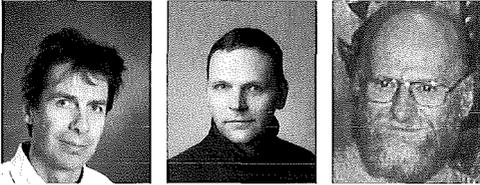
VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **91** (4), S. 281–287

2003

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Ullrich_VGI_200335,  
Title = {Multistationsausgleichung f{"u}r ein Laserscanner-System mit  
aufgesetzter Kamera},  
Author = {Ullrich, Andreas and Schwarz, Roland and Kager, Helmut J.},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {281--287},  
Number = {4},  
Year = {2003},  
Volume = {91}  
}
```





Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera

Andreas Ullrich und Roland Schwarz, Horn;
Helmut Kager, Wien

Kurzfassung

Eine hybride Multistationsausgleichung („Freie Stationierung“) für die Verarbeitung von 2D- (photographischen) und 3D-(Laserscanning-)Daten in einer integrierten Umgebung wird präsentiert. Der verwendete zusammengesetzte Sensor besteht aus einem Langstreckenhochleistungslaserscanner der Fa. RIEGL, dessen Distanzmessung auf dem Laufzeitverfahren basiert und einer handelsüblichen hochauflösenden CCD-Kamera. Sowohl Datenerfassung als auch Ausgleichung werden mit Hilfe eines geeigneten Softwarepakets durchgeführt. Fragen der Kalibrierung und Vorteile einer solchen kombinierten Methode werden behandelt.

Abstract

A hybrid multi-station adjustment for processing 2D (photographic) and 3D (laser scanning) data in an integrated environment is presented. The composite sensor being used is made up of a long-range high-performance RIEGL laser scanner, based on “time-of-flight” ranging, and a commercial high-resolution CCD camera. The data acquisition and adjustment is performed by means of a dedicated software package. Questions of sensor calibration and advantages of such a combined approach are addressed.

1. Einleitung

1.1. Laser Scanning

Die RIEGL Laser Measurement Systems GmbH hat sich einen ausgezeichneten Namen für die Entwicklung, die Herstellung und den Vertrieb von herausragenden abbildenden 3D Lasersensoren erworben. Die Sensoren basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung mit Laserpulsen im Bereich des nahen Infrarot [1]. Die Lasersensoren zeigen eine einzigartige hervorragende Kombination von hoher Messgenauigkeit, sehr weitem Datenerfassungsbereich im Erfassungswinkel und in der Entfernungsmessung und einer hohen Datenerfassungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Kompaktheit und vielfach erprobter Robustheit.

1.2. Photogrammetrie

Die Nahbereichsphotogrammetrie hat eine lange Tradition, Objekte aus Photos zu rekonstruieren, beginnend mit einer Photo-Triangulation (Bündelblockausgleichung) und gipfelförmig in der Herstellung von dreidimensionalen Photo-Modellen, welche Objektmodelle mit aus Photos gewonnener Texturinformation sind [2], [3].

1.3. Integration

Seit kurzer Zeit bietet RIEGL abbildende 3D Lasersensoren (Laser-Scanner) mit einer hochauflösenden Digitalkamera als Option an. Die

Kamera ist mit dem Scanner fest verbunden kalibriert und die Orientierung der Kamera in Bezug auf das Scanner-Koordinatensystem ist bekannt. Der gesamte Erfassungsbereich des Laserscanners von $90^\circ \times 360^\circ$ kann durch eine Bildsequenz abgedeckt werden. Dieses integrierte System aus Laserscanner und Digitalkamera, auch als Hybridsensor bezeichnet, liefert damit sowohl 3D Daten von der Lasermessung als auch 2D Bilder von der Kamera [4].

Der Hybridsensor ist während der Datenaufnahme mit einer Steuer- und Datenerfassungseinheit, üblicherweise einem Laptop, über ein kabelbasiertes Ethernet oder über ein WirelessLAN verbunden. Alle Messdaten werden in der Datenerfassungseinheit in einer einzigen Projektstruktur gespeichert. Für jedes der erfassten Kamerabilder wird gemeinsam mit einem Satz von Montageparametern der Kamera auch ein Satz von Orientierungsparametern des Scanners erfasst, aus welchen sich in einfacher Weise die Parameter der äußeren Kameraorientierung bestimmen lassen. Dadurch können beide Datensätze ohne Anwendung einer eigenen Ausrichtungsprozedur gemeinsam weiterverarbeitet werden.

2. Software Paket RiSCAN PRO

2.1. Projektstruktur

Üblicherweise besteht der Vorgang der 3D Datenerfassung mit Laserscannern aus der Erfassung einiger 3D Scans aus unterschiedlichen

Positionen. Diese Positionen werden so gewählt, dass der Datensatz das Objekt der Datenerfassung annähernd komplett abdeckt. Besonders störende Abschattung sollten vermieden oder zumindest bei der Standortwahl berücksichtigt werden. Für die Beurteilung der Abdeckung des Objektes mit den bereits erfassten Daten ist eine Überblicksdarstellung im Felde von besonderem Vorteil zur weiteren Standortplanung. Zu diesem Zwecke werden alle Daten vom Softwarepaket RiSCAN PRO in einer einzigen Projektstruktur zusammengefasst und in einer Projektdatei gespeichert. Die Projektdatei bündelt unter anderem alle Scannerdaten, Kameradaten und die erforderlichen Koordinatentransformationen. Innerhalb der Projektstruktur sind die 2D und 3D Daten in einer einfachen Baumstruktur organisiert. 3D und 2D Daten benutzen dasselbe hierarchische System von Koordinatensystemen. Das Datenformat der Projektstruktur ist textbasiert und im XML Standard realisiert. Das Format ist weitestgehend veröffentlicht, um unabhängigen Softwareentwicklern von Nachverarbeitungsprogrammen den vollen Zugang zu diesen Daten zu ermöglichen (siehe zum Beispiel PHIDIAS von PHOCAD [5]). RiSCAN PRO unterstützt den Anwender neben der eigentlichen Datenerfassung auch in der Sensorkonfiguration, der Datenvisualisierung und Datenarchivierung. Darüber hinaus bietet das Paket auch die Möglichkeit der Kamerakalibration.

2.2. Koordinatensysteme

Alle Scandaten und Bilddaten stehen über hierarchisch strukturierte Koordinatensysteme in Wechselwirkung. Die Beziehungen der Koordinatensysteme zueinander werden konsequent über 4x4 Matrizen beschrieben. Obgleich für gewöhnlich nur sechs Freiheitsgrade verwendet werden, kann diese Beschreibungsart im Prinzip zusätzlich auch Skalierungsoperationen enthalten.

2.2.1. Das „scannereigene Koordinatensystem“ (SOCS für Scanner's Own Coordinate System).

Der Laserscanner liefert seine Rohdaten im scannereigenen Koordinatensystem SOCS. Abbildung 1 zeigt das Koordinatensystem eines LMS-Z-Seriengerätes. Jeder Datenpunkt jedes abbildenden RIEGL 3D Laserscanners beinhaltet geometrische Daten (Kartesische Koordinaten x, y, z oder sphärische Koordinaten r, ϑ , φ) und zusätzliche Eigenschaften (zumindest Intensität, optional Farbinformation). Aus der zeitlichen Abfolge der Datenaufnahme innerhalb eines Scans

besteht eine Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Einzelmessungen. Daher kann das primäre Messergebnis eines RIEGL 3D Sensors als organisierte Punktwolke mit zusätzlichen Knotenpunktattributen bezeichnet werden.

2.2.2. Das Projektkoordinatensystem (PRCS für Project Coordinate System)

Das Projektkoordinatensystem PRCS wird vom Anwender definiert. Zum Beispiel kann als PRCS ein bereits im Scangebiet definiertes Koordinatensystem verwendet werden, wie z.B. ein Betriebskoordinatensystem. Die RISCAN PRO internen Zahlenformate verlangen, dass alle geometrischen Daten hinreichend genau mit „single precision“-Zahlen beschrieben werden können (7 signifikante Stellen). Wird z.B. mm-Genauigkeit gefordert, so dürfen die größten Koordinatenwerte 10 km nicht überschreiten.

2.2.3. Das globale Koordinatensystem (GLCS für Global Coordinate System)

Das globale Koordinatensystem GLCS ist jenes Koordinatensystem, in welches das PRCS eingebettet ist und wird üblicher Weise durch äußere Vorgaben bestimmt. Das GLCS ist in der Lage mit großen Zahlenwerten umzugehen (z.B. Landeskoordinatensystem).

2.2.4. Das Kamerakoordinatensystem (CMCS für CaMera Coordinate System)

Das Kamerakoordinatensystem ist das Koordinatensystem der Digitalkamera.

2.3. Orientierung

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für die Koordinatensysteme GLCS, PRCS und SOCS. Das zu erfassende Objekt ist ein Gebäude, dargestellt in der Vogelperspektive. Das Projektkoordinatensystem verläuft mit seiner y-Achse (y_{pr}) parallel zur längeren Gebäudekante und mit dem Ursprung an einer Gebäudeecke. Das PRCS muss stets ein rechtshändiges Koordinatensystem sein. Hingegen ist das GLCS in diesem Beispiel linkshändig, z.B. Nordwert, Ostwert und Höhe. Eine Reihe von Aufstellungen des 3D Lasersensors, bezeichnet als Scanpositionen, sind dargestellt und mit SOCSi bezeichnet. Jede Scanposition hat ihr eigenes lokales Koordinatensystem SOCS, skizziert mit den Achsen x_{SOCSi} , y_{SOCSi} und z_{SOCSi} . Bei nahezu jeder Datenerfassung in der Praxis werden Scans von unterschiedlichen Scannerstandorten aus mit dem Ziel aufgenommen

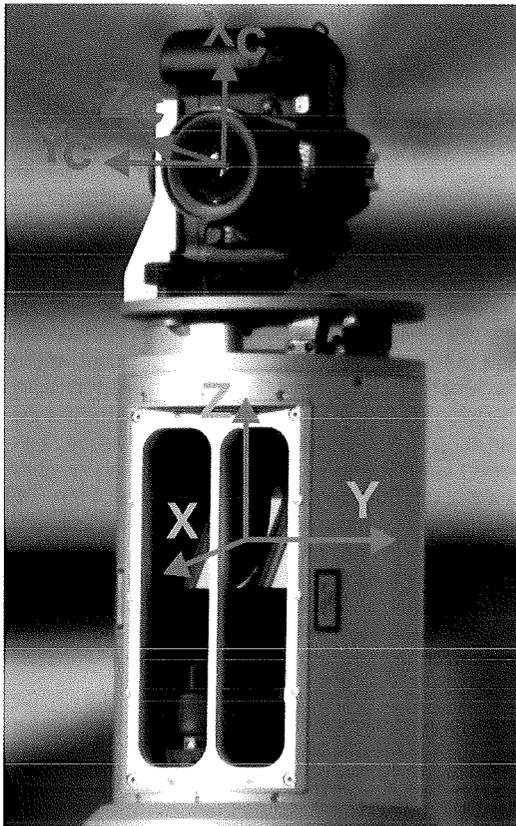
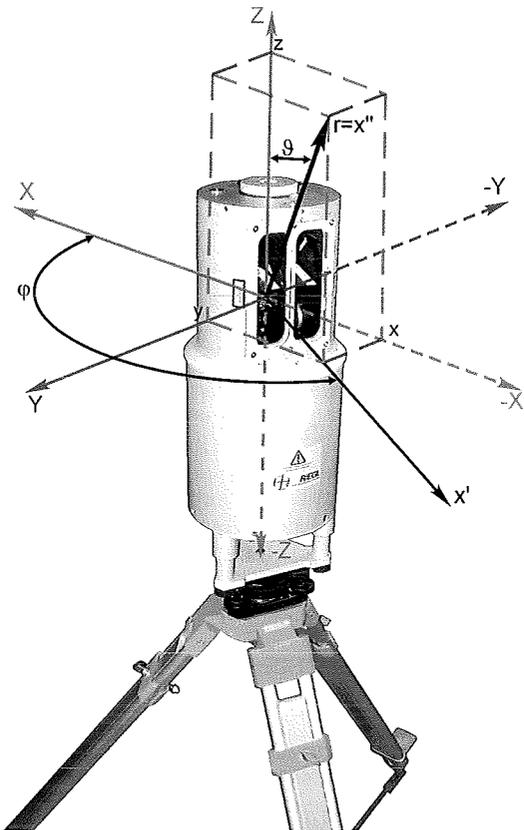


Abb. 1: Definition des scannereigenen Koordinatensystems SOCS bei einem RIEGL LMS-Z-Seriengerät (links) und bei einem RIEGL LMS_Z360 mit aufgesetzter Digitalkamera (rechts).

men, einen mehr oder weniger vollständigen Datensatz ohne Lücken oder Scan-Abschattungen zu erhalten. Zu Beginn einer Datenerfassung legt der Anwender eine neue Scanposition in RiSCAN PRO an. Diese Scanposition enthält dann alle Daten, die an dieser Aufstellung gewonnen werden. Ein Teil dieser Daten ist die Transformationsmatrix M_{SOPN} , (SOP steht für scanner's own position and orientation), die alle Daten aus dem lokalen Koordinatensystem SOCS in das Projektkoordinatensystem PRCS transformiert. Obgleich die Transformation als 4×4 Matrix abgespeichert und angewendet wird, werden bloß 6 Freiheitsgrade tatsächlich benutzt, da keine affine Verzerrung bei den Scandaten zu berücksichtigen ist.

Die Matrix M_{POP} transformiert die Daten aus PRCS in GLCS. Die komplette Transformationskette vom lokalen Scannerkoordinatensystem in das globale Referenzkoordinatensystem ist damit

$$X_{GLCS} = M_{POP} M_{SOPN} X_{SOCS_N} \quad (1)$$

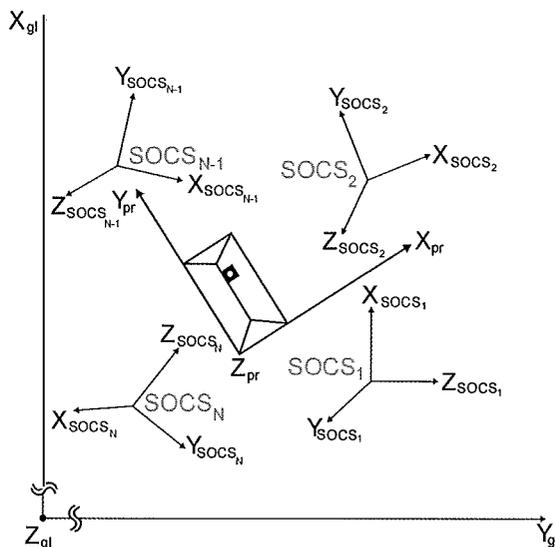


Abb. 2: Koordinatensysteme PRCS, GLCS und einige lokale Systeme SOCS am Beispiel der Datenaufnahme an einem Gebäude.

Eine ähnliche Transformationskette existiert für Daten im Kamerakoordinatensystem:

$$\mathbf{X}_{GLCS} = \mathbf{M}_{POP} \mathbf{M}_{SOPN} \mathbf{M}_{COP,N,M} \mathbf{M}_{mount}^{-1} \mathbf{X}_{CMCS_{S,M}} \quad (2)$$

wobei N für den N-ten Aufstellungsort steht und M für das M-te Bild an diesem Aufstellungsort. \mathbf{M}_{mount} ist die Kamera-Montage-Matrix, die als konstant während der gesamten Datenaufnahme angenommen werden kann. Diese Matrix beinhaltet wieder die 6 Freiheitsgrade der Montage (3 Translationsparameter, 3 Rotationsparameter). Die Matrix $\mathbf{M}_{COPN,M}$ beschreibt die bloße Rotation um die z-Achse des SOCS, unter welcher das Bild aufgenommen wurde, wobei der Drehwinkel als Messergebnis vom Scankopf geliefert wird. Die Montage-Matrix und die Rotationsmatrix zusammen beschreiben die Transformation zwischen CMCS und SOCS. Die Aufteilung in einen zeitlich unveränderlichen und kalibrierbaren Teil \mathbf{M}_{mount} und in einen veränderlichen Teil und messbaren Teil erlaubt ein einfaches Zusammenführen von Bilddaten und Scandaten. Die separate Speicherung von \mathbf{M}_{mount} erlaubt auch zwei unterschiedliche Anwendungsszenarien, wie sie in 4.1 und 4.2 weiter unten beschrieben werden.

Während der Datenerfassung sind die Transformationsmatrizen zu bestimmen, um die Daten der einzelnen Scanpositionen im PRCS zusammenführen zu können. Eine verlässliche Methode besteht darin, retro-reflektierende Signale im Aufnahmegebiet zu postieren. Diese können aufgrund ihrer hohen Reflektivität in den Scandaten, speziell in den Intensitätsdaten, automatisch erkannt werden. Die Koordinaten dieser Signale werden in einer projektweiten Liste gesammelt und mit einem eindeutigen Namen identifiziert. Eine halbautomatische Prozedur erlaubt es dem Anwender, korrespondierende Signale an den einzelnen Scanpositionen aufzufinden. Bei diesem Vorgang wird eine erste grobe Ausrichtung der Scanpositionen im PRCS bestimmt (\mathbf{M}_{SOP1} , \mathbf{M}_{SOP2} , . . . , \mathbf{M}_{SOPN}). Diese Grobausrichtung ist üblicherweise ausreichend für eine Visualisierung der Scandaten und für eine Beurteilung, ob noch zusätzliche Scanpositionen zur Abdeckung des Scanobjektes erforderlich sind.

Sofern globale Koordinaten einiger Signale verfügbar sind, kann das PRCS in Bezug auf das GLCS ausgerichtet werden. Diese Signale werden als Passpunkte bezeichnet, während alle übrigen als Verknüpfungspunkte bezeichnet werden. Sind keine Signale verfügbar, so können über manuelles Markieren von Scandaten die erforderlichen Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Dies ist speziell dann hilfreich, wenn keine Signale am Objekt angebracht werden können, z.B. an einem Kirchturm.

Da die Signalkoordinaten aus einem üblichen Scan nur mit grober Auflösung bestimmt werden können, bietet RiSCAN PRO die Möglichkeit, Signale automatisch mit der höchstmöglichen Auflösung zu scannen. Diese sogenannten Feinscans ergeben dann die Signalkoordinaten mit der bestmöglichen Genauigkeit.

Die Kamerabilder können dazu herangezogen werden, bereits kurz nach der Datenaufnahme die Daten in Echtfarbendarstellung zu visualisieren. Dies wird, wie oben bereits erwähnt, möglich, da alle Transformationsmatrizen zwischen lokalen Scandaten und Bilddaten stets bekannt sind.

Die Transformationsmatrizen zur Zusammenführung der Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem (PRCS oder GLCS) bedarf noch einer weiteren Bearbeitung zur Verbesserung der Genauigkeit. Dies wird durch den im Folgenden beschriebenen hybriden Ansatz bewerkstelligt, der alle zur Verfügung stehenden Daten simultan ausgleicht.

3. Softwarepaket ORIENT

ORIENT [3] ist ein Programmsystem, das in erster Linie für strenge Ausgleichungen im Bereich der photogrammetrischen Punktbestimmung geplant wurde. Es wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien entwickelt.

Viele Arten von Beobachtungen und/oder Parametern können simultan behandelt werden. Jene Teilmenge davon, die im Kontext dieser Publikation benötigt wird, betrifft (mathematischer Hintergrund siehe: [2])

- Beobachtungen:
 - Bildpunkte (x,y) stammend aus einem CMCS: PHOTO
 - Polarpunkte (Richtung φ , Zenitwinkel θ , Distanz r) in einem SOCS: POLAR
 - Passpunkte (X,Y,Z), gegeben im PRCS: CONPOI
 - Differenzen von Parametern: ROTPAR=OBS für \mathbf{M}_{COP}
- Parameter:
 - Objektpunkte (X,Y,Z) im PRCS REFSYS
 - Transformations-(Orientierungs)parameter
 - äußere Bezugspunkte (Ursprünge REFSYS der SOCS)
 - Rotationen ROTPAR
 - Zusätzliche Parameter ADPAR
 - für Bilddeformation (Verzeichnung)
 - für Exzentrizität der Montage (vgl. GPS-Antenne bei Aero-triangulation)
 - für Rotationen der Montage (vgl. IMU-Ausrichtungsfehler bei LIDAR)

Das Programmsystem wird mittels einer Kommandosprache kontrolliert, wodurch es sich auch für die Ausführung im Batch-Modus eignet. ORIENT ist als DLL (Dynamic Link Library) mit RISCAN PRO verknüpft, wobei CMD-Dateien als Interface verwendet werden. Die Ausgleichung wird folglich als Black-Box-Modul in einer standardisierten Umgebung durchgeführt. Nur wenige Parameter können durch den Operateur kontrolliert werden.

Robuste Schätzung wird verwendet, um grobe Fehler automatisch aufzuspüren und zu eliminieren.

4. Methode der Hybriden Ausgleichung

4.1. Verbesserte Orientierung

Die Bestimmung eines kompletten Satzes von M_{SOP} -Matrizen kann allein aus Lasermessungen erfolgen oder das alleinige Ergebnis von photogrammetrischen Standardmethoden sein. Es ist jedoch ein naheliegender Vorgang, beide Methoden zu kombinieren, um die Genauigkeit zu verbessern, oder um die Gesamtzeit für die Messung einzuschränken.

Die Erfassung der Signalkoordinaten aus einem Weitwinkel-Laserscan erfolgt aufgrund von zeitlichen Einschränkungen üblicherweise nur mit mäßiger Genauigkeit. Obwohl der Laser prinzipiell auf hochauflösende Datenerfassung programmiert werden kann, würde dies jedoch bei weitem zu viel Zeit in Anspruch nehmen und riesige Mengen an unnötigen Daten in Regionen liefern, wo keine Signale vorhanden sind (was in den meisten Bereichen des Bildes der Fall ist). Eine mögliche Strategie ist es, zunächst grobe Signal-Koordinaten aus dem Scan zu ermitteln und anschließend eine Serie von hochaufgelösten Scans kleiner Dimension durchzuführen, die jeweils gerade ein einzelnes Signal abdecken. Während dies die Messzeit bereits beträchtlich herabsetzt, können sogar noch weitere Einsparungen erzielt werden, indem stattdessen hochaufgelöste Kamerabilder verwendet werden, um Signalkoordinaten mit hinreichender Auflösung zu ermitteln. Die aus dem Laserscan vorhandene grobe Koordinatennäherung kann dazu benützt werden, das Suchgebiet – in diesem Fall – innerhalb des Kamerabildes einzuschränken, sodass eine verlässliche Durchführung auch ohne die Verwendung eines Blitzlichts möglich wäre, welches ansonsten notwendig ist, um die Retro-Signale zu entdecken. Dies teilt die Schritte für Erkennung und Näherungswertbeschaffung zwischen den beiden Technologien auf.

Auf der anderen Seite ist es möglich, die Genauigkeit ohne Einsparung von Messzeit zu verbessern, indem die Daten beider Subsysteme einfach kombiniert und dem Ausgleichsalgorithmus als eine einzige Menge von Daten zugeführt werden.

Beide Ansätze implizieren, dass die Kamera bereits kalibriert wurde. Es könnte noch eine interessante Frage sein, ob dies eine notwendige Voraussetzung ist, oder ob die Kamerakalibrierung aus den Daten gewonnen werden kann, nachdem die Messungen abgeschlossen wurden, indem eine Methode verwendet wird, die jener in der Folge beschriebenen ähnlich ist: Selbstkalibrierung.

4.2. Kamerakalibrierung aus Felddaten

4.2.1. Testfeldkalibrierung

Das Laserscanner-System mit integrierter Kamera, das von der Technik der hybriden Ausgleichung Gebrauch macht, bietet auch die Möglichkeit unabhängig von anderen Messungen in einem selbsterstellten kleinen (einige wenige Punkte) Testfeld Kamerakalibrierungen durchzuführen.

In der traditionellen Photogrammetrie stellte das Einrichten und Aufrechterhalten eines Testfeldes eine mühsame und aufwändige Aufgabe dar. Da es sich um ein Laserscanner-System mit automatisierter Erkennung von Retro-Signalen und Feinscan-Fähigkeiten handelt, das insbesondere die Richtung zu diesen Signalen präzise misst, steht somit ein Instrument zur Verfügung, das die Aufgabe der Bestimmung der Signalkoordinaten mit hinreichender Genauigkeit auf schnellem Weg löst. Da die Kamera nur eine kleine Exzentrizität in Bezug zum Laser-Zentrum aufweist, ist die Distanzgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung.

Somit bestimmt der Laserscanner einerseits die Koordinaten des Testfeldes und löst andererseits die Aufnahme von Photos in bekannte (d.h. gemessene) Blickrichtungen aus. Die Signale werden ebenfalls automatisch bestimmt und in den digitalen Bildern identifiziert, was den Ansatz einer hybriden Ausgleichung von Beobachtungen mit den folgenden Unbekannten erlaubt: alle Objektkoordinaten der Signale, 3 Rotationen der Kameramontage gegenüber dem Scan-Gehäuse, 3 Exzentrizitätskomponenten der Kameramontage (d.h. die relativen Koordinaten des Laser-Zentrums, gezählt im CMCS), 3 Koordinaten der inneren Orientierung, und eine Menge an Verzeichnungscoeffizienten. Beobachtungen sind Polar- und Bildkoordinaten.

Vom ausgleichungstheoretischen Standpunkt gesehen ist dieser Ansatz sehr sauber, da Korrelationen zwischen den Punkten des Testfeldes vermieden werden.

Die Datumsdefinition (d.h. Wahl des PRCS) für diese lokale Ausgleichung wird einfach so gewählt, dass Position und Stellung des SOCS festgehalten werden: PRCS:=SOCS. (Die Datumsdefinition hat keinerlei Einfluss auf die Qualität (Genauigkeit) der Kamerakalibrierung.)

Minimalanforderungen an das Testfeld:

Man könnte ein Testfeld einrichten, wie es für Kamerakalibrierungen mit einem einzigem Standpunkt empfohlen wird: viele Punkte in verschiedenen Entfernungen (Vorder- und Hintergrund), jeweils verteilt über das gesamte Bildformat. Hierbei sind etwa $2*(5*5)$ bis $2*(8*8)$ Signale notwendig, um auch die Verzeichnung verlässlich bestimmen zu können (man könnte jedoch auf viele der nahen inneren Punkte verzichten, ...).

Jedoch kann man sich sogar die meisten dieser Signale sparen: Das Laserscannersystem mit integrierter Kamera erlaubt das virtuelle Duplizieren der Retro-Signale: Angenommen, der Scanner wird mit näherungsweise vertikaler z-Achse des SOCS aufgestellt; des weiteren stelle man sich eine vertikale Ebene vor, die durch den Ursprung des SOCS verläuft und eine Spalte von nahen und weiten Signalen enthält, etwa $2*5$ bis $2*8$ Signale. Man lässt nun den Laser diese wenigen Punkte im PRCS \equiv SOCS bestimmen und ein Bild aufnehmen, was eine M_{COP} ergibt; dann lässt man den Scannerkopf sich um ein $d\varphi$ weiterbewegen, was eine andere $M_{COP}(\varphi)$ ergibt, und nimmt ein weiteres Bild auf. Dieser letzte Schritt wird wiederholt, bis das ganze Bildformat mit einem Raster bedeckt ist, der durch Duplizieren der einzelnen Signal-Spalte entstanden ist.

In der Praxis können diese Signale an einer Hauswand (an der Innenseite von Fensterleibungen – einfacher Zugang) in zwei Vertikalprofilen angeordnet werden; das Laserscanner-Gerät steht in der Nähe dieser Wand, die dann näherungsweise projizierend erscheint.

Diskussion des Zeitaufwands:

Im Standardfall (Raster von beispielsweise $2*(8*8)$ Signalen) benötigt man zahlreiche (in diesem Beispiel: 128) Fein-Scans und nur ein Bild – im virtuellen Fall (eine Spalte von Signalen) braucht man nur einige (im Bsp.: 16) Fein-Scans, jedoch eine Serie (im Bsp.: 8) von Bildern. Falls

man das Bild teilweise auslesen kann (die Untergrenze für die notwendige Spaltenanzahl kann leicht abgeschätzt werden), ist eine weitere Reduzierung der Bearbeitungszeit möglich.

Diskussion der Stabilität:

Für beide Methoden gelten die gleichen Voraussetzungen bezüglich Stabilität des Laserscannersystems mit integrierter Kamera genauso wie für das gewöhnliche Verfahren.

Es sollte betont werden, dass keinerlei zusätzliche Messungen mittels Theodolit oder Totalstation notwendig sind, um die Koordinaten der Passpunkte zu bestimmen.

Man könnte diskutieren, ob die Bestimmung der Montageparameter in M_{mount} ebenfalls zur Aufgabe der Kamerakalibrierung gehört; in jedem Fall sind diese Parameter mit Hilfe der durchgeführten Orientierungsmethode bestimmbar; dennoch muss M_{mount} nach jeder neuerlichen Befestigung der Kamera auf den Laserkopf bestimmt werden, wobei die internen Parameter der Kamera als stabil betrachtet werden [4]. Jedoch sind in diesem Fall nur wenige Ziele notwendig, um die Ausrichtung der Montage durchzuführen, welche dann auf die Rotationskomponenten beschränkt werden kann, falls die Exzentrizität als konstant angenommen werden kann.

4.2.2. Projektbegleitende Kalibrierung (On-The-Job-Calibration)

Die übliche Begriffsauffassung eines Testfeldes ist eine permanente Einrichtung zahlreicher Signale, die mit sehr hoher Genauigkeit eingemessen wurden. Somit sind die Koordinaten dieser Signale üblicherweise gut bekannt, bevor mit der Kamerakalibrierung begonnen wird. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 erwähnt wurde, kann man ein Testfeld (sogar ein temporäres) verwenden, dessen Koordinaten „on the fly“ bestimmt werden. Der Begriff „Projektbegleitende Kalibrierung“ bedeutet in der photogrammetrischen Triangulation, dass im Zuge der Ausgleichung eines Projekts auch die Parameter der inneren Orientierung (einschließlich Verzeichnung) bestimmt werden. Hier (siehe 4.1) handelt es sich um eine ganz ähnliche Situation: Wir verwenden die Anordnung eines Projekts, um auch eine Kamerakalibrierung durchzuführen – projektbegleitend! Vielleicht wurde die Kamera zuvor gar nicht kalibriert; möglicherweise wird die Qualität der Kalibrierung bezweifelt (Temperatur? Erschütterung?). Jedoch kann die vorhandene Anordnung nicht ausreichend sein, um eine umfassende Ka-

librierung zu bekommen, die sogar singuläre Parameter liefert. Nichtsdestotrotz kann das verwendete Ausgleichssystem sogar solche Situationen bewältigen, indem eine Regularisierung durchgeführt wird oder, sogar noch besser, Daten aus einer älteren Kalibrierung als „fiktive“ Beobachtungen der internen Kameraparameter verwendet werden [2]. Daher könnte dieses „projektbegleitende“ Verfahren fortgeschrittenen Anwendern vorbehalten sein, wohingegen die standardisierte Methode aus 4.2.1 als unkritisch betrachtet werden kann.

4.3. Nachverarbeitung

In Anwendungen im Nahbereich ist üblicherweise die Auflösung der Bilddaten am Zielobjekt weitaus höher als die Auflösung der Laserscandaten. Darüber hinaus erscheinen einige Eigenschaften des Zielobjektes ausschließlich in den Bilddaten und nicht in den Scandaten, z.B. Farbanstriche. Ferner weisen die Laserscandaten im allgemeinen höheres Rauschen und geringere Genauigkeit an Kanten und an Details auf, die kleiner als der Durchmesser des Lasermessstrahls sind.

Wenn zum Beispiel eine Fassadenkante in zumindest zwei registrierten und kalibrierten Bildern aufscheint, so kann diese Kante mit photogrammetrischen Methoden mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden. Diese rekonstruierte Kante kann dann zur Verbesserung eines Netzes von Scandaten (Triangulierung) verwendet werden, indem diese Kante als Zwangslinie in das Netz integriert wird.

Ein weiteres Beispiel wäre die präzise Bestimmung der Größe eines Verkehrsschildes, indem aus den Kameradaten die Umrisslinie extrahiert wird und mit der Ebene der Schildes verschnit-

ten wird, wobei die Ebene aus den Scandaten hochgenau bestimmt wird.

5. Zusammenfassung

Die Integration einer Digitalkamera, eines Laserscanners, und einer hybriden Multistationsausgleichung bildet somit ein autarkes System, das die gesamte Prozesskette – einschließlich Kalibrierung – von der Datenerfassung bis zu topologisch strukturierten Oberflächendaten abdeckt, welche auf homogene Weise im Projektrahmen ausgeglichen werden.

Literatur

- [1] Ullrich, A., et al., 2001: Time-of-flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing, In: Optical 3-D Measurement Techniques V, Conference Proceedings, October 1-4 2001, Vienna, p. 2-9.
- [2] Kraus, K., 1997: Photogrammetry, Volume 2: Advanced Methods and Applications, with contributions by J. Jansa and H. Kager, 4th edition, Dümmler/Bonn, ISBN 3-427-78694-3, ch. B.3, ch. C.1.7.
- [3] ORIENT, 2003: ORIENT – An Universal Photogrammetric Adjustment System, Product Information, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient_e.html, (30 Jun. 2003).
- [4] Studnicka, N., Ullrich, A., 2003: Acquisition and merging of laser scan data and high-resolution digital images of a hybrid 3D laser sensor. To appear in: T. Luhmann (Hrsg.) Photogrammetrie und Laserscanning, Heidelberg: Wichmann, 2003.
- [5] PHOCAD, 2003: PHIDIAS #- Das Photogrammetrische Interaktive Digitale Auswertesystem, <http://www.phocad.de/Produkte/PHIDIAS/phidias.htm#Laserscanner>, (30 Jun. 2003).

Adresse der Autoren

Andreas Ullrich und Roland Schwarz: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstrasse 48, A-3580 Horn. email: office@riegl.co.at
Helmut Kager: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F., TU Wien, Gusshausstr. 27-29 / 122, A-1040 Wien. email: helmut.kager@tuwien.ac.at