



Festschrift zum 65 Geburtstag von Prof. Dr. Ing. Bernhard Wrobel
Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, Nov. 2000

Komplexe Sensororientierung

Dr.-Ing. Erwin Kruck

Vorwort

Als ich gefragt wurde, ob ich zur Festschrift zum 65. Geburtstag von Professor Wrobel einen Beitrag liefern möchte, habe ich sehr gern zugestimmt, obwohl ich an sich etwas schreibfaul bin und lange Texte gern lange vor mir herschiebe.

Professor Wrobel war über mehrere Jahre mein Förderer und Lehrmeister in der Photogrammetrie. Dabei hat er mich stets zu strenger und grundsätzlicher Betrachtung aller Fragestellungen angehalten und mich ermuntert offenen Fragen gezielt auf den Grund zu gehen. Diese strengen Betrachtungen entsprachen dabei grundsätzlich meinem Naturell und ich habe mich in meiner Vorgehensweise bestärkt gefühlt. Auch hat Professor Wrobel sich die Zeit für viele gemeinsame Diskussionen genommen. Für all dies bin ich ihm noch heute dankbar und wünsche ihm anlässlich seines Geburtstages und seines offiziellen Ausscheidens aus der Universität für viele Jahre Gesundheit, Lebensfreude und Spaß an seinem Un-Ruhestand.

1. Einleitung

In den Anfängen der Photogrammetrie waren einzelne Bilder oder Modelle mit Hilfe von Paßpunkte zu orientieren. Fortschreitende Computertechnologie bescherte uns die Modell- und die Bündelblockausgleichung. In den letzten Jahren haben sich durch die fortschreitende Entwicklung neue Möglichkeiten eröffnet. Erste Ansätze zur Kombination der Orientierung mit direkt gemessenen Daten der Orientierung in der Bündelausgleichung für terrestrische Aufnahmen stellen Wrobel und Ellenbeck /1976/ vor.

Durch den Einsatz von GPS haben sich dann auch für Luftbildaufnahmen Möglichkeiten der Messung der Aufnahmepositionen ergeben. Einen ersten mathematisch strengen Ansatz hierzu lieferten Kruck, Wübbena und Bagge /1996/. Mit neuen, hochgenauen Inertialmeßsystemen bieten sich erstmals Möglichkeiten, auch die Orientierungswinkel während des Bildfluges direkt zu messen.

All diese Systeme werden nach fester Überzeugung des Verfassers in den nächsten Jahren jedoch keineswegs die Bündeltriangulation ersetzen. Es wird im Gegenteil notwendig sein, die Bündeltriangulation zu erweitern, um diese Systeme absolut und relativ zur Kamera zu kalibrieren und die Beobachtungen in die Ausgleichung mit einzubeziehen.

Nachfolgend werden am Beispiel einer mobilen Aufnahmeeinheit für den Nahbereich die geometrischen Beziehungen der einzelnen Komponenten der Einheit mathematisch dargestellt und die Kalibrierung erläutert. Diese Aufnahmeeinheit ist für den Aufbau von 3D-Stadtmodellen konzipiert. Die dargestellten Beziehungen gelten natürlich gleichermaßen für den Einsatz im Bildflugzeug.

Anschließend zeigt ein praktisches Beispiel erste Resultate einer Anwendung in der Luft, nämlich die Kalibrierung eines Inertialsystems (Inertial Measurement Unit, IMU).

2. Mobile Aufnahmestation für den Nahbereich

Zum flächendeckenden Aufbau von 3D-Stadtmodellen sind zusätzlich zu Luftbildern viele terrestrische Aufnahmen notwendig. Zur Erleichterung der Orientierungsarbeiten und der Auswertungen wird dazu eine moderne Hardware bestehend einer digitalen Meßkamera, einem bildgebenden 3D-Laserscanner, einer IMU und einem GPS-Empfänger zur Bestimmung der Kameraorientierungen vorgeschlagen. Alle diese Sensoren sind auf einer stabilen Plattform montiert und haben eine feste gegenseitige Orientierung.

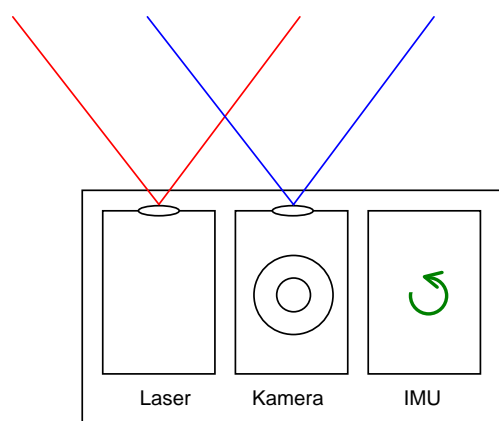


Fig. 1 Grundriß

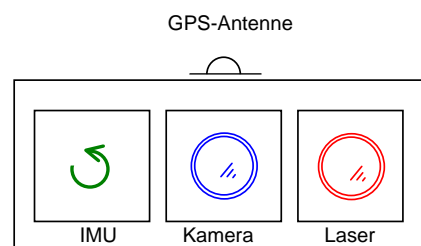


Fig. 2 Frontansicht

Eine solche Ausstattung ermöglicht die geometrische Erfassung von Gebäuden und sonstigen Einrichtungen im Stadtbild und die Überlagerung der Geometrie mit einem Kamerabild. Das Kamerabild wird dazu mit den Entfernungen des Laserscanners zu einem 3D-Objekt kombiniert. Die Orientierungen liefern IMU und GPS. Erfüllen die gelieferten Orientierungsdaten nicht die gestellten Genauigkeitsanforderungen, so können diese Daten in einer Bündeltriangulation verbessert werden.

Montiert man die gesamte Einheit drehbar auf dem Dach eines Fahrzeugs, so entsteht eine mobile Aufnahmeeinheit für den Nahbereich. Selbstverständlich lassen sich auch mehrere Kameras und Laserscanner auf einer Einheit montieren um den Blickwinkel zu erweitern. Mit etwa sechs Kamera/Scanner-Einheiten ist ein Horizontschluß möglich. Auch bei mehreren Kamera/Scanner-Einheiten sind nur eine IMU und ein GPS-Empfänger erforderlich. Augenblicklich wird man sich jedoch aus Kosten- und Gewichtsgründen auf eine Kamera und einen Scanner beschränken.

3. Sensorkalibrierung

Als Bezugssystem für die Kalibrierung wählen wir das äußere Projektionszentrum der Kamera. Prinzipiell ist auch jedes andere Bezugssystem möglich. Die nachstehenden Formeln wären dann entsprechend anzupassen. Die zu kalibrierenden Größen sind die relativen Positionen der GPS-Antenne und des äußeren Projektionszentrum des Lasers zur Kamera, sowie die Ausrichtungen des Lasers und der IMU zur Kamera.

Die relativen Positionen (Exzentrizitätsvektoren) sind in Figur 3 mit \mathbf{e}' bezeichnet. Der Strich zeigt an, dass die Definition im Bildsystem erfolgt ist und mit der Kamera mitdreht. Für die Drehwinkel wird die Drehreihenfolge φ , ω , κ um mitgedrehte Achsen gewählt. Sie werden von der IMU als Beobachtungen geliefert (nach entsprechenden Umrechnungen).

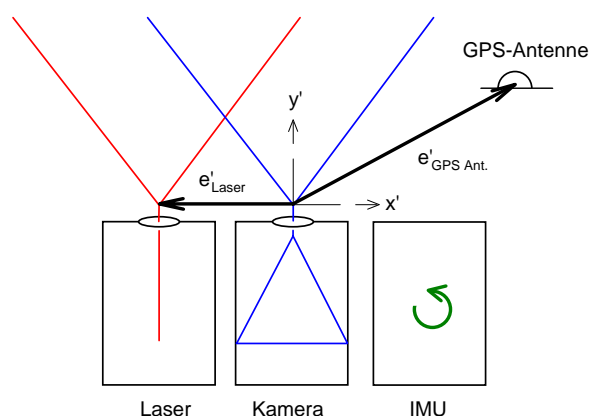


Fig. 3 Exzentrizitätsvektoren

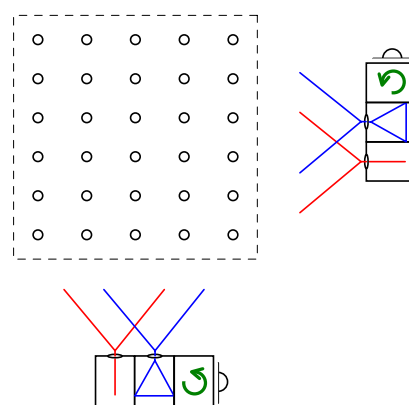


Fig. 4 Testfeldkalibrierung

Die IMU kann aus physikalische Gründen niemals genau achsparallel zum Bildsystem ausgerichtet sein. Daher ist ein Gleichungssystem zu entwickeln, das den festen Zusammenhalt zwischen Kamera (Sensor) und Meßsystem (Instrument) funktional beschreibt und eine simultane Kalibrierung oder Ausgleichung ermöglicht.

Nachfolgend verwendete Indizes bedeuten:

- G** übergeordnetes Gelände-Koordinatensystem
- I** Theodolit oder IMU (Instrument, Inertialmeßeinheit)
- P** Photo oder Bildkoordinatensystem (Photo)
- L** Laser System

Mit dem Instrument **I** werden Winkelwerte für die Orientierung von Meßbildern gemessen und registriert. Es gelten folgende Beziehungen:

$$\text{IMU:} \quad \mathbf{R}_G^I = \mathbf{R}_G^P \cdot \mathbf{R}_P^I \quad (1)$$

$$\text{Laser:} \quad \mathbf{R}_G^L = \mathbf{R}_G^P \cdot \mathbf{R}_P^L \quad (2)$$

- mit
- \mathbf{R}_G^P Drehung von Gelände nach Photo (Bildorientierung)
 - \mathbf{R}_G^I Drehung von Gelände nach Instrument (Meßwerte der IMU)
 - \mathbf{R}_P^I Drehung von Photo nach Instrument (Kalibriergröße)
 - \mathbf{R}_G^L Drehung von Gelände nach Laser

\mathbf{R}_p^L Drehung von Photo nach Laser (Kalibriergröße)

Die Gleichungen 1 und 2 beschreiben vollständig den Zusammenhang zwischen der mit dem Instrument gemessenen Bildorientierung und der Orientierung eines Bildes sowie die Drehungen zwischen Kamera und Lasersystem. Diese Drehmatrizen \mathbf{R}_p^I und \mathbf{R}_p^L sind Konstanten, die sich aufgrund der stabilen Konstruktion nicht verändern.

Nachfolgende Gleichungen beschreiben die gegenseitigen Lagen zwischen Antenne, Photo und Laser:

$$\text{Antenne: } \mathbf{X}_A = \mathbf{X}_p + \mathbf{R}_G^P \cdot \mathbf{e}'_A \quad (3)$$

$$\text{Laser: } \mathbf{X}_L = \mathbf{X}_p + \mathbf{R}_G^L \cdot \mathbf{e}'_L \quad (4)$$

mit

- \mathbf{X}_p Koordinaten des Projektionszentrums des Photos
- \mathbf{X}_A Koordinaten des Phasenzentrums der GPS-Antenne (Meßwert)
- \mathbf{X}_L Koordinaten des Projektionszentrums des Laserscanners
- \mathbf{e}'_A Koordinaten der GPS-Antenne im Bildsystem
- \mathbf{e}'_L Koordinaten der Laserscanners im Bildsystem

Zur Kalibrierung wird ein Testfeld entsprechend Figur 4 angelegt, und die Bildorientierungen der fotografischen Bilder und der Laserbilder durch Bündeltriangulation bestimmt. Weitere Beobachtungen sind die GPS-Antennenkoordinaten und die IMU-Werte. Jede der Gleichungen 1 bis 4 enthält jetzt nur noch eine Unbekannte. Sie können daher nacheinander aufgelöst werden. Gleichung 1 liefert \mathbf{R}_p^I , Gleichung 2 \mathbf{R}_p^L , Gleichung 3 \mathbf{e}'_A und Gleichung 4 \mathbf{e}'_L . Selbstverständlich sollte die Bestimmung all dieser Größen durch gemeinsame Ausgleichung aller Beobachtungen erfolgen. Das Programm BINGO-F kann diese Ausgleichung durchführen und so die Kalibrierdaten ermitteln.

4. Auswertung

Nachdem diese Kalibrierdaten bekannt sind können für weitere Aufnahmen die Bilder der Kamera direkt mit den Entfernungen des Laserscanners zu einem 3D-Objekt mit korrekter räumlicher Orientierung kombiniert werden.

Als Beobachtungen stehen zur Verfügung:

- ☞ Die digitalen Bilder (Pixeldaten)
- ☞ Die Laserdistanzen
- ☞ Die Antennenkoordinaten aus der GPS-Prozessierung
- ☞ Die Orientierungsdaten der IMU

Die Gleichungen 1 bis 4 nacheinander aufgelöst liefern im einzelnen folgende Daten:

- (1) \mathbf{R}_G^P Die Drehung von Gelände nach Photo (Bildorientierung)
- (2) \mathbf{R}_G^L Die Drehung von Gelände nach Laser (Laserorientierung)
- (3) \mathbf{X}_p Die Koordinaten des Projektionszentrums des digitalen Photos
- (4) \mathbf{X}_L Die Koordinaten des Projektionszentrums des Laserscanners

Nach Vorliegen aller notwendigen Orientierungen kann die Kollinearitätsgleichung mit der gemessenen Entfernung auf jeden Punkt des Laserbildes angewendet werden. So entsteht eine 3D-Punktwolke die wiederum mit der Kollinearitätsgleichung in das fotografische Bild zurück transformiert wird (Figur 5). Dabei wird mit den größten Entfernungen begonnen. Die meisten Pixel des Kamerabildes erhalten dabei eine Entfernung zum Objektpunkt zugeordnet. Fehlende Entfernungen können interpoliert werden.

Benachbarte Bilder haben jetzt bereits übereinstimmende Orientierungen und können einfach zusammengefügt werden. Verdeckungen sollten sich aus benachbarten Bildern ergänzen.

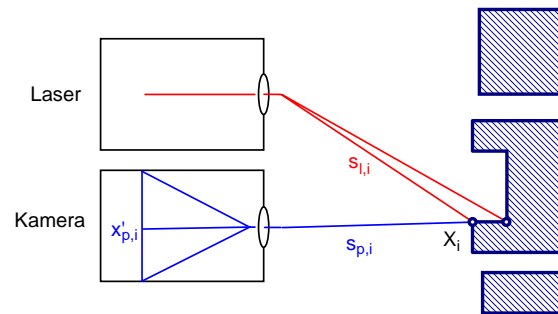


Fig. 5 3D-Projektionen

In weiteren Bearbeitungsschritten sind die Daten zu Filtern und zu Glätten. Weiter sind Kanten und Objekte zu bestimmen und die Punktwolken durch Flächenmodelle zu ersetzen. Diese Prozesse sind jedoch nicht Gegenstand dieses Aufsatzes.

5. Beispiel einer Sensorkalibrierung

Wie bereits oben erläutert sind die dargestellten Formeln sowohl für terrestrische Aufnahmen als auch für Luftbilder geeignet. Nachfolgend soll die Kalibrierung einer IMU relativ zu einer Luftbildkamera gezeigt werden. Dazu ist die Gleichung 1 für den Einsatz in der iterativen Ausgleichung zu linearisieren.

5.1 Linearisierung der Gleichungen

Zur Linearisierung kann eine Matrix deren Drehwinkel auszugleichen sind, aufgespalten werden in einen bekannten Anteil und eine kleine Weiterdrehung, die diese Unbekannten enthält. Bei dieser Weiterdrehung handelt es sich um Winkelwerte, die mit fortschreitenden Iterationen immer kleiner werden. Daher können alle Kosinuswerte durch Eins und alle Sinuswerte durch das Bogenmaß des Winkels ersetzt werden. Durch diese Maßnahme entstehen auf der Diagonalen Einsen, die in die Einheitsmatrix \mathbf{E} exportiert werden. Übrig bleibt eine schiefsymmetrische Matrix $d\mathbf{R}$ mit kleinen Drehungen $d\phi$, $d\omega$ und $d\kappa$.

$$\mathbf{R} = \overset{\circ}{\mathbf{R}} \cdot (\mathbf{E} + d\mathbf{R}) \quad (5)$$

Die Matrix $\overset{\circ}{\mathbf{R}}_p^l$ stellt die Weiterdrehung der Bildmatrix ins System des Instruments dar. Sie enthält die Unbekannten der Kalibrierung zwischen dem Instrument und dem Photo. Die

Matrix \mathbf{R}_G^P enthält die zu ermittelnden Bildorientierungen. Beide Drehmatrizen werden entsprechend Formel 5 aufgespalten. Es entsteht:

$$\mathbf{R}_G^I = \mathring{\mathbf{R}}_G^P \cdot (\mathbf{E} + d\mathbf{R}_G^P) \cdot \mathring{\mathbf{R}}_P^I \cdot (\mathbf{E} + d\mathbf{R}_P^I) \quad (6)$$

Links multipliziert mit $(\mathring{\mathbf{R}}_G^P)^T$:

$$(\mathring{\mathbf{R}}_G^P)^T \cdot \mathbf{R}_G^I = (\mathbf{E} + d\mathbf{R}_G^P) \cdot \mathring{\mathbf{R}}_P^I \cdot (\mathbf{E} + d\mathbf{R}_P^I) \quad (7)$$

Ausmultipliziert und umgestellt:

$$(\mathring{\mathbf{R}}_G^P)^T \cdot \mathbf{R}_G^I - \mathring{\mathbf{R}}_P^I = d\mathbf{R}_G^P \cdot \mathring{\mathbf{R}}_P^I + \mathring{\mathbf{R}}_P^I \cdot d\mathbf{R}_P^I + d\mathbf{R}_G^P \cdot d\mathbf{R}_P^I \quad (8)$$

Der Ausdruck auf der linken Seite enthält nur noch bekannte Größen und Meßwerte. Er wird durch \mathbf{M} substituiert.

Der letzte Summand im Ausdruck ist ein Wert zweiter Ordnung und kann gestrichen werden. So erhält man:

$$\mathbf{M} = d\mathbf{R}_G^P \cdot \mathring{\mathbf{R}}_P^I + \mathring{\mathbf{R}}_P^I \cdot d\mathbf{R}_P^I \quad (9)$$

Diese Gleichung kann in der Ausgleichung verwendet werden. Entsprechend der gewählten Drehreihenfolge sind die Koeffizienten in diesen Matrizen zu definieren. Für *Luftbilder* wird in BINGO-F die Drehreihenfolge φ, ω, κ verwendet. Die Drehwinkel in \mathbf{R}_P^I vom Bildsystem ins System der IMU bezeichnen wir mit α, β, γ . Sie sind die gesuchten Unbekannten der Sensorkalibrierung. Entsprechend den in BINGO-F gewählten Winkeldefinitionen für die Drehmatrizen erhält man:

$$\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -d\kappa & +d\varphi \\ +d\kappa & 0 & -d\omega \\ -d\varphi & +d\omega & 0 \end{vmatrix} \cdot \mathring{\mathbf{R}}_P^I + \mathring{\mathbf{R}}_P^I \cdot \begin{vmatrix} 0 & -d\gamma & +d\alpha \\ +d\gamma & 0 & -d\beta \\ -d\alpha & +d\beta & 0 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Diese Gleichung ist die Basis für die in BINGO-F verwendeten Formeln für die Sensorkalibrierung. Aus ihr lassen sich leicht die einzelnen Beobachtungsgleichungen hinschreiben. Für korrekte Gewichtsansätze wird in BINGO-F die Varianzkomponentenschätzung angewendet.

5.2 Numerische Ergebnisse

Nachfolgende Tabelle zeigt die Kalibrierergebnisse zweier kurzer Bildstreifen bei Leipzig, geflogen mit einer LMK 2000 und einer Aerocontrol IMU von IGI. Die Flüge wurden 1999 an zwei aufeinander folgende Tagen über dem gleichen Gebiet durchgeführt. Für die Bündelausgleichung unter Verwendung von Gleichung 10 standen 9 Paßpunkten zur Verfügung.

Die Restklaffen (Verbesserungen) der Kalibrierung belegen die Leistungsfähigkeit des Systems. Die Wiederholgenauigkeit am folgenden Tage ist jedoch deutlich außerhalb der Standardabweichungen. Die Ursachen hierfür sind noch zu ermitteln.

Nr.	Verbesserungen			Kalibrierte Drehwinkel		
	V α [mgon]	v β [mgon]	v γ [mgon]	α [gon] sa [mgon]	β s β	γ s γ
Streifen 1						
57	-4.3	4.3	8.2	0.4138	0.4797	-0.4183
58	16.4	-9.4	9.7			
59	10.2	-5.4	5.3	4.8	7.0	3.7
60	0.5	-0.2	4.0			
61	5.6	-2.6	-14.5			
62	-13.8	5.3	-8.2			
63	-2.1	10.4	1.4			
64	-6.9	-4.5	-2.8			
65	-5.6	2.1	-3.1			
Streifen 2						
79	4.9	5.9	4.9	0.4278	0.4835	-0.4456
80	-8.0	1.1	3.9			
81	3.9	-1.3	-7.9	4.8	6.9	3.7
82	4.7	3.8	-10.2			
83	11.7	-0.7	-3.5			
84	-5.0	-10.7	-2.3			
85	-4.3	-1.7	5.9			
86	-0.1	-0.8	3.0			
87	-7.6	4.4	6.3			

6. Literatur

- Fröhlich, C., Mettenleiter, M., und Haertl, F.** Active Laser Radar (LIDAR) for measurement of corresponding height- and reflectance images. Europto, European Symposium on Laser and Optics in Manufacturing, Munich, June 16-20, 1997.
- Kruck, E., Wübbena, G. und Bagge, A.:** Advanced Combined Bundle Block Adjustment with Kinematic GPS Data. Presented Paper, ISPRS Comm. III/1, Vienna 1996.
- Kruck, E.:** BINGO-F Benutzerhandbuch
- Wrobel, B. und Ellenbeck, H.:** Terrestrisch-photogrammetrische Punktbestimmung durch Simultanausgleichung gemessener Orientierungsdaten und Bildkoordinaten in der Bündelblockausgleichung. Presented Paper, ISPRS Helsinki 1976.