

DGAP Notes

Dirk Stallmann

23. Mai 2007
DGAP Version 2.4.9

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Mathematisches Modell	2
2.1	Zentralprojektion	2
2.2	Projektive Transformation	3
2.3	Lineares Polynom	3
3	Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen	5
3.1	Ausgleichungsalgorithmus	5
3.2	Standardabweichungen der Beobachtungen	7
3.3	Direkte Beobachtung der unbekannt Parameter	7
3.4	Standardabweichungen der ausgeglichenen Parameter	8
4	Koordinatensysteme	9
5	Erdkrümmungskorrektur	12
6	Refraktion	13
7	Innere Orientierung	14
8	Unbekannte Parameter	15
9	Objektkoordinaten	16
10	Äußere Orientierung	17
10.1	Parametrisierung der Rotationsmatrix	17
10.2	Drehwinkel/Euler-Winkel	18
10.3	Hamilton-Quaternion	19

11	Zusätzliche Parameter	20
11.1	Modell der inneren Orientierung	20
11.2	Modell der radialen Verzeichnung	21
11.3	Modell der tangentialen Verzeichnung	21
11.4	Modell der Deformation der Abbildungsfläche	21
11.5	Modell der Unebenheit der Abbildungsfläche	21
11.6	Orthogonales Polynom nach Ebner	21
11.7	Orthogonales Polynom nach Grün	22
11.8	GAP-Modell	22
11.9	Australis-Modell	22
11.10	Signifikanztest	23
11.11	Differentialquotienten für die innere Orientierung	23
12	Direkte Beobachtung der äußeren Orientierung	26
13	Genauigkeit	28
13.1	Innere Genauigkeit	28
13.2	Äußere Genauigkeit	28
14	Korrelationen	30
15	Programmein- und ausgabe	31
15.1	Konfigurations-/Projekt-Datei	32
15.2	Parameter-/Optionen-Datei	33
15.3	Least-Squares Parameter-/Optionen-Datei	34
15.4	Kamera-Datei	38
15.5	Bilddefinitionsdatei	39
15.6	Bildkoordinaten-Datei	40
15.7	Orientierungsparameter-Datei	41
15.8	Objektkoordinaten-Datei	44
15.9	Control-Support-Datei	45
15.10	Zusatzparameter-Datei	46
15.11	Positionskorrektur-Datei	48
15.12	Lagekorrektur-Datei	48
15.13	Programmaufruf	49
15.14	Programmausgabe	50

16 Installation	51
16.1 Verzeichnisstruktur	51
Literaturverzeichnis	52
A Beispiel	55

Abbildungsverzeichnis

4.1	Reihenfolge der Koordinatentransformationen	11
8.1	Status der Standardabweichungen.	15

Tabellenverzeichnis

3.1	Ausgleichungsmodell	5
3.2	Ausgleichungsalgorithmus	6
15.1	Schlüsselworte der Projektdatei	32
15.2	Parameter-/Optionen	33
15.3	Least-Squares-Parameter-/Optionen	36
15.4	Schlüsselwörter für Längeneinheiten	37
15.5	Schlüsselwörter für Winkeleinheiten	37
15.6	Schlüsselwörter für die Methoden zur Lösung und Inversion des Normalgleichungssystems	37
15.7	Schlüsselwörter für die Methode zur Bildung der partiellen Ableitungen der Zusatzparameter	37
15.8	Rahmenkamera-Parameter	39
15.9	CCD-Kamera	39
15.10	Schlüsselwörter für den Kameratyp	39
15.11	Bilddefinition	40
15.12	Schlüsselwörter für den Bildtyp	40
15.13	Bild-/Pixelkoordinaten	41
15.14	Äußere Orientierung	43
15.15	Schlüsselwörter für die Parametrisierung der Drehmatrix	43
15.16	Vorzeichen von Kamerakonstante und Bildkoordinaten bei PAT-B äquivalenter Ein-/Ausgabe	43
15.17	Objektkoordinaten	44
15.18	Control-Support	45
15.19	Schlüsselwörter für die Objektpunkttyp	45
15.20	Zusatzparameter	47
15.21	Schlüsselwörter und Reihenfolge der Parameter für die Zusatzparameter-Modelle	47
15.22	Positionskorrektur	48

15.23	Lagekorrektur	49
15.24	Optionen beim Programmaufruf	50
16.1	Hauptverzeichnis-Struktur	51

Kapitel 1

Einleitung

Das Programm DGAP (Dirks General Analytical Positioning) implementiert das photogrammetrische Verfahren der Blockausgleichung nach der Bündelmethode. Die Bündelmethode ist ein Verfahren zur gemeinsamen Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung und der Objektpunktkoordinaten. Das Verfahren wird auch Bündelblockausgleichung oder kürzer Bündelausgleichung genannt.

Die Grundlagen des Verfahrens sind in vielen Monographien und Lehrbüchern beschrieben. Kraus (1994), Kraus (1996) und Mikhail u. a. (2001) behandeln alle wesentlichen Bereiche der modernen Photogrammetrie. Atkinson (2001) und Luhmann (2000) konzentrieren sich auf die Nahbereichsphotogrammetrie und Machine Vision. Triggs u. a. (2000) behandelt die Bündelausgleichung aus Sicht der Computer Vision. Viele Aspekte werden dabei erwähnt, u.a. Ausgleichungsrechnung, Parametrisierung, Behandlung großer Matrizen und Netzdesign. Außerdem werden auch die Verbindungen zu Online-Verfahren und Bildzuordnung hergestellt.

Darüber hinaus gibt es eine große Anzahl von Aufsätzen in Zeitschriften und Proceedings: Brown (1976), Granshaw (1980), Grün (1986) und Cooper und Cross (1988).

Kapitel 2

Mathematisches Modell

Als mathematische Grundlage der Bündelausgleichung wird meist die *Zentralprojektion* verwendet. Daneben werden auch die *projektive Transformation* und die einfachere *Affintransformation* verwendet.

2.1 Zentralprojektion

Der Zusammenhang zwischen den Koordinaten des Objektpunktes P und Koordinaten des Bildpunktes P' wird allgemein durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation definiert:

$$\vec{X} = \vec{X}_o + \lambda \mathbf{R} \vec{p} \quad (2.1)$$

wobei

$$\vec{X} = (X, Y, Z)$$

Koordinaten des Objektpunktes P,

$$\vec{X}_o = (X_o, Y_o, Z_o)$$

Translationsvektor mit den Koordinaten des Projektionszentrums O,

λ

Maßstabsfaktor,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

räumliche Rotationsmatrix

$$\vec{p} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

Koordinaten des Bildpunktes P', reduzierte Bildkoordinaten bezogen auf das Projektionszentrum.

Die sich daraus ergebende Kollinearitätsbedingung — Objektpunkt P, Bildpunkt P' und Projektionszentrum O liegen auf einer Geraden — bildet das funktionale Modell für die Ausgleichung. Das Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen den reduzierten Bildkoordinaten \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} und den Objektkoordinaten X , Y , Z . Der mathematische Zusammenhang wird durch folgende Kollinearitätsgleichungen formuliert:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{z} \frac{r_{11} \Delta X + r_{21} \Delta Y + r_{31} \Delta Z}{r_{13} \Delta X + r_{23} \Delta Y + r_{33} \Delta Z} + \Delta x \\ \bar{y} &= \bar{z} \frac{r_{12} \Delta X + r_{22} \Delta Y + r_{32} \Delta Z}{r_{13} \Delta X + r_{23} \Delta Y + r_{33} \Delta Z} + \Delta y \end{aligned} \quad (2.2)$$

mit den Koordinatendifferenzen

$$\Delta X = X - X_o$$

$$\Delta Y = Y - Y_o$$

$$\Delta Z = Z - Z_o$$

und den Einfluss der Zusatzparameter $\Delta x, \Delta y$.

Die neun Elemente der Rotationsmatrix \mathbf{R} enthalten die Richtungscosinus-Werte. Die Rotationsmatrix ist eine orthogonale Matrix, d.h. zwischen den neun Elementen bestehen sechs Beziehungen (Orthogonalitätsbedingungen). Meistens werden die Elemente von \mathbf{R} nicht selbst bestimmt sondern besondere Gruppen von Parametern a_i :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(a_1, a_2, a_3, \dots, a_9),$$

die als Rotationsparameter (engl. rotation parameters) bezeichnet werden. Die Parametergruppen oder Rotationsparameter unterscheiden sich durch folgende Eigenschaften: Parameteranzahl, das Auftreten von Singularitäten, Eindeutigkeit, geometrische Interpretation und Rechenaufwand (siehe Abschnitt 10.1).

Die Terme $\Delta x, \Delta y$ erweitern das einfache zentralprojektive Modell um zusätzliche Parameter. Die zusätzlichen Parameter kompensieren systematische Fehler im Bildraum und erlauben auch eine Kalibrierung der Kamera (siehe Abschnitt 11).

Für eine kompakte Schreibweise werden für Zähler und Nenner folgende Abkürzungen eingeführt:

$$\begin{aligned} u &= r_{11}\Delta X + r_{21}\Delta Y + r_{31}\Delta Z \\ v &= r_{12}\Delta X + r_{22}\Delta Y + r_{32}\Delta Z \\ w &= r_{13}\Delta X + r_{23}\Delta Y + r_{33}\Delta Z . \end{aligned} \tag{2.3}$$

Damit ergibt sich Kollinearitätsgleichung zu

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{z} \frac{u}{w} + \Delta x \\ \bar{y} &= \bar{z} \frac{v}{w} + \Delta y . \end{aligned} \tag{2.4}$$

2.2 Projektive Transformation

Die projektive Transformation ist eine Verallgemeinerung der Zentralprojektion. Das Abbildungsmodell ist auch als *direkte lineare Transformation* (DLT) ((Karara, 1980) und (Kraus, 1996)) bekannt. Bei der projektive Transformation wird ein direkter linearer Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten hergestellt:

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} + \Delta x \\ y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} + \Delta y \end{aligned} \tag{2.5}$$

wobei

x, y (nicht reduzierte) Bildkoordinaten
 L_1, L_2, \dots, L_{11} Transformationsparameter.

2.3 Lineares Polynom

Für hochauflösende Satellitenbilder werden Kameras mit besonders langer Brennweite und sehr kleinen Öffnungswinkel verwendet. Dadurch sind die Bildstrahlen fast parallel und es entsteht eine affine Abbildung, die durch eine *affine Transformation* bzw. ein *lineares Polynom* beschrieben werden kann:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + \Delta x \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z + \Delta y \end{aligned} \tag{2.6}$$

wobei

$a_0, a_1, a_2, a_3, b_0,$ Transformationsparameter.
 b_1, b_2, b_3

Das funktionale Modell in (2.2), (2.5) und (2.6) setzt voraus, dass sich die verwendeten Koordinaten auf ein kartesisches Koordinatensystem (siehe auch Abschnitt 4) beziehen. Diese Voraussetzung ist sowohl bei den Bild- und Objektkoordinaten nicht immer hinreichend genau erfüllt. Durch geeignete 2/3-D-Transformationen sind die Koordinaten eventuell vorher in ein kartesisches Koordinatensystem zu transformieren. Diese Transformationen sind nicht Teil dieser Software. Für die Transformation der Objektkoordinaten steht die *Geodetic Computation Library* (GCL) bereit.

Kapitel 3

Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen

3.1 Ausgleichungsalgorithmus

Die Ausgleichung erfolgt nach vermittelnden Beobachtungen (Gauß-Markov-Modell). Das Ausgleichungsmodell und die Rechenformeln sind in Tabelle 3.1 und 3.2 zusammengestellt (Pelzer, 1985).

$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{v} = \boldsymbol{\varphi}(\hat{\mathbf{X}})$	funktionales Modell
$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$	linearisiertes funktionales Modell
$\boldsymbol{\Sigma}_{ll} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ll}$	stochastisches Modell
wobei $\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}_0 = \mathbf{L} - \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}_0)$ $\mathbf{A} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right)_0$	gekürzter Beobachtungsvektor Designmatrix

Tabelle 3.1: Ausgleichungsmodell

$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_u^{-1} = (1/\sigma_0^2 \Sigma_u)^{-1}$	Gewichtsmatrix
$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$	Normalgleichungsmatrix
$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$	Absolutglied
$\mathbf{N} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{n}$	Lösung des Normalgleichungssystems
$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}}$	geschätzte (ausgegliche) Parameter
$f = n - u$	Anzahl der Freiheitsgrade (Redundanz)
$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{n}^T \hat{\mathbf{x}}$	gewichtete Quadratsumme der Verbesserungen
$\hat{\sigma}_0^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} / f$	a posteriori Varianz der Gewichtseinheit
$\mathbf{v} = \varphi(\hat{\mathbf{X}}) - \mathbf{L}$	Verbesserungen
$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{N}^{-1}$	Inversion
$\Sigma_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{xx}$	Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Parameter

Tabelle 3.2: Ausgleichungsalgorithmus

Da das verwendete funktionale Modell in (2.2) nicht linear ist, wird das Modell durch eine Reihenentwicklung nach Taylor linearisiert.

Diese Implementation verwendet den konventionellen Ansatz. Darin erscheinen die Bildkoordinaten als Beobachtungen \mathbf{L} , und die Koordinaten der Objektpunkte, die Parameter der äußeren Orientierungen und die zusätzlichen Parameter als unbekannte Parameter $\hat{\mathbf{X}}$. Werden kleine Verbesserungen \mathbf{v} an den tatsächlich beobachteten Bildkoordinaten zugelassen führt dieses zu den *nichtlinearen* Verbesserungsgleichungen:

$$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{v} = \varphi(\hat{\mathbf{X}}). \quad (3.1)$$

Die Linearisierung ergibt dann die *linearisierten* Verbesserungsgleichungen

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}_p \hat{\mathbf{x}}_p + \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{A}_a \hat{\mathbf{x}}_a - \mathbf{l}; \quad \mathbf{P} \quad (3.2)$$

mit

\mathbf{v}	Verbesserungen der Bildkoordinaten
$\mathbf{A}_p, \mathbf{A}_t, \mathbf{A}_a$	Designmatrizen der unbekannt Parameter: Objektkoordinaten (Index p), Orientierungsparameter (Index t) und zusätzlichen Parametern (Index a)
$\hat{\mathbf{x}}_p, \hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{x}}_a$	Zuschläge zu den unbekannt Parametern
\mathbf{l}	gekürzter Beobachtungsvektor der Bildkoordinaten
\mathbf{P}	Gewichtsmatrix der Bildkoordinaten.

Wegen der Linearisierung werden nur Zuschläge $\hat{\mathbf{x}}$ zu den genäherten unbekannt Parametern (Näherungswerte) \mathbf{X}_o berechnet. Die gesuchten unbekannt Parameter ergeben sich schließlich mit

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_o + \hat{\mathbf{x}}. \quad (3.3)$$

Und der gekürzte Beobachtungsvektor ergibt sich aus der Linearisierung:

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}_o = \mathbf{L} - \varphi(\mathbf{X}_o). \quad (3.4)$$

wobei

$\mathbf{L} = [x_1, y_1, \dots]^T$	Beobachtungsvektor mit den beobachteten Bildkoordinaten
$\mathbf{L}_o = [x_{1o}, y_{1o}, \dots]^T$	genäherter Beobachtungsvektor mit den genähernten Bildkoordinaten
\mathbf{X}_o	genähernte Parameter.

Da der linearisierte Zusammenhang den tatsächlichen mathematische Zusammenhang nur unvollständig beschreibt, muss der Ausgleichsalgorithmus iterativ angewendet werden. Im neuen Iterationsschritt werden die geschätzten Parameter als neue verbesserte Näherungswerte verwendet:

$$\mathbf{X}_o := \hat{\mathbf{X}}. \tag{3.5}$$

Die Iteration wird abgebrochen wenn die Zuschläge für die unbekannt Parameter kleiner als die Konvergenzkriterien sind oder eine maximale Anzahl von Iterationsschritten erreicht ist.

Als Konvergenzkriterien finden Verwendung:

1. Objektkoordinaten (Index p) $\hat{x}_p < x_{p,lim}$
2. Koordinaten des Projektionszentrums (s) $\hat{x}_s < x_{s,lim}$
3. Drehwinkel oder die entsprechenden Parameter
bei einer anderen Parametrisierung der Rotationsmatrix (r) $\hat{x}_r < x_{r,lim}$

In der Regel sollten die Konvergenzkriterien in maximal 10 Iterationsschritten erreicht sein. Ein Test auf Divergenz findet (bisher) nicht statt.

3.2 Standardabweichungen der Beobachtungen

Den beobachteten Bildkoordinaten L_i wird eine Standardabweichung σ_i zugeordnet. Die Standardabweichungen bzw. Varianzen σ_i^2 sind in der Kovarianzmatrix Σ_{ll} zusammengefasst.

Es wird angenommen — wie allgemein üblich —, dass die Bildkoordinaten voneinander stochastisch unabhängig sind. Die Kovarianzmatrix Σ_{ll} , die Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} und die Gewichtsmatrix \mathbf{P} vereinfachen sich dadurch zu Diagonalmatrizen. Damit sind die Gewichte p_i umgekehrt proportional zu den Quadraten der Standardabweichungen bzw. Varianzen σ_i^2 :

$$\frac{p_i}{p_0} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}.$$

Bei einer *a priori* gegebene Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 mit dem zugehörigen Gewicht $p_0 = 1$ (daher der Name) ergeben sich dann die einzelnen Gewichte p_i zu

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}. \tag{3.6}$$

3.3 Direkte Beobachtung der unbekannt Parameter

Aus Gründen der Flexibilität und allgemeinen Anwendbarkeit werden grundsätzlich alle unbekannt Parameter \hat{X}_i zusätzlich als direkte Beobachtungen eingeführt und ebenfalls eine Standardabweichung σ_i zugeordnet (stochastische Gewichtung). Damit ergeben sich zusätzlich zur Gleichung (3.2) die folgenden Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \mathbf{v}_t \\ \mathbf{v}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_p \\ \hat{\mathbf{x}}_t \\ \hat{\mathbf{x}}_a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_p \\ \mathbf{l}_t \\ \mathbf{l}_a \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \mathbf{P}_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{P}_a \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

mit

$\mathbf{v}_p, \mathbf{v}_t, \mathbf{v}_a$	Verbesserungen der unbekannt Parameter: Objektkoordinaten (Index p), Orientierungsparameter (Index t) und zusätzlichen Parametern (Index a)
$\mathbf{l}_p, \mathbf{l}_t, \mathbf{l}_a$	gekürzter Beobachtungsvektor der unbekannt Parameter
$\mathbf{P}_p, \mathbf{P}_t, \mathbf{P}_a$	Gewichtsmatrix der unbekannt Parameter
\mathbf{I}	Einheitsmatrix.

Der Status eines unbekannt Parameters, ob unbekannt, beobachtet oder eliminiert/fest, kann damit einfach über die zugehörige Standardabweichung bzw. das Gewicht gesteuert werden.

Innerhalb des Ausgleichungsalgorithmus erfolgt keine Unterscheidung der Parameter entsprechend ihrer Standardabweichung. Eine Klassifizierung (state) in eliminierte/festgehaltene (`eliminated/fixed`), beobachtete (`observed`) und unbekannt Parameter wird nur für die Ausgabe vorgenommen. Diese ist abhängig von den Grenzwerten σ_{min} und σ_{max} , die in der Least-Squares Parameter-/Optionendatei gesetzt werden.

3.4 Standardabweichungen der ausgeglichenen Parameter

Die Standardabweichungen der ausgeglichenen/geschätzten Parameter ergibt sich nach

$$\hat{\sigma}_i = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{ii}}. \quad (3.8)$$

Dabei ist $\hat{\sigma}_0$ die a posteriori Standardabweichung der Gewichtsheit und q_{ii} die Diagonalelemente der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} (Kofaktoren).

Kapitel 4

Koordinatensysteme

Wie bereits erwähnt, gilt das funktionale Modell (2.2) strenggenommen nur für kartesische Koordinaten¹. Bei Nahbereichsanwendungen ist diese Voraussetzung in der Regel gegeben. Meistens werden dazu projektbezogene lokale Bezugssysteme definiert. In der Aerotriangulation für Luftaufnahmen und bei der Orientierung von Satellitenaufnahmen liegen die Passpunkte meist in einem Bezugs-/Koordinatensystem der Landesvermessung vor, in dem auch die spätere Auswertung erfolgen soll. Hierbei ist zu beachten, dass die Referenzsysteme für die Lage und die Höhe unterschiedlich definiert sind. Während sich die zweidimensionalen Lagekoordinaten auf ein Referenzellipsoid beziehen, beziehen sich die eindimensionalen Höhen auf das Geoid bzw. das Quasigeoid.

Den Lagekoordinatensystemen liegen geodätischen Abbildungen zugrunde, z.B. die Gauß-Krüger-, UTM- oder Lambert-Abbildung. Dabei wird der Abszissenwert X^L nach Norden positiv und Ordinatenwert Y^L nach Osten positiv gezählt². Bei den Höhensystemen werden meist die orthometrische Höhe H bzw. die Normalhöhe H^N verwendet.

Die geodätischen Abbildungen sind keine kartesischen Koordinatensysteme.

Wenn möglich werden die Landeskoordinaten Y^L , X^L , H bzw. H^N in ein lokales Tangentialsystem transformiert. Dazu wird ein lokales topozentrisches (kartesisches) Koordinatensystem³ definiert, dessen Ursprung (Topozentrum) ϕ_B , λ_B , h_B in etwa in der Mitte des Auswertgebietes liegt. Die positive Z^T -Achse zeigt Richtung der Ellipsoidnormale, die positive Y^T -Achse steht senkrecht auf der Z^T -Achse und liegt in der geodätischen Meridianebene in Nordrichtung. Die positive X^T -Achse steht senkrecht auf der Meridianebene und zeigt nach Osten und vervollständigt so das kartesische Rechtssystem.

Die Transformation zwischen beiden Koordinatensystemen kann streng in vier Schritten erfolgen (siehe Abbildung 4.1):

1. Da unterschiedliche Bezugssysteme für Lage und Höhe verwendet werden erfolgt die Transformation zwischen Landeskoordinaten und ellipsoidischen oder geodätischen Koordinaten ϕ , λ , h getrennt. Für die Lagekoordinaten erfolgt die Transformation gemäß den Abbildungsgleichungen:

$$Y^L, X^L \rightarrow \phi, \lambda. \quad (4.1)$$

¹2-D Koordinatensystem: zwei orthogonal (senkrecht) stehende Koordinatenachsen, positive x - (Abszisse) und y -Achse (Ordinate). Die zwei Achsen bilden in dieser Reihenfolge ein Rechtssystem. 3-D Koordinatensystem: drei paarweise orthogonal stehende Koordinatenachsen, x - (Abszisse), y - (Ordinate) und z -Achse (Applikate). Die drei Achsen bilden in dieser Reihenfolge ein Rechtssystem. Achtung! Dagegen sind geodätische Koordinatensysteme meist als Linkssysteme definiert: die x -Achse (Abszisse) zeigt in die geodätische Nordrichtung, die z -Achse (Höhe) in Richtung der Ellipsoidnormalen und die y -Achse (Ordinate) nach Osten senkrecht auf x und y .

²Um ausschliesslich positive Koordinatenwerte zu erhalten sind oft die Abszissen- und Ordinatenwert modifiziert.

³Diese Koordinatensystem wird im Englischen als Local Space Rectangular (LSR) coordinate system bezeichnet.

Für die Abbildungsgleichungen und ihre Umkehrung siehe z.B. Großmann (1976) oder Heck (1987).

Die Höhenbezugsfläche für die orthometrische Höhe H ist das Geoid; bzw. für die Normalhöhen H^N das Quasigeoid. Der Abstand des Geoids bzw. des Quasigeoids vom Ellipsoid wird als Geoidundulation⁴ N_G bzw. N_{QG} bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen den Höhensystemen ist definiert durch

$$h = H + N_G \quad \text{bzw.} \quad h = H^N + N_{QG}. \quad (4.2)$$

Die Geoidundulationen werden meistens vernachlässigt, da die Werte nicht bekannt sind. Die Vernachlässigung der Geoidundulationen führt zu einer konstanten Höhenverschiebung im Auswertgebiet. Dieser Effekt wird von den Parametern der äusseren Orientierung weitgehend kompensiert.

2. Die Transformation zwischen ellipsoidischen kartesischen und kartesischen Koordinaten X, Y, Z erfolgt mit

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ Z &= [(1 - e^2)N + h] \sin \phi. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dabei ist

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

der Querkrümmungsradius, a die Länge der grossen Halbachse und e die erste numerische Exzentrizität, die das Rotationsellipsoid geometrisch beschreiben. Die Umkehrung der Aufgabe ist etwas aufwändiger. Ein Lösung kann aber recht einfach durch iterative Verfahren gefunden werden (Heck, 1987).

3. Sollen die Koordinaten der Landesvermessung mit Positionen aus GPS-Messungen kombiniert werden ist zu beachten, dass sich die Landeskoordinaten meistens auf ein konventionelles geodätisches Koordinatensystem und die mit GPS bestimmte Positionen auf das dreidimensionale Bezugssystem *World Geodetic System 1984* (WGS84) beziehen. Die kartesischen Koordinaten der beiden Systeme — hier ganz allgemein als System 1 und 2 bezeichnet — X_1, Y_1, Z_1 und X_2, Y_2, Z_2 sind zwar unabhängig vom Bezugsellipsoid, beziehen sich aber auf das Datum des zugrundegelegten geodätischen Koordinatensystems. Die Koordinatensysteme sind daher unterschiedlich in der Lage des Ursprungs, der Achsrichtungen und des Massstabes. Der Datumsbergang erfolgt mit einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter- oder Helmerttransformation):

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + m \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

dabei sind

X_1, Y_1, Z_1	geozentrische Koordinaten im System 1
X_2, Y_2, Z_2	geozentrische Koordinaten im System 2
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Verschiebungsvektor
m	Massstabsfaktor
\mathbf{R}	Rotationsmatrix.

⁴Die Geoidundulation ist abhängig vom gewählten Bezugssystem (Referenzellipsoid und geodätischen Datum).

Die sieben Parameter werden in der Regel mit identischen Punkten in einer Ausgleichung bestimmt. Dabei werden zwei etwas unterschiedliche Transformationsmodelle verwendet, das Bursa-Wolf- oder das Molodenskii-Badekas-Modell (Heck, 1987). Je nach Anzahl der bestimmten Parameter (Üblich sind drei bis sieben Parameter⁵) sind die Parameter beider Modelle etwas unterschiedlich. Beide Modelle sind jedoch äquivalent.

- Die Transformation in das lokale Tangentialsystem (Kraus, 1997) erfolgt mit einer räumliche Verschiebung in den Bezugspunkt $B(X_B, Y_B, Z_B)$ und anschließender Drehung \mathbf{M} :

$$\begin{bmatrix} X^T \\ Y^T \\ Z^T \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_B \\ Y - Y_B \\ Z - Z_B \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

wobei die Drehmatrix definiert ist durch die geodätischen Koordinaten des Bezugspunktes ϕ_B, λ_B :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_B & \cos \lambda_B & 0 \\ -\cos \lambda_B \sin \phi_B & -\sin \lambda_B \sin \phi_B & \cos \phi_B \\ \cos \lambda_B \cos \phi_B & \sin \lambda_B \cos \phi_B & \sin \phi_B \end{bmatrix}. \tag{4.6}$$

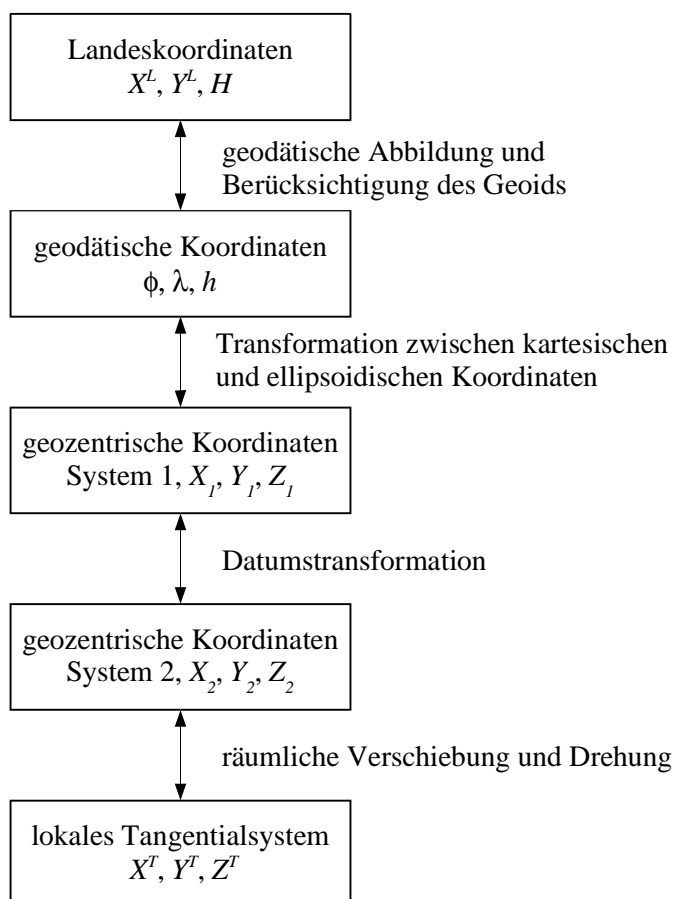


Abbildung 4.1: Reihenfolge der Koordinatentransformationen

⁵Die Anzahl der Parameter kann aufgrund der Bestimmbarkeit der Parameter und aufgrund von Spannungen im Netz der Landesmessung variieren.

Kapitel 5

Erdkrümmungskorrektur

Nur wenn die Landeskoordinaten Y^L , X^L , H direkt verwendet werden, sollte die Erdkrümmung mit berücksichtigt werden. Bei der sogenannten Erdkrümmungskorrektur werden die gegenüber einer Tangentialebene auftretenden Höhendifferenzen als radiale Verzeichnung aufgefasst:

$$\Delta r = -\frac{Hr^3}{2Rf^2} \quad (5.1)$$

wobei

H	Flughöhe
$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$	radialer Abstand des Bildpunktes
R	Erdradius
f	Kammerkonstante

Achtung: Obwohl der Effekt in den Objektkoordinaten auftritt, erfolgt die Korrektur in den Bildkoordinaten! Bei Vertikalaufnahmen ist der Effekt rotationssymmetrisch. Differenzen in den Lagekoordinaten werden dagegen weitgehend durch die Einpassung auf Passpunkte im Rahmen der Bündelausgleichung eliminiert. Oft wird die Erdkrümmungskorrektur zusammen mit der Refraktionskorrektur angebracht.

Die Erdkrümmungskorrektur ist <u>nicht</u> Teil dieses Bündelprogramms.

Kapitel 6

Refraktion

Das mathematische Modell setzt eine geradlinige Ausbreitung des Lichtstrahles voraus. Tatsächlich wird aber der Lichtstrahl durch die atmosphärische Refraktion beeinflusst. Bei Vertikalaufnahmen ist die Auswirkung der Refraktion rotationsymmetrisch und ergibt eine positive Verzerrung. Aber erst bei grossen Flughöhen macht sich die Refraktion bemerkbar. Eine Berücksichtigung des Einflusses findet meistens durch eine Korrektur der Bildkoordinaten vor der eigentlichen Bündelausgleichung statt.

In der Luftbildphotogrammetrie wird die Refraktion vernachlässigt oder durch Korrektur der Bildkoordinaten berücksichtigt. Da meistens keine meteorologische Daten vorliegen werden die Korrekturen aufgrund einer Normalatmosphäre ermittelt. Restliche Anteile werden durch die Orientierungsparameter aufgefangen oder durch Zusatzparameter erfasst.

In der Satellitenphotogrammetrie ist das Strahlenbündel meist sehr schmal und die Strahlen sind fast parallel. Damit ist die Auswirkung für alle Bildstrahlen praktisch gleich. Die Refraktion wird durch die Parameter der äusseren Orientierung kompensiert.

Bei Nahbereichsanwendungen kann auf eine Korrektur verzichtet werden, da sich die Refraktion aufgrund der kurzen Aufnahmeentfernung praktisch nicht auswirkt.

Die Korrektur aufgrund der atmosphärischen Refraktion ist <u>nicht</u> Teil dieses Bündelprogramms.

Kapitel 7

Innere Orientierung

Die Parameter der *inneren Orientierung* — Lage des Bildhauptpunktes x_p, y_p und Kammerkonstante c — werden im Ausgleichungsmodell nicht als unbekannte Parameter bestimmt.

Die Parameter der inneren Orientierung werden als Konstanten behandelt.

Für die Selbstkalibrierung ist es jedoch möglich über zusätzliche Parameter die innere Orientierung zu bestimmen (s. 11). Hierbei werden jedoch nicht die Parameter selbst bestimmt, sondern deren Änderungen $\Delta x_p, \Delta y_p$ und Δc .

Der Zusammenhang zwischen den reduzierten Bildkoordinaten (photo coordinates) $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ und den Bildkoordinaten x, y wird nach Slama u. a. (1980) wie folgt gebildet:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x - x_p \\ \bar{y} &= y - y_p \\ \bar{z} &= -c.\end{aligned}\tag{7.1}$$

Die Daten der inneren Orientierung werden mit der Kamera-Datei eingelesen.

Kapitel 8

Unbekannte Parameter

In der Ausgleichung werden folgende Typen von Parametern bestimmt:

- Objektkoordinaten,
- Orientierungsparameter,
- zusätzliche Parameter und
- Positions- und Lagekorrekturparameter.

Dabei treten die Parameter der Objektkoordinaten und der Orientierung immer als unbekannte Parameter auf. Zusätzliche Parameter, Positions- und Lagekorrekturparameter sind dagegen optional.

Alle unbekannt Parameter werden mit einer Standardabweichung σ_i eingeführt (siehe Abschnitt 3.3). Die Grenzwerte für die Standardabweichungen σ_{min} und σ_{max} legen fest, ob sie als unbekannt (unknown), beobachtet (observed) oder eliminiert/fest (eli minated/ fix ed) klassifiziert werden. (siehe Abbildung 8.1):

eliminiertes/fester Parameter	$0 < \sigma_i < \sigma_{min}$
beobachteter Parameter	$\sigma_{min} \leq \sigma_i \leq \sigma_{max}$
unbekannter Parameter	$\sigma_i > \sigma_{max}$

Diese Grenzwerte σ_{min} und σ_{max} sind frei wählbar.

Zwei weitere wählbare Konstanten legen fest ob die Parameter als eliminierte Parameter $\sigma_{min,u}$ und als unbekannte Parameter $\sigma_{max,u}$ behandelt werden. Für diese Werte gilt $\sigma_{min,u} < \sigma_{min}$ und $\sigma_{max,u} > \sigma_{max}$.

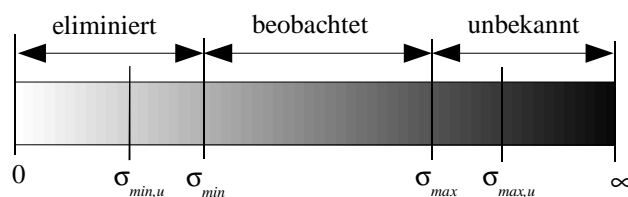


Abbildung 8.1: Status der Standardabweichungen.

Kapitel 9

Objektkoordinaten

Durch die stochastische Behandlung aller unbekannt Parameter findet auch bei den Objektkoordinaten keine explizite Unterscheidung zwischen Neu- und Passpunktkoordinaten¹ statt. Die Objektkoordinaten unterscheiden sich nur durch ihre Standardabweichung bzw. Gewichtung. Nur für die Ausgabe findet eine Klassifizierung statt:

$$\begin{array}{ll} \text{Neupunkt oder Kontrollpunkt} & \sigma_X > \sigma_{max} \wedge \sigma_Y > \sigma_{max} \wedge \sigma_Z > \sigma_{max} \\ \text{Passpunkt (engl. control point)} & \sigma_X < \sigma_{max} \vee \sigma_Y < \sigma_{max} \vee \sigma_Z < \sigma_{max} \end{array}$$

Die Kontrollpunkte werden wie Neupunkte innerhalb der Ausgleichung durch Strahlenschnitt bestimmt. Jedoch liegen für ein, zwei oder alle drei Koordinatenunbekannten Soll-Koordinaten (Vergleichswerte) vor. Die Kontrollpunkte dienen zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit (siehe Abschnitt 13.2).

¹Die Namensgebung für Objektpunkte in der deutschen und englischen Sprache führt manchmal zur Verwirrung: *Paßpunkte* sind *control points* und *Kontrollpunkte* sind *check points*.

Kapitel 10

Äußere Orientierung

Wird als mathematisches Modell die Zentralprojektion verwendet so legen die Koordinaten des Projektionszentrums X_o, Y_o, Z_o (engl. projection centre coordinates) die Position und eine Rotationsmatrix \mathbf{R} (engl. rotation matrix) die Orientierung vom (reduzierten) Bildkoordinatensystem gegenüber dem Objektkoordinatensystem fest. Diese Parameter werden als Elemente der *äußeren Orientierung* bezeichnet.

Für die Parameter der äußeren Orientierung sind zumindest Näherungswerte erforderlich.

10.1 Parametrisierung der Rotationsmatrix

Die neun Elemente der Rotationsmatrix enthalten die Richtungscosinus-Werte. Die Rotationsmatrix ist eine orthogonale Matrix, d.h. zwischen den neun Elementen bestehen sechs Beziehungen (Orthogonalitätsbedingungen).

Meistens werden die Elemente der Rotationsmatrix nicht selbst bestimmt sondern besondere Gruppen von Parametern, die meist allgemein als Rotationsparameter (engl. rotation parameters) bezeichnet werden. Die Parametergruppen oder Rotationsparameter unterscheiden sich durch folgende Eigenschaften: Parameteranzahl, das Auftreten von Singularitäten, Eindeutigkeit, geometrische Interpretation und Rechenaufwand.

Eine Übersicht über die Parametrisierungen gibt Schut (1958/59) und Knickmeyer und Nitschke (1994). Einige übliche Parametrisierungen sind:

- drei Drehwinkel oder Euler-Winkel in verschiedenen Variationen (Goldstein, 1963), (Finsterwalder und Hofmann, 1968), (Schwidefsky und Ackermann, 1976),
- Rodrigues-Parameter (Schwidefsky und Ackermann, 1976),
- Hamilton Quaternion (Schut, 1958/59), (Shoemake, 1994), (Grassia, 1998),
- drei Nebendiagonalelemente der Rotationsmatrix (Schut, 1958/59),
- Drehung um eine spezielle Achse (Rinner, 1957),
- Cayley-Klein-Parameter (Goldstein, 1963),
- Doppelrotationen (Wrobel und Klemm, 1984).

10.2 Drehwinkel/Euler-Winkel

Eine mögliche Parametrisierung besteht in der Verwendung von drei Drehwinkeln. Dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

1. Die *Drehreihenfolge* legt fest in welcher Reihenfolge die Einzeldrehungen erfolgen, z.B. die 1. Drehung um die x -Achse um den Winkel $\omega \rightarrow \mathbf{R}_x(\omega)$, die 2. Drehung um die y -Achse um $\varphi \rightarrow \mathbf{R}_y(\varphi)$, und die 3. Drehung um die z -Achse um $\kappa \rightarrow \mathbf{R}_z(\kappa)$.
2. Ob die Drehungen um *raumfeste* oder *mitgedrehte* Achsen erfolgt. Bei raumfesten Achsen sind die einzelnen Drehungen auf das Ausgangssystem bezogen:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\kappa) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\omega).$$

Dagegen beziehen sich die Drehungen um mitgedrehte Achsen auf das zuvor erreichte Koordinatensystem:

$$\mathbf{R} = \bar{\mathbf{R}}_x(\bar{\omega}) \bar{\mathbf{R}}_y(\bar{\varphi}) \bar{\mathbf{R}}_z(\bar{\kappa}).$$

3. Die positive Drehrichtung im (clockwise **cw**) oder gegen den Uhrzeigersinn (counter clockwise **ccw**) definiert ist.

Vier übliche Parametrisierungen sind implementiert:

- Drehreihenfolge ω - φ - κ um feste Achsen und Drehung im Uhrzeigersinn (siehe Slama u. a. (1980), S. 51, Gl. 2.23, Konecny und Lehmann (1984) S. 101, Heuchel (1994)¹)

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}_z(\kappa) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\omega) = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa & c\omega s\kappa + s\omega s\varphi c\kappa & s\omega s\kappa - c\omega s\varphi c\kappa \\ -c\varphi s\kappa & c\omega c\kappa - s\omega s\varphi s\kappa & s\omega c\kappa + c\omega s\varphi s\kappa \\ s\varphi & -s\omega c\varphi & c\omega c\varphi \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

- Drehreihenfolge ω - φ - κ um mitgedrehte Achsen und Drehung gegen den Uhrzeigersinn (siehe Kraus (1994) Gl. 2.2-4, Schwidefsky und Ackermann (1976) Gl. 1.7c, Finsterwalder und Hofmann (1968) S. 33, Gl. 1.25)

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}_x(\omega) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_z(\kappa) = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa & -c\varphi s\kappa & s\varphi \\ c\omega s\kappa + s\omega s\varphi c\kappa & c\omega c\kappa - s\omega s\varphi s\kappa & -s\omega c\varphi \\ s\omega s\kappa - c\omega s\varphi c\kappa & s\omega c\kappa + c\omega s\varphi s\kappa & c\omega c\varphi \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

- Drehreihenfolge φ - ω - κ um mitgedrehte Achsen und Drehung gegen den Uhrzeigersinn (Kraus (1994) S. 380, Gl. 2.2-1.7, Schwidefsky und Ackermann (1976) Tab. 27.1, Finsterwalder und Hofmann (1968) S. 32, Gl. 1.23, Konecny und Lehmann (1984) S. 101, Rürger u. a. (1978) S. 21, Gl. 2.16a)

$$\mathbf{R}(\varphi, \omega, \kappa) = \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\omega) \mathbf{R}_z(\kappa) = \begin{bmatrix} c\varphi c\kappa + s\varphi s\omega s\kappa & -c\varphi s\kappa + s\varphi s\omega c\kappa & s\varphi c\omega \\ c\omega s\kappa & c\omega c\kappa & -s\omega \\ -s\varphi c\kappa + c\varphi s\omega s\kappa & s\varphi s\kappa + c\varphi s\omega c\kappa & c\varphi c\omega \end{bmatrix} \quad (10.3)$$

¹Im Ausgleichungsmodell verwendet PAT-B die Rodrigues-Matrix.

- um den Richtungswinkel (azimut) α , die Bildneigung (elevation) ν und die Kantung (roll) r in der Drehreihenfolge α - ν - κ um mitgedrehte Achsen und Drehung gegen den Uhrzeigersinn

$$\mathbf{R}(\alpha, \nu, \kappa) = \mathbf{R}_z(\kappa)\mathbf{R}_x(\nu)\mathbf{R}_z(\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha c\kappa + s\alpha s\nu s\kappa & -c\alpha s\kappa + s\alpha s\nu c\kappa & s\alpha c\nu \\ s\alpha c\kappa - c\alpha s\nu s\kappa & -s\alpha s\kappa - c\alpha s\nu c\kappa & -c\alpha c\nu \\ c\nu s\kappa & c\nu c\kappa & -s\nu \end{bmatrix} \quad (10.4)$$

Diese Parametrisierung wird im Programm Australis (Lit.?) verwendet.

wobei $c\varphi$ als Abkürzung für $\cos \varphi$ und $s\varphi$ für $\sin \varphi$, usw. steht.

Der wesentliche Nachteil aller Parametrisierungen durch drei Elemente ist das Auftreten von Singularitäten.

10.3 Hamilton-Quaternion

Die Parametrisierung der Rotation mit dem Hamilton-Quaternion hat den Vorteil, dass diese Parametrisierung keine Singularitäten hat. Ausserdem sind zur Berechnung nur einfache und schnelle Rechenoperationen notwendig und keine trigonometrische Funktionen wie bei der Verwendung von Drehwinkeln. Die Rotationsmatrix hat folgende Form

$$\mathbf{R}(q_0, q_1, q_2, q_3) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (10.5)$$

Mindestens drei voneinander unabhängige Parameter sind notwendig um eine reine Rotationen im dreidimensionalen Euklidischen Raum zu beschreiben. Werden mehr als drei Parameter verwendet, sind diese Parameter nicht alle unabhängig. Für die Quaternion-Elemente gilt die Bedingung:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1. \quad (10.6)$$

Diese Bedingung wird in der Ausgleichung durch eine zusätzliche deterministische oder stochastische Bedingung mit berücksichtigt. Grundsätzliche wäre hier die Verwendung von deterministischen Bedingungen angebracht. Jedoch wird aufgrund der allgemeinen und einfachen Handhabung eine stochastische Bedingung mit einem hohen Gewicht verwendet, z.B. $p_c = 10^6$.

Kapitel 11

Zusätzliche Parameter

Zur Selbst- oder Simultankalibrierung können zusätzliche Parameter oder Zusatzparameter in das Ausgleichungsmodell eingeführt werden:

$$\begin{aligned}\Delta x &= f_x(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) \\ \Delta y &= f_y(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}).\end{aligned}\tag{11.1}$$

Die Zusatzparameter sind dabei oft als Funktionen der reduzierten Bildkoordinaten (7.1) definiert. Jedoch treten damit die beobachteten Bildkoordinaten (x, y) auch auf der rechten Seite der Kollinearitätsgleichung auf. Dadurch wird das funktionale Modell

$$\mathbf{L} + \mathbf{v} = \varphi(\hat{\mathbf{X}})$$

verletzt, denn die Verwendung des Gauß-Markov-Modells setzt eine Trennung von Beobachtungen \mathbf{L} und unbekanntem Parametern $\hat{\mathbf{X}}$ voraus. Für die praktische Anwendung ist diese kleine Unstimmigkeit jedoch ohne Bedeutung.

Es existieren eine Vielzahl von verschiedenen Modellen (Grün, 1976), (Grün, 1986). Allgemein können die Modelle wie folgt eingeteilt werden:

1. physikalischen Modelle aufgrund von physikalisch ableitbaren Parametern, z.B. von Brown (1976),
2. mathematische Modelle ohne physikalische Interpretierbarkeit, z.B. durch orthogonale Polynome nach Ebner (1976) und Grün (1986) und
3. Kombinationen aus (1) und (2), wobei die größten Anteile durch physikalische Modelle und weitere kleinere Anteile durch mathematische Modelle beschrieben werden.

Im Programm DGAP sind folgende Ansätze implementiert:

11.1 Modell der inneren Orientierung

Zur Korrektur der drei Elemente der inneren Orientierung nach Brown (1976) oder Beyer (1992) mit

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \Delta c \\ \Delta y_i &= \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}} \Delta c\end{aligned}\tag{11.2}$$

wobei

$\Delta x_p, \Delta y_p$	Änderung der Bildhauptpunktlage
Δc	Änderung der Kammerkonstante.

11.2 Modell der radialen Verzeichnung

Für die Korrektur der radialen Verzeichnung (engl. symmetric radial distortion) mit den Parametern K_1 , K_2 und K_3 nach Brown (1971) oder Brown (1976):

$$\begin{aligned}\Delta x_r &= \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 \\ \Delta y_r &= \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3\end{aligned}\tag{11.3}$$

mit

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}.$$

11.3 Modell der tangentialen Verzeichnung

Für die Korrektur der tangentialen Verzeichnung (engl. decentring distortion) mit den Parametern P_1 und P_2 nach Brown (1971) oder Brown (1976):

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= (3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) P_1 + 2\bar{x}\bar{y} P_2 \\ \Delta y_d &= 2\bar{x}\bar{y} P_1 + (3\bar{y}^2 + \bar{x}^2) P_2.\end{aligned}\tag{11.4}$$

11.4 Modell der Deformation der Abbildungsfläche

Zur Erfassung der Abweichungen des Bildkoordinatensystems von der Orthogonalität und Gleichmassstäbigkeit der Koordinatenachsen (engl. in-plane distortion) nach Brown (1976):

$$\begin{aligned}\Delta x_f &= \bar{x} a_1 + \bar{y} a_2 + \bar{x}\bar{y} a_3 + \bar{y}^2 a_4 + \bar{x}^2 \bar{y} a_5 + \bar{x}\bar{y}^2 a_6 + \bar{x}^2 \bar{y}^2 a_7 \\ \Delta y_f &= \bar{x}\bar{y} a_8 + \bar{x}^2 a_9 + \bar{x}^2 \bar{y} a_{10} + \bar{x}\bar{y}^2 a_{11} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 a_{12}.\end{aligned}\tag{11.5}$$

11.5 Modell der Unebenheit der Abbildungsfläche

Zur Erfassung der Unebenheiten von Andruckplatte und Film (engl. out-of-plane distortion, unflatness) nach Brown (1976):

$$\begin{aligned}\Delta x_u &= (\bar{x}^2 - \bar{y}^2) s_x a_{13} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 s_x a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4) s_x a_{15} \\ \Delta y_u &= (\bar{x}^2 - \bar{y}^2) s_y a_{13} + \bar{x}^2 \bar{y}^2 s_y a_{14} + (\bar{x}^4 - \bar{y}^4) s_y a_{15}\end{aligned}\tag{11.6}$$

mit

$$s_x = \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \quad \text{und} \quad s_y = \frac{\bar{y}}{\bar{z}}.$$

11.6 Orthogonales Polynom nach Ebner

Ebner (1976) schlägt zur Modellierung von Bilddeformationen bei der Aerotriangulation ein bivariates orthogonales Polynom 2. Grades vor:

$$\begin{aligned}\Delta x_{P12} &= \bar{x} b_1 + \bar{y} b_2 - 2k b_3 + \bar{x}\bar{y} b_4 + l b_5 + \bar{x}l b_7 + \bar{y}k b_9 + kl b_{11} \\ \Delta y_{P12} &= -\bar{y} b_1 + \bar{x} b_2 + \bar{x}\bar{y} b_3 - 2l b_4 + k b_6 + \bar{y}k b_8 + \bar{x}l b_{10} + kl b_{12}\end{aligned}\tag{11.7}$$

mit

$$k = \bar{x}^2 - \frac{2}{3}b^2 \quad \text{und} \quad l = \bar{y}^2 - \frac{2}{3}b^2$$

wobei b die Basis im Bildraum ist.

Die Basis im Bildraum ist abhängig vom Bildformat und bezogen auf die Längsüberdeckung p innerhalb der Flugstreifen. Bei einer Bildformatseitenlänge von $s = 230$ mm und einer in der Aerotriangulation übliche Längsüberdeckung von $p = 60\%$ ergibt sich die Basislänge zu $b = s(1 - p/100) = 92$ mm.

11.7 Orthogonales Polynom nach Grün

Grün (1978) erweitert Ebners Ansatz auf ein Polynom 4. Grades:

$$\begin{aligned} \Delta x_{P44} &= \bar{x} a_1 + \bar{y} a_2 + \bar{x}\bar{y} a_3 + l a_4 - \frac{10}{7}k a_6 + \bar{x}p a_7 + \bar{y}k a_8 + \bar{x}l a_9 + \bar{y}q a_{10} \\ &+ r a_{15} + \bar{x}\bar{y}p a_{16} + kl a_{17} + \bar{x}\bar{y}q a_{18} + s a_{19} + \bar{y}r a_{25} + \bar{x}lp a_{26} \\ &+ \bar{y}kq a_{27} + \bar{x}s a_{28} + lr a_{33} + \bar{x}\bar{y}pq a_{34} + ks a_{35} + \bar{y}qr a_{39} + \bar{x}ps a_{40} + rs a_{43} \\ \Delta y_{P44} &= -\bar{y} a_1 + \bar{x} a_2 - \frac{10}{7}l a_3 + k a_5 + \bar{x}\bar{y} a_6 + \bar{x}p a_{11} + \bar{y}k a_{12} + \bar{x}l a_{13} + \bar{y}q a_{14} \\ &+ r a_{20} + \bar{x}\bar{y}p a_{21} + kl a_{22} + \bar{x}\bar{y}q a_{23} + s a_{24} + \bar{y}r a_{29} + \bar{x}lp a_{30} \\ &+ \bar{y}kq a_{31} + \bar{x}s a_{32} + lr a_{36} + \bar{x}\bar{y}pq a_{37} + ks a_{38} + \bar{y}qr a_{41} + \bar{x}ps a_{42} + rs a_{44} \end{aligned} \quad (11.8)$$

mit

$$\begin{aligned} k &= \bar{x}^2 - \frac{1}{2}b^2, \quad l = \bar{y}^2 - \frac{1}{2}b^2, \quad p = \bar{x}^2 - \frac{17}{20}b^2, \quad q = \bar{y}^2 - \frac{17}{20}b^2, \\ r &= \bar{x}^2(\bar{x}^2 - \frac{31}{28}b^2) + \frac{9}{70}b^4 \quad \text{und} \quad s = \bar{y}^2(\bar{y}^2 - \frac{31}{28}b^2) + \frac{9}{70}b^4. \end{aligned}$$

11.8 GAP-Modell

Implementation der Ansatzes nach Brown (1976) im Bündelprogramm GAP¹ (Beyer, 1992):

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}}\Delta c - \bar{x} s_x + \bar{y} a + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \\ \Delta y &= \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{x} a + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2 \end{aligned} \quad (11.9)$$

wobei

s_x	Maßstabparameter in x
a	Scherungsparameter.

11.9 Australis-Modell

Implementation der Ansatzes nach Brown (1976) im Softwarepaket Australis² (Photometrix, 2001):

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_p - \frac{\bar{x}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \\ \Delta y &= \Delta y_p - \frac{\bar{y}}{\bar{z}}\Delta c + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2 \end{aligned} \quad (11.10)$$

¹General Analytical Positioning — Bündelprogramm des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

²Australis ist ein Programmpaket zur photogrammetrischen Auswertung digitaler Bilder für Nahbereichsanwendungen von Photometrix Pty Ltd.

wobei

b_1	Maßstabparameter in x
b_2	Scherungsparameter.

Die Implementierungen in GAP und Australis sind etwas unterschiedlich. GAP verwendet die Parameter s_x und a und Australis die Parameter b_1 und b_2 , wobei $-s_x = b_1$ aber $a \neq b_2$ ist. Beide Parametersätze sind also etwas unterschiedlich und führen somit zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen.

Die einzelnen Modelle können miteinander kombiniert werden. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Parameter mehrfach auftreten können. Die überflüssigen Parameter sind dann im voraus durch entsprechende Gewichtung zu eliminieren ($\sigma_i = \sigma_{min,u}$).

11.10 Signifikanztest

Für die zusätzlichen Parameter ist ein Signifikanztest obligatorisch. Im zweiseitigen Test für den geschätzten Parameter \hat{X}_i ist die Nullhypothese $H_0: \xi_i - \xi_{0,i} = 0$ und Alternativhypothese $H_1: \xi_i \neq \xi_{0,i}$.

Die Prüfgröße ist:

$$t = \frac{\hat{X}_i - \xi_{0,i}}{\hat{\sigma}_i}. \quad (11.11)$$

Der Ablehnungsbereich beträgt

$$|t| > t_{f,1-\alpha/2} \quad (11.12)$$

und der Annahmehbereich

$$|t| \leq t_{f,1-\alpha/2}. \quad (11.13)$$

$t_{f,1-\alpha/2}$ ist das symmetrische Quantil der t-Verteilung bei f Freiheitsgraden und einer Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$. Für $f > 30$ kann in guter Näherung das Quantil $t_{\infty,1-\alpha/2}$ gewählt werden.

Trifft (11.12) zu ist H_0 zu verwerfen, d.h. der Parameter ist signifikant. Andernfalls ist H_0 anzunehmen, d.h. der Parameter ist nicht signifikant.

Die Parameter werden nach folgenden Regeln gekennzeichnet:

R_1 : $0 < \sigma_i < \sigma_{min}$, der Parameter ist eliminiert oder fest (**eliminated**).

R_2 : $\sigma_i \geq \sigma_{min} \wedge H_0$ verwerfen, der Parameter ist signifikant (**significant**).

R_3 : $\sigma_i \geq \sigma_{min} \wedge H_0$ annehmen, der Parameter ist nicht signifikant (**not significant**).

11.11 Differentialquotienten für die innere Orientierung

Die Beobachtungsgleichungen für die Bildkoordinaten ergeben sich aus der Kollinearitätsgleichung (2.4) und der Definition der reduzierten Bildkoordinaten (7.1) zu

$$\begin{aligned} x &= x_p - c \frac{u}{w} + \Delta x \\ y &= y_p - c \frac{v}{w} + \Delta y. \end{aligned} \quad (11.14)$$

Die Differentialquotienten für die Bildhauptpunktage und der Kamerakonstante sind dann:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial x_p} &= 1 & \frac{\partial x}{\partial y_p} &= 0 & \frac{\partial x}{\partial c} &= -\frac{u}{w} \\ \frac{\partial y}{\partial x_p} &= 0 & \frac{\partial y}{\partial y_p} &= 1 & \frac{\partial y}{\partial c} &= -\frac{v}{w}. \end{aligned} \quad (11.15)$$

Dabei werden die Differentialquotienten für die Kamerakonstante aus den Orientierungsparametern und den Objektpunktkoordinaten gewonnen. Dagegen werden bei Browns-Modellen (11.2), (11.9), (11.10) die Differentialquotienten aus den reduzierten Bildkoordinaten bestimmt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial x_p} &= 1 & \frac{\partial x}{\partial y_p} &= 0 & \frac{\partial x}{\partial c} &= -\frac{\bar{x}}{\bar{z}} \\ \frac{\partial y}{\partial x_p} &= 0 & \frac{\partial y}{\partial y_p} &= 1 & \frac{\partial y}{\partial c} &= -\frac{\bar{y}}{\bar{z}} . \end{aligned} \quad (11.16)$$

Die beiden Ansätze sind für die Differentialquotienten der Kamerakonstanten etwas unterschiedlich. Denn durch Umstellung von (11.14)

$$\begin{aligned} \frac{x - x_p - \Delta x}{-c} &= \frac{u}{w} \\ \frac{y - y_p - \Delta y}{-c} &= \frac{v}{w} \end{aligned}$$

und einsetzen der reduzierten Bildkoordinaten (7.1) ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{\bar{x} - \Delta x}{\bar{z}} &= \frac{u}{w} \\ \frac{\bar{y} - \Delta y}{\bar{z}} &= \frac{v}{w} . \end{aligned}$$

Die Differentialquotienten unterscheiden sich durch den Einfluss der aktuellen zusätzlichen Parameter. Und zusätzlich werden die beobachteten Bildkoordinaten (x, y) durch die Verbesserungen (v_x, v_y) beeinflusst.

In der Regel werden in der Literatur nur die Beobachtungsgleichungen und nicht die Differentialquotienten angegeben. Somit kann oft über die tatsächliche Implementation in der Bündelausgleichung nur spekuliert werden.

Die reduzierten Bildkoordinaten zur Anwendung in Gleichung (11.16) können nach drei verschiedenen Arten gebildet werden:

- (a) Aus den beobachteten Bildkoordinaten (x, y) reduziert auf den Bildhauptpunkt (z.B. Kenefick u. a., 1972, Fryer, 1992 oder Beyer, 1992):

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x - x_p^0 \\ \bar{y} &= y - y_p^0 \\ \bar{z} &= -c^0 . \end{aligned} \quad (11.17)$$

- (b) Aus den beobachteten Bildkoordinaten (x, y) reduziert auf den Bildhauptpunkt und zusätzlich korrigiert um die Näherungswerte für die zusätzlichen Parameter:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x - x_p^0 - \Delta x^0 \\ \bar{y} &= y - y_p^0 - \Delta y^0 \\ \bar{z} &= -c^0 . \end{aligned} \quad (11.18)$$

- (c) Mit den reduzierten Bildkoordinaten gewonnen aus den Näherungswerten der Orientierungsparameter eingesetzt in der Kollinearitätsgleichung (2.2):

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \phi_x(X^0, Y^0, Z^0, X_o^0, Y_o^0, Z_o^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0) \\ \bar{y} &= \phi_y(X^0, Y^0, Z^0, X_o^0, Y_o^0, Z_o^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0) \\ \bar{z} &= -c^0 . \end{aligned} \quad (11.19)$$

In den ersten Iterationsschritten sind die Näherungswerte für die Orientierungsparameter und die Objektpunkte noch recht ungenau, daher können grössere Abweichungen bei Anwendung der Methode (c) auftreten. Die Abweichungen werden aber mit weiteren Iterationsschritten schnell geringer.

Kapitel 12

Direkte Beobachtung der äußeren Orientierung

Bei direkter Beobachtungen der Elemente der äußeren Orientierung, z.B. beobachtete Koordinaten der Projektionszentren (Positionen) aus GPS-Messungen oder beobachtete Lagewinkel der Kamera aus IMU-Messungen, können die Parameter mit einer entsprechenden Standardabweichung σ_i eingeführt oder festgehalten (eliminiert) werden indem $\sigma_i = \sigma_{min,u}$ gesetzt wird.¹

Entweder liegen nur die Positionsdaten (aus GPS-Messungen) vor — man spricht auch von *GPS-gestützter Aerotriangulation* — oder es liegen Positions- und Lagedaten (aus GPS- und IMU-Messungen) vor — in diesem Fall spricht von *direkter Georeferenzierung*.

Die Positionsdaten sind in beiden Fällen auf das Projektionszentrum der Kamera reduziert.² Die IMU ist meist direkt mit der Kamera verbunden und die Exzentrizität zum Projektionszentrum der Kamera kann gemessen oder aus den Konstruktionsdaten abgeleitet werden. Die Lagedaten beziehen sich auf das IMU-Body-System. Der Richtungsunterschied oder Fehlausrichtung (*misalignment or misorientation*) zwischen dem Bildkoordinatensystem der Kamera und dem IMU-Body-System kann in der Bündelausgleichung mit bestimmt werden.

Systematische Abweichungen in den Projektionszentren X_o, Y_o, Z_o werden durch eine Positionskorrektur $\Delta\vec{X}_o(t)$ erfasst. Analog zur Positionskorrektur kann auch eine Lagekorrektur $\Delta\vec{a}(t)$ definiert werden, die auf die Drehwinkel ω, φ, κ wirkt. Die Transformationsgleichung (2.1) wird entsprechend erweitert:

$$\vec{X} = \vec{X}_o + \Delta\vec{X}_o(t) + \lambda\mathbf{R}(\omega + \Delta\omega(t), \varphi + \Delta\varphi(t), \kappa + \Delta\kappa(t))\vec{p}. \quad (12.1)$$

Die zeitabhängigen Korrekturpolynome sind durch unabhängige Polynome n-ten Grades als Funktion des Belichtungszeitpunktes t definiert:

$$f(t) = a_0 + a_1t + \dots + a_nt^n. \quad (12.2)$$

Meistens werden die Polynome auf den 1. Grad (linear) oder 2. Grad (quadratisch) beschränkt. Die Verwendung von Polynomen des Grades $n > 3$ ist wenig sinnvoll da diese Polynome zum Ausschwingen neigen.

¹Die Rohdaten der GPS-Messungen (Pseudo-Code- und Trägerphasen- Messungen beziehen sich auf das Phasenzentrum der GPS-Antenne, während sich die IMU-Messungen (Änderungen der linear und Winkel-Beschleunigungen) auf das IMU-Body-System beziehen. Die GPS- und IMU-Messungen werden meistens zuvor in einem Vorverarbeitungsschritt (z.B. Kalman-Filter) kombiniert.

²Die Exzentrizität zwischen dem Projektionszentrum der Kamera und des Phasenzentrums der GPS-Antenne (Positionsoffset) wird vor der Flugmission durch Theodolitmessungen bestimmt.

Die Positions- und Lagedaten sind auf die GPS-Zeitpunkte t_i bezogen.³ Als Referenzzeitpunkt t_0 wird die kleinste GPS-Zeit verwendet:

$$t_0 = \min(t_1, t_2, \dots, t_n). \quad (12.3)$$

Die Korrekturpolynome selbst sind auf den Zeitunterschied zum Referenzzeitpunkt bezogen:

$$\Delta t = t - t_0. \quad (12.4)$$

Die Korrekturpolynome für die Positionsdaten X_o, Y_o, Z_o sind entsprechend (12.2) definiert durch

$$\begin{aligned} \Delta X_o &= a_0^{X_o} + a_1^{X_o} \Delta t + \dots + a_n^{X_o} \Delta t^n \\ \Delta Y_o &= a_0^{Y_o} + a_1^{Y_o} \Delta t + \dots + a_n^{Y_o} \Delta t^n \\ \Delta Z_o &= a_0^{Z_o} + a_1^{Z_o} \Delta t + \dots + a_n^{Z_o} \Delta t^n \end{aligned} \quad (12.5)$$

wobei

$$\begin{array}{ll} a_0^{X_o}, a_1^{X_o}, \dots, a_n^{X_o} & \text{Positionskorrekturparameter für } X_o \\ a_0^{Y_o}, a_1^{Y_o}, \dots, a_n^{Y_o} & \text{Positionskorrekturparameter für } Y_o \\ a_0^{Z_o}, a_1^{Z_o}, \dots, a_n^{Z_o} & \text{Positionskorrekturparameter für } Z_o. \end{array}$$

Analog zur Positionskorrektur ist die Lagekorrektur definiert durch

$$\begin{aligned} \Delta a_1 &= a_0^{a_1} + a_1^{a_1} \Delta t + \dots + a_n^{a_1} \Delta t^n \\ \Delta a_2 &= a_0^{a_2} + a_1^{a_2} \Delta t + \dots + a_n^{a_2} \Delta t^n \\ \Delta a_3 &= a_0^{a_3} + a_1^{a_3} \Delta t + \dots + a_n^{a_3} \Delta t^n \end{aligned} \quad (12.6)$$

wobei

$$\begin{array}{ll} a_0^{a_1}, a_1^{a_1}, \dots, a_n^{a_1} & \text{Lagekorrekturparameter für } a_1 \\ a_0^{a_2}, a_1^{a_2}, \dots, a_n^{a_2} & \text{Lagekorrekturparameter für } a_2 \\ a_0^{a_3}, a_1^{a_3}, \dots, a_n^{a_3} & \text{Lagekorrekturparameter für } a_3. \end{array}$$

Die Lageparameter a_1, a_2, a_3 sind dabei eine beliebige Parametrisierung mit 3 Rotationsparametern. Für andere Parametrisierungen mit mehr Parametern gilt dieses nicht, da hier neben den Abhängigkeiten zwischen den Rotationsparametern weitere Abhängigkeiten zwischen den Lagekorrekturparametern bestehen.

³Bei der GPS-Auswertung wird — verfahrensbedingt — neben der Position X, Y, Z , die Zeit t im GPS-Zeitsystem bestimmt. Es ist daher naheliegend diese Zeitinformation zu verwenden.

Kapitel 13

Genauigkeit

Die *innere* und *äußere geometrische Genauigkeit* der Bündelausgleichung sind zu unterscheiden. Die innere Genauigkeit ist nur ein Maß dafür, in wie gut das funktionale Modell die verwendeten Daten modelliert. Erst die äußere Genauigkeit erlaubt eine unabhängige Aussage über die Genauigkeit, da hierfür unabhängige externe Werte, die Kontrollpunkte, verwendet werden.

13.1 Innere Genauigkeit

Die innere Genauigkeit wird aus den internen Werten der Ausgleichung, der a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit und der Kofaktormatrix, abgeleitet. Verschiedene Genauigkeitsmaße können abgeleitet werden. Die folgenden Größen sind im Programm implementiert:

- Die Standardabweichung für einzelne Objektkoordinaten:

$$\hat{\sigma}_X = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{XX}}, \quad \hat{\sigma}_Y = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{YY}}, \quad \hat{\sigma}_Z = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{ZZ}} \quad (13.1)$$

wobei

$\hat{\sigma}_0$ a posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit
 q_{XX}, q_{YY}, q_{ZZ} Zugehörige Elemente der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} .

- Das Maximum der Standardabweichung der einzelnen Parameter: $\hat{\sigma}_{X,max}, \hat{\sigma}_{Y,max}, \hat{\sigma}_{Z,max}$.
- Die mittlere (innere) Genauigkeit (average precision):

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_X} \hat{\sigma}_X}{n_X}}, \quad \sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \hat{\sigma}_Y}{n_Y}}, \quad \sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \hat{\sigma}_Z}{n_Z}} \quad (13.2)$$

wobei

n_X, n_Y, n_Z Anzahl der Objektpunktkoordinaten.

13.2 Äußere Genauigkeit

Die äußere geometrische Genauigkeit ergibt sich aus den Koordinatendifferenzen in den Kontrollpunkten:

$$\Delta X = X^* - X, \quad \Delta Y = Y^* - Y, \quad \Delta Z = Z^* - Z \quad (13.3)$$

wobei

X^*, Y^*, Z^* Soll-Koordinaten der Kontrollpunkte
 X, Y, Z geschätzte Koordinaten der Kontrollpunkte.

Aus diesen Differenzen können verschiedene Genauigkeitsmaße abgeleitet werden. Die folgenden Größen sind im Programm implementiert:

- Die einzelnen Koordinatendifferenzen: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$.
- Die maximalen absoluten Koordinatendifferenzen: $|\Delta X|_{max}, |\Delta Y|_{max}, |\Delta Z|_{max}$.
- Die mittleren Differenzen in den Kontrollpunkten:

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^{n_X} \Delta X}{n_X}, \quad \overline{\Delta Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \Delta Y}{n_Y}, \quad \overline{\Delta Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \Delta Z}{n_Z} \quad (13.4)$$

wobei

n_X, n_Y, n_Z Anzahl der Kontrollpunktkoordinaten.

- Die mittleren quadratischen Differenzen (RMS):

$$\mu_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_X} \Delta X^2}{n_X}}, \quad \mu_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Y} \Delta Y^2}{n_Y}}, \quad \mu_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_Z} \Delta Z^2}{n_Z}}. \quad (13.5)$$

Kapitel 14

Korrelationen

Der Korrelationskoeffizient zweier Parameter r_{ij} berechnet sich aus den Elementen der Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{xx} mit

$$r_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii}}\sqrt{q_{jj}}}. \quad (14.1)$$

Ist der Absolutbetrag des Korrelationskoeffizienten größer als 0,8 sollten die zwei Parameter sehr kritisch betrachtet werden, da zwischen beiden Parametern möglicherweise ein Zusammenhang besteht. Zwischen den Objektkoordinaten und den Parametern der äußeren Orientierung sind hohe Korrelation meist nicht zu vermeiden. Dagegen sollten hohe Korrelationen bei den zusätzlichen Parametern vermieden werden, indem einer der Parameter eliminiert wird.

Kapitel 15

Programmein- und ausgabe

Die Programmein- und ausgabe erfolgt über mehrere ASCII-Textdateien im DOS- oder UNIX-Format. Die Dateinamenerweiterung kann zur Kennzeichnung verwendet werden, wird aber vom Programm selbst nicht verwendet. Allgemein gilt:

Alle Dateinamen sind frei wählbar.

Die Textdateien enthalten verschiedene Eingabefelder. Die Eingabefelder sind durch Zwischenraumzeichen¹ voneinander getrennt. Die Eingabefelder werden entsprechend des erwarteten Datentyps interpretiert. Die Eingabedaten können folgende C++ bzw. STL-Datentypen sein:

Datentyp	C++/STL Typ	Beispiel
binäre Zustände	bool	0 1
ganze Zahlen	int	42 -4711
doppeltgenaue Gleitpunktzahlen	double	-123.4 1.0e+31
Zeichenketten	char[], string	abc AP-set

Generell erfolgt das Lesen der Datentypen nach den C/C++-Regeln. Binäre Zustände werden durch 0 (off) und 1 (on) unterschieden. Zeichenketten können keine Zwischenraumzeichen enthalten. Wenn erforderlich muss zur Worttrennung der Unterstrich `_` (underscore) oder das Minus-Zeichen `-` (minus) verwendet werden. Kann der Datentyp nicht gelesen werden erfolgt ein Programmabbruch mit entsprechender Fehlermeldung, wie und wo der Fehler aufgetreten ist. Die Information in der Textdatei endet mit dem Dateiende (EOF) oder mit dem Schlüsselwort `stop-dep`.

Achtung! Es erfolgt in der Regel kein Hinweis wenn die Eingabedaten unvollständig gelesen wurden. Tipp: Daher als erstes die unter `Input data` angegebene Anzahl der eingelesenen Objekte überprüfen.

Objekte: Das Bündelprogramm verwendet für die Datenorganisation bestimmte Objekte. Ähnliche Objekte sind durch eine gemeinsame Klasse definiert, z.B. Bildpunkte, Objektpunkte, Bilder, Kameras, äußere Orientierungen und Sätze von zusätzlichen Parametern.

ID: Zur Kennzeichnung der Objekte werden IDs (engl. identifier) verwendet. Innerhalb einer Klasse muß die ID eindeutig sein. Die IDs sind generell als STL-Zeichenketten (string) implementiert. Es werden ausdrücklich keine Punktnummern für die Kennzeichnung von Punkten verwendet.

¹Standard C Zwischeraumzeichen (white spaces): Leerzeichen (blank), Tabulator (tab), Vertikal-Tabulator (vertical tab), Zeilentrenner (newline), Seitenvorschub (formfeed), Wagenrücklauf (carridge return).

Datenorganisation: Zur Vereinfachung der Datenorganisation können die Objekte auf verschiedene Dateien verteilt werden.

Die im folgenden Text gezeigten Beispieldateien befinden sich im Unterverzeichnis `doc`.

15.1 Konfigurations-/Projekt-Datei

Die Konfigurations- oder Projekt-Datei (`.cfg` oder `.prj`) fasst alle Eingabedateien zusammen. Der zu erwartende Typ der Eingabedatei wird durch ein Schlüsselwort (keyword) festgelegt. Danach wird der Name der Eingabedatei angegeben. Das Schlüsselwort `stop-dep` am Ende der Datei ist optional.

Allgemeine Dateistruktur:

```
<Keyword> <Dateiname>
...
[stop-dep]
```

Schlüsselwort und Dateiname sind durch Leerzeichen voneinander getrennt. Die Information in der Konfigurationsdatei endet mit dem Dateiende (EOF) oder mit dem Schlüsselwort `stop-dep`.

Schlüsselwort	Dateityp
<code>params</code>	Parameter-/Optionen
<code>ls-params</code>	Least-Squares Parameter-/Optionen
<code>camera</code>	Kameradaten
<code>image</code>	Bild-Verknüpfungen
<code>ext-ori</code>	äußere Orientierungen
<code>image-crds</code>	Bildkoordinaten
<code>obj-crds</code>	Objektkoordinaten
<code>ctrl-supp</code>	Control Support
<code>ap-set</code>	zusätzliche Parameter
<code>pos-cor</code>	Positionskorrektur-Parameter
<code>att-cor</code>	Lagekorrektur-Parameter
<code>stop-dep</code>	Dateiende

Tabelle 15.1: Schlüsselworte der Projektdatei

Beispiel: `test.cfg`

```
params          test.pr
ls-params       test.lsp
camera          test.ca
image           test.im
image-crds      test.ic
ext-ori         test.eo
obj-crds        test.oc
stop-dep
```

15.2 Parameter-/Optionen-Datei

In der Parameter-/Optionen-Datei (.pr) können verschiedene Parameter und Optionen gesetzt werden. Mit Ausnahme der Einzelstrahl-Option beeinflussen die Parameter und Optionen nur die Ausgabe und nicht das Ergebnis der Ausgleichung.

Allgemeine Dateistruktur:

```
<rray_opt>
<pr_chk_appr> <pr_chk_rays> <pr_inter> <pr_ic>
<pr_obj_crds> <pr_ext_ori> <pr_ap_sets> <pr_pos_cor> <pr_att_cor>
<db_upari> <db_inter>
<pr_aps_nx> <pr_aps_ny>
<fname_normal_matrix_struct>
<fname_normal_matrix>
<fname_right_side_vector>
<fname_right_side_vector>
<fname_solution_vector>
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Voreinst.
<rray_opt>	bool	Einzelstrahl-Option	0
<pr_chk_appr> <pr_chk_rays> <pr_inter> <pr_ic>	bool	Ausgabe von Näherungswerten der Kontrollpunkte, Anzahl der Bildstrahlen pro Punkt wird ausgegeben, Resultate der Neupunkte werden angezeigt, Ausgabe der beobachteten Bildkoordinaten	0 0 0 0
<pr_obj_crds> <pr_ext_ori> <pr_ap_sets> <pr_pos_cor> <pr_att_cor>	bool	Ausgabe der unbekannt Parameter in jeder Iteration: Objektkoordinaten, Orientierungsparameter, Zusatzparameter, Positions- und Lagekorrekturparameter	0 0 0 0 0
<db_upari> <db_inter>	bool	Ausgabe UPARI-Tabelle, Ausgabe der Resultate des Vorwärtsschnitts	0 0
<pr_aps_nx> <pr_aps_ny>	int	Ausgabe der Effekte der Zusatzparameter, Anzahl der Gitterpunkte in x und y Richtung	0 0
<fname_normal_matrix_struct>	string	Ausgabedateiname der Normalgleichungsstruktur	none
<fname_normal_matrix>	string	Ausgabedateiname der Normalgleichungsmatrix	none
<fname_right_side_vector>	string	Ausgabedateiname der rechten Seite	none
<fname_solution_vector>	string	Ausgabedateiname des Lösungsvektors	none

Tabelle 15.2: Parameter-/Optionen

Bei gelöschter Einzelstrahl-Option (engl. single ray option) <rray_opt> werden alle Objektpunkte, die

nicht durch mindestens zwei Strahlen bestimmt sind von der Ausgleichung ausgeschlossen. Durch Setzen der Option werden auch Strahlen zu einen Objektpunkt erlaubt, sofern dieser Punkt ein Passpunkt ist. Erst die gesetzte Option ermöglicht den einfachen räumlichen Rückwärtsschnitt.

Durch die Optionen `pr_` (print) und `db_` (debug) wird nur die Ausgabe durch zusätzliche Informationen erweitert. Das Ergebnis der Bündelausgleichung wird dadurch nicht beeinflusst.

Verschiedene Optionen können auch über den Kommandoaufruf beeinflusst werden (siehe Programm-Option `-help` in Abschnitt 15.13).

Die Ausgabe des Einflusses der Zusatzparameter auf die Bildkoordinaten wird durch die Angabe der Anzahl der Gitterpunkte gesteuert. Ist die Anzahl der Gitterpunkte in x- (`<pr_aps_nx>`) oder y-Richtung (`<pr_aps_ny>`) gleich null erfolgt keine Ausgabe².

Wird als Dateiname der Ausdruck `none` gewählt erfolgt keine Ausgabe. Die Ausgabe der Normalgleichungsstruktur erfolgt als Bitmap im "plain" PBM-Format.

Beispiel: `test.pr`

```
1
0 0 1 1
0 1 0 0 0
0 0
0 0
none
none
none
none
```

15.3 Least-Squares Parameter-/Optionen-Datei

Die Kleinste-Quadrate-Ausgleichung (least-squares adjustment) wird durch die Least-Squares Parameter-/Optionen-Datei (`.lsp`) gesteuert.

Allgemeine Dateistruktur:

```
<sigma0>
<max_iter>
<chk_obj> <chk_pcc> <chk_rot> <chk_geo>
<conv_obj> <conv_pcc> <conv_rot> <conv_geo>
<smin> <smax>
<smin_u> <smax_u>
<unksup_wt> <constr_wt>
<ccoef_lim>
<incr_crd> <incr_rot>
<t_quantil>
<atpv_lim>
<res_lim>
<unit_objc> <unit_angle>
<adj_interface>
```

²Die Programmooption `-pr_aps_infl` ist veraltet.

<ap_derivs>

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Voreinst.
<sigma0>	double	a priori Standardabweichung der Gewichtsheit in m	10^{-6} m
<max_iter>	int	maximale Anzahl der Iterationen	10
<chk_obj> <chk_pcc> <chk_rot> <chk_geo>	bool	Konvergenzoptionen für Objektkoordinaten, Projektionszentren, Drehwinkel und ...	0 0 1 1
<conv_obj> <conv_pcc> <conv_rot> <conv_geo>	double	Konvergenzgrenzen für Objektkoordinaten, Projektionszentren, Drehwinkel in m bzw. rad	0.001 0.001 10^{-6} 10^{-8}
<smin> <smax>	double	Unterer und oberer Grenzwert der Standardabweichungen σ_{min} , σ_{max} für beobachtete Parameter	10^{-30} 10^{+30}
<smin_u> <smax_u>	double	Standardabweichungen für unbekannte bzw. eliminierte/feste Parameter $\sigma_{min,u}$, $\sigma_{max,u}$	10^{-31} 10^{+31}
<unksup_wt> <constr_wt>	double	Gewichte für die Eliminierung von unbekanntem Parametern und für Bedingungsgleichungen	10^{-10} 10^{-10}
<ccoef_lim>	double	Ausgabelimit für Korrelationskoeffizienten	0.8
<incr_crd> <incr_rot>	double	Inkmente für numerisches Differenzieren für Objektkoordinaten- und Drehwinkel-Parameter in m bzw. rad	10^{-0} 10^{-3}
<t_quantil>	double	Quantil der t-Verteilung $t_{\infty,1-\alpha/2}$ für Signifikanztests bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α	1.96
<atpv_lim>	double	Grenzwert für die Probe der Ausgleichung $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{0}$	10^{-4}
<res_lim>	double	Grenzwert für die Ausgabe von Verbesserungen der Bildkoordinaten in m	10^{-5}
<unit_objc> <unit_angle>	string	Einheiten bei der Ausgabe für Objektkoordinaten und Drehwinkel-Parameter (Schlüsselwort)	m rad
<adj_interface>	string	Schlüsselwort für die Bibliothek zur numerischen Lösung linearer Gleichungssysteme	native
<ap_derivs>	string	Schlüsselwort für die Methode zur Bildung der partiellen Ableitungen der Zusatzparameter siehe Tabelle 15.7	image-coords-plus-aps

Tabelle 15.3: Least-Squares-Parameter-/Optionen

Die Konvergenzoptionen geben an, für welche unbekanntem Parameter die Konvergenzgrenzen überprüft werden sollen: für die Objektpunktkoordinaten, die Koordinaten des Projektionszentrums und die Drehwinkel.

Gültige Schlüsselwörter für die Einheiten der Objektkoordinaten sind in Tabelle 15.4 und für die Drehwinkel in Tabelle 15.5 zu finden.

Schlüsselwort	Einheit
um	Mikrometer
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
m	Meter

Tabelle 15.4: Schlüsselwörter für Längeneinheiten

Schlüsselwort	Einheit
rad	Radiant (radiant)
deg	Grad (degree)
gon	Gon (gon/grads)

Tabelle 15.5: Schlüsselwörter für Winkeleinheiten

Für die numerische Lösung linearer Gleichungssysteme (Lösung des Gleichungssystems und Inversion der Normalgleichungsmatrix) werden standardmäßig die Funktionen der GenLib2-Bibliothek (**native**) verwendet. Zur schnelleren Berechnung können die LAPACK-Routinen³ (**lapack**) verwendet werden. Bei der Verwendung der LAPACK-Routinen muss das Programm entsprechend übersetzt und montiert (gelinkt) werden.

Schlüsselwort	Methode
native	GenLib2-Bibliothek
lapack	LAPACK/BLAS-Bibliothek

Tabelle 15.6: Schlüsselwörter für die Methoden zur Lösung und Inversion des Normalgleichungssystems

Schlüsselwort	Methode
image-coords	aus beobachteten Bildkoordinaten nach Gl. (11.17)
collinear-equation	aus der Kollinearitätsgleichung nach Gl. (11.18)
image-coords-plus-aps	aus beobachteten Bildkoordinaten und Zusatzparameter nach Gl. (11.19)

Tabelle 15.7: Schlüsselwörter für die Methode zur Bildung der partiellen Ableitungen der Zusatzparameter

Beispiel: `test.lsp`

```

6.0e-6
10
0 0 1 0
0.001 0.001 1.57e-6 1e-8
1e-30 1e+30
1e-31 1e+31
1e+10 1e+10

```

³Linear Algebra PACKage: LAPACK ist eine Bibliothek von FORTRAN-77-Unterprogrammen zur Lösung von Problemen der linearen Algebra. Das Packet ist bei NETLIB (<http://www.netlib.org>) frei erhältlich. Durch die Verwendung von BLAS-Routinen für die elementaren Matrix- und Vektor-Operationen ist LAPACK einfach transportabel. Da die BLAS Routinen auf vielen Plattformen optimiert zur Verfügung stehen, ist seine Leistung auf allen diesen Maschinen nahezu optimal.

```

0.80
1e0  1e-3
1.96
1e-4
0.
m  gon
lapack
image-coords-plus-aps

```

15.4 Kamera-Datei

In dieser Datei werden die verwendeten Kamera-Parameter definiert. Dazu gehört neben den Parametern der inneren Orientierung, die Grösse des Bildformats bzw. (CCD-)Sensors. Ausserdem bestimmt die Kamera den Typ der Bildkoordinaten: (metrische) Bildkoordinaten oder Pixelkoordinaten. Dafür sind zwei Typen von Rahmenkameras definiert: Rahmen- und CCD-Kameras (siehe Tabelle 15.10). Die CCD-Kamera ist von der Rahmenkamera abgeleitet. Jedoch ist bei der CCD-Kamera das Bildformat durch die Anzahl und Grösse der Pixel zu ersetzen.

Es können mehrere Kameras in einer Datei definiert sein. Das Schlüsselwort `stop-dep` am Ende der Datei ist optional.

Achtung! Die Kamera muss vor dem Lesen der Bildkoordinaten definiert sein.

Allgemeine Dateistruktur für Rahmenkameras:

```

<camera_typ>
<camera_id> <camera_name>
<focal_len> <xp> <yp>
<sx> <sy>
...
[stop-dep]

```

Allgemeine Dateistruktur für CCD-Kameras:

```

<camera_typ>
<camera_id> <camera_name>
<focal_len> <xp> <yp>
<nc> <nr>
<sc> <sr>
...
[stop-dep]

```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<code>camera-frame</code>	string	Kameratyp	-
<code><camera_id></code>	string	Kamera-ID zur Identifizierung der Kamera	-
<code><camera_name></code>	string	Kamera-Name	-
<code><focal_len></code>	double	Kamerakonstante	mm
<code><xp> <yp></code>	double	Koordinaten des Bildhauptpunktes	mm

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<sx> <sy>	double	Bildformat	mm
-----------	--------	------------	----

Tabelle 15.8: Rahmenkamera-Parameter

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
camera-ccd	string	Kameratyp	-
<camera_id>	string	Kamera-ID zur Identifizierung der Kamera	-
<camera_name>	string	Kamera-Name	-
<focal_len>	double	Kamerakonstante	mm
<xp> <yp>	double	Koordinaten des Bildhauptpunktes	mm
<nc> <nr>	int	Anzahl der Spalten (columns) und Zeilen (rows) des CCD-Sensors	Pixel
<sc> <sr>	double	Pixelgröße in Spalten- und Zeilenrichtung	µm/Pixel

Tabelle 15.9: CCD-Kamera

Schlüsselwort	Kameratyp
camera-frame	Rahmenkamera
camera-ccd	CCD-Kamera.

Tabelle 15.10: Schlüsselwörter für den Kameratyp

Beispiel: test.ca

```
camera-frame
101  RMK
150.000  0.000  0.000
230.  230.
stop-dep
```

15.5 Bilddefinitionsdatei

In der Bilddefinitionsdatei (.im) werden die Beziehungen zwischen den Bildern, Stationen (äußere Orientierungen) und Kameras definiert. Das Schlüsselwort `stop-dep` am Ende der Datei ist optional.

Allgemeine Dateistruktur:

```
<image_type> <image_id> <station_id> <camera_id>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung
<image_type>	string	Bildtyp. Schlüsselwort siehe Tabelle 15.12
<image_id>	string	Bild-ID zur Identifizierung des Bildes

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<station_id>	string	Stations-ID zur Identifizierung der Station
<camera_id>	string	Kamera-ID zur Identifizierung der Kamera

Tabelle 15.11: Bilddefinition

Schlüsselwort	Bildtyp
image-frame	frame image

Tabelle 15.12: Schlüsselwörter für den Bildtyp

Beispiel: test.im

```
image-frame 1 1 101
image-frame 2 2 101
stop-dep
```

15.6 Bildkoordinaten-Datei

Die Bildkoordinaten-Datei (.ic) enthält nur die Bildkoordinaten und ihre Standardabweichungen. Mit dem Maßstabfaktor können die Bild-/Pixelkoordinaten skaliert werden, denn oft werden die Bildkoordinaten in μm angegeben. Die Bildkoordinaten und ihre Standardabweichungen werden in Abhängigkeit von dem zuvor definierten Kameratyp erwartet:

Kameratyp	Bildkoordinaten
Rahmenkameras	metrische Bildkoordinaten
CCD-Kameras	Pixelkoordinaten

Am Ende jedes Bildes steht das Schlüsselwort `stop-dep` oder `-1`. Danach folgen die Daten für das nächste Bild. Das zweite Schlüsselwort `stop-dep` am Ende der Daten ist optional.

Allgemeine Dateistruktur:

```
<image_id> <scale>
<point_id> <x> <y> <sx> <sy>
...
stop-dep
```

```
<image_id> <scale>
<point_id> <x> <y> <sx> <sy>
...
stop-dep
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
-----------	----------	--------------	---------

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<image_id>	string	Bild-ID	-
<scale>	double	Maßstabfaktor für die Bild-/Pixelkoordinaten	keine
<point_id>	string	Punktname	-
<x> <y>	double	Bildkoordinaten	m oder Pixel
<sx> <sy>	double	Standardabweichungen	m oder Pixel

Tabelle 15.13: Bild-/Pixelkoordinaten

Beispiel: test.ic

```

1  1e-3
  11  16.012  79.963  0.006  0.006
  13  88.560  81.134  0.006  0.006
  31  13.362 -79.370  0.006  0.006
  33  82.240 -80.027  0.006  0.006
  12  51.758  80.555  0.006  0.006
  21  14.618  -0.231  0.006  0.006
  22  49.880  -0.782  0.006  0.006
  23  86.140  -1.346  0.006  0.006
  32  48.035 -79.962  0.006  0.006
stop-dep

2  1e-3
  11 -73.930  78.706  0.006  0.006
  13  -5.252  78.184  0.006  0.006
  31 -79.122 -78.879  0.006  0.006
  33  -9.887 -80.089  0.006  0.006
  12 -39.953  78.463  0.006  0.006
  21 -76.006   0.036  0.006  0.006
  22 -42.201  -1.022  0.006  0.006
  23  -7.706  -2.112  0.006  0.006
  32 -44.438 -79.736  0.006  0.006
stop-dep
stop-dep  (Alles was hinter dieser Zeile folgt wird ignoriert!)

4711  0.035  0.962  0.006  0.006

```

15.7 Orientierungsparameter-Datei

Die Orientierungsparameter-Datei (.eo) enthält die Parameter der äußeren Orientierung — die Koordinaten des Projektionszentrums und die drei Drehwinkel — sowie ihre Standardabweichungen.

Der Steuerungsparameter `<sdev-type>` gibt an, ob die Standardabweichungen individuell für jede Station oder gemeinsam für alle Stationen gegeben sind. Bei der Einstellung individuelle Standardabweichungen `indiv-type` folgen nach den Orientierungsparametern die Standardabweichungen:

```
indiv-type
<eo_type>
<station_id> <unit_angle> <time_flag> <matrix_flag>
[<time> ]<Xo> <Yo> <Zo>
<sXo> <sYo> <sZo>
<a1> <a2> <a3>
<sa1> <sa2> <sa3>
...
[stop-dep]
```

Dagegen folgen bei der Einstellung gemeinsame Standardabweichungen auf das Schlüsselwort `common-type` und die gemeinsamen Standardabweichungen für alle Orientierungsparameter:

```
common-type
<eo_type> <unit_angle> <time_flag> <matrix_flag>
<sXo> <sYo> <sZo>
<sa1> <sa2> <sa3>

<station_id> [<time> ]<Xo> <Yo> <Zo> <a1> <a2> <a3>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<code><sdev_type></code>	string	Standardabweichungen individuell (<code>indiv-type</code>) oder gemeinsam (<code>common-type</code>) gegeben	-
<code><eo_type></code>	string	Parametrisierung der Drehwinkel. Schlüsselworte siehe Tabelle 15.15	-
<code><uangle></code>	string	Einheit für die Drehwinkel. Schlüsselworte siehe Tabelle 15.5	-
<code><time_flag></code>	bool	Flag ob (GPS-)Zeit nicht vorhanden (0) oder vorhanden (1)	-
<code><matrix_flag></code>	bool	Flag ob Drehwinkel (0) oder Drehmatrix (1) gegeben: <code><r11></code> , <code><r12></code> , ... <code><r33></code>	-
<code><station_id></code>	string	Stations-ID zur eindeutigen Identifizierung der Orientierungsparameter	-
<code><time></code>	double	Optionale (GPS-)Zeit	s
<code><Xo> <Yo> <Zo></code>	double	Koordinaten des Projektionszentrums	m
<code><sXo> <sYo> <sZo></code>	double	Standardabweichungen der Koordinaten des Projektionszentrums	m
<code><a1> <a2> <a3></code>	double	Drehwinkel	entsprechend <code><uangle></code>

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<sa1> <sa2> <sa3>	double	Standardabweichungen der Drehwinkel	entsprechend <uangle>
-------------------	--------	-------------------------------------	--------------------------

Tabelle 15.14: Äußere Orientierung

Schlüsselwort	Parametrisierung	Anzahl der Parameter	siehe Seite
ext-ori-opk-fix	Drehwinkel ω - φ - κ um feste Achsen	3	18
ext-ori-opk-rot	Drehwinkel ω - φ - κ um mitgedrehte Achsen	3	18
ext-ori-pok-rot	Drehwinkel φ - ω - κ um mitgedrehte Achsen	3	18
ext-ori-australis	φ - ω - κ	3	19
ext-ori-quaternion	Hamilton-Quaternion	4	19

Tabelle 15.15: Schlüsselwörter für die Parametrisierung der Drehmatrix

Beispiel: test.eo

indiv-type

```
ext-ori-pok-rot 1 gon 0 0
5000.765 5027.343 1997.357
1e+31 1e+31 1e+31
0.00000 0.00000 6.56071
1e+31 1e+31 1e+31
```

```
ext-ori-pok-rot 2 gon 0 0
5918.253 5134.023 2022.014
1e+31 1e+31 1e+31
0.00000 0.00000 6.89616
1e+31 1e+31 1e+31
```

stop-dep

Soll die Ein- und Ausgabe äquivalent zum Programm PAT-B sein ist für die äussere Orientierung die Parametrisierung `ext-ori-opk-fix` zu wählen. Die Kombination der Vorzeichen für die Kamerakonstante und Bildkoordinaten ist der Tabelle 15.16 zu entnehmen. Das Problem liegt entsteht dadurch, das in PAT-B die x -Achse der Bildkoordinaten entgegen der Flugrichtung definiert ist.

Kamerakonstante	Bildkoordinaten
f	x, y
-	+
+	-

Tabelle 15.16: Vorzeichen von Kamerakonstante und Bildkoordinaten bei PAT-B äquivalenter Ein-/Ausgabe

15.8 Objektkoordinaten-Datei

Mit der Objektkoordinaten-Datei (.oc) werden alle Objektpunktkoordinaten und ihre Standardabweichungen eingelesen. Dazu gehören die Pass- bzw. Kontrollpunktkoordinaten, und wenn vorhanden auch Näherungswerte von Neupunkten. Sind von den Neupunkten keine Näherungswerte vorhanden werden sie durch Vorwärtseinschnitt bestimmt. Die Standardabweichung kann entweder für einzelne Punkte individuell oder für alle Punkte gemeinsam gewählt werden. Die Steuerung erfolgt mit den Schlüsselwörtern `indiv-sdev` und `common-sdev`. Die Dateistruktur für individuell Standardabweichungen ist

```
indiv-sdev
<point_id> <Xo> <Yo> <Zo> <sX> <sY> <sZ>
...
[stop-dep]
```

und für gemeinsame Standardabweichungen

```
common-sdev
<sX> <sY> <sZ>

<point_id> <Xo> <Yo> <Zo>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<point_id>	string	Punkt-ID zur Identifizierung des Objektpunktes	-
<X> <Y> <Z>	double	Objektpunktkoordinaten	m
<sX> <sY> <sZ>	double	Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten	m

Tabelle 15.17: Objektkoordinaten

Beispiel: `test.oc`

```
indiv-sdev
 11  5083.205  5852.099  527.925  1e-31  1e-31  1e-31
 13  5780.020  5906.365  571.549  1e-31  1e-31  1e-31
 31  5210.879  4258.446  461.810  1e-31  1e-31  1e-31
 33  5909.264  4314.283  455.484  1e-31  1e-31  1e-31

 12  5430.762  5877.971  504.192  1e+31  1e+31  1e+31
 21  5145.744  5040.026  504.192  1e+31  1e+31  1e+31
 22  5495.459  5070.680  504.192  1e+31  1e+31  1e+31
 23  5855.069  5102.227  504.192  1e+31  1e+31  1e+31
 32  5558.274  4284.780  504.192  1e+31  1e+31  1e+31
```

```
stop-dep
```

```
111 5550.000 4284.000 504.000 1e+31 1e+31 1e+31
```

15.9 Control-Support-Datei

Mit der Control-Support-Datei (.cs) können können Objektpunkte zu Neu- oder Kontrollpunkten erklärt werden. Die Dateistruktur ist

```
[#] <point_id> <cs> <cs_in>
```

```
...
```

```
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung
<point_id>	string	Punkt-ID zur Identifizierung des Objektpunktes
<cs>	string	CS-Typ. Schlüsselworte siehe Tabelle 15.19
<cs_in>	string	CS in XYZ-Koordinate: $x = X-$, $y = Y-$, $z = Z$ -Koordinate

Tabelle 15.18: Control-Support

Schlüsselwort	Objektpunkttyp
in	Neupunkt (engl. intersection point)
co	Passpunkt (engl. control point)
ch	Kontrollpunkt (engl. check point)

Tabelle 15.19: Schlüsselwörter für die Objektpunkttyp

Die Änderung des Objektpunkttyps geschieht durch beschreiben der Standardabweichungen. Die gegebenen Koordinaten werden als Näherungswerte benutzt. Für Kontrollpunkte werden die gegebenen Koordinaten als Soll-Werte verwendet. Durch Angabe der Control-Support-Koordinate kann die Kontrolle für die einzelne Koordinate spezifiziert werden, z.B.:

```
xyz  Lage- und Höhenkontrollpunkt
xy   Lagekontrollpunkt
z    Höhenkontrollpunkt.
```

Die Control-Support-Datei muss nach der Objektkoordinaten-Datei gelesen werden.

Die Datei wird zeilenweise gelesen. Mit einem # als erstes Zeichen in einer Zeile wird die gesamte Zeile ignoriert.

Beispiel: test.cs

```
11  co  xyz
13  co  xyz
31  ch  xyz
33  co  xyz
```

```
stop-dep
```

15.10 Zusatzparameter-Datei

Mit der Zusatzparameter-Datei (.ap) können verschiedene Sätze von Zusatzparametern definiert werden. Die Verknüpfung zwischen den Bildern und den Zusatzparametersatz erfolgt über die Kamera-ID. Sollen z.B. für eine Aerotriangulation die Zusatzparameter streifenweise angesetzt werden, so ist für jeden Streifen eine eigene Kamera zu definieren.

Die einzelnen Modelle können miteinander kombiniert werden. Durch Vergabe verschiedener Namen (Zusatzparameter-IDs) sind die Modelle zu unterscheiden. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Parameter mehrfach auftreten können. Die überflüssigen Parameter sind dann im voraus durch entsprechende Gewichtung zu eliminieren ($\sigma_i = \sigma_{min,u}$).

Die Dateistruktur ist abhängig vom Zusatzparameter-Modell.

```
<ap_set_type>
<ap_set_id>
<camera_id>
<ap1> <sap1>
...
<apn> <sapn>
...
[stop-dep]
```

```
<ap_set_type>
<ap_set_id>
<camera_id>
<b>
<ap1> <sap1>
...
<apn> <sapn>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<ap_set_type>	string	Zusatzparameter-Modell. Schlüsselworte siehe Tabelle 15.21	-
<ap_set_id>	string	Zusatzparameter-ID zur Identifizierung des Parametersatzes	-
	double	Basis im Bildraum. Dieser Parameter wird <u>nur</u> bei den orthogonalen Polynom-Ansätzen p12 und p44 verwendet.	mm
<camera_id>	string	Kamera-ID zur Identifizierung der zugehörigen Kamera	-
<ap1> <sap1> ...	double	Koeffizient des Zusatzparameters und Standardabweichung. Die Anzahl der Parameter ist abhängig vom gewählten Zusatzparameter-Modell (siehe Tabelle 15.21)	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle 15.20: Zusatzparameter

Schlüsselwort	Modell	Anzahl	Reihenfolge	Seite
inner-or	Modell der inneren Orientierung	3	$\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c$	20
radial-dist	radiale Verzeichnung	3	K_1, K_2, K_3	21
decentering-dist	tangentiale Verzeichnung	2	P_1, P_2, P_3	21
in-plane	Deformationen in der Abbildungsfläche	12	a_1, a_2, \dots, a_{12}	21
out-of-plane	Unebenheiten der Abbildungsfläche	3	a_{13}, a_{14}, a_{15}	21
p12	orthogonales Polygon nach Ebner	12	a_1, a_2, \dots, a_{12}	21
p44	orthogonales Polygon nach Grün	44	a_1, a_2, \dots, a_{44}	21
gap	GAP-Implementierung	10	$\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c, s_x, a_1, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, P_3$	22
australis	Australis-Implementierung	10	$\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, P_3, b_1, b_2$	22

Tabelle 15.21: Schlüsselwörter und Reihenfolge der Parameter für die Zusatzparameter-Modelle

Beispiel: test.ap

```
inner-or
set1
101
0.0 1e+31
0.0 1e+31
0.0 1e+31
stop-dep
```

Beispiel: test2.ap

```
inner-or  cam1-i  camera-1
0.  1e+31
0.  1e+31
0.  1e+31

radial-dist  cam1-r  camera-1
0.  1e+31
0.  1e+31
0.  1e-31
```

```
decentering-dist  cam1-d  camera-1
0.  1e+31
```

```
0. 1e+31
stop-dep
```

15.11 Positionskorrektur-Datei

In der Positionskorrektur-Datei (.pcor) werden die Polynomkoeffizienten für die Positionskorrektur definiert. Die Verknüpfung zwischen den Bildern und der Positionskorrektur erfolgt über die Bild-IDs. Die Liste der Bild-IDs wird mit dem Schlüsselwort `stop-dep` abgeschlossen.

Allgemeine Dateistruktur für die Positionskorrektur:

```
<pos_cor_id>
<image_id>
...
stop-dep
<num_coeff>
<coeff> <sdev>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<pos_cor_id>	string	Positionskorrektur-ID	-
<image_id>	string	Image-ID	-
<num_coeff>	int	Anzahl der Polynomkoeffizienten	-
<coeff> <sdev>	double	Polynomkoeffizient und zugehörige Standardabweichung	m

Tabelle 15.22: Positionskorrektur

15.12 Lagekorrektur-Datei

In der Lagekorrektur-Datei (.acor) werden die Polynomkoeffizienten für die Lagekorrektur definiert. Die Verknüpfung zwischen den Bildern und der Lagekorrektur erfolgt über die Bild-IDs. Die Liste der Bild-IDs wird mit dem Schlüsselwort `stop-dep` abgeschlossen.

Allgemeine Dateistruktur für die Lagekorrektur:

```
<att_cor_id>
<image_id>
...
stop-dep
<num_coeff>
<coeff> <sdev>
...
[stop-dep]
```

Parameter	Datentyp	Beschreibung	Einheit
<att_cor_id>	string	Lagekorrektur-ID	-
<image_id>	string	Image-ID	-
<num_coeff>	int	Anzahl der Polynomkoeffizienten	-
<coeff> <sdev>	double	Polynomkoeffizient und zugehörige Standardabweichung	rad

Tabelle 15.23: Lagekorrektur

15.13 Programmaufruf

Der Programmaufruf erfolgt meist auf der Konsole mit Angabe der Projektdatei:

```
dirk@morpheus:~> dgap test.cfg
```

Ohne Angabe von Argumenten oder mit der Option -help wird der Hilfstext angezeigt:

```
Usage: dgap [options] cfg_file [stem]
Arguments:
  cfg_file      Configuration file.
  stem         Stem name for output files.
Options:
  -chk_in      Check input only.
  -corr        Evaluate correlation coeffs. of parameters.
  -corr_spec   Evaluate correlation coeffs. of parameters.
  -db_upari    Print upari-table.
  -help        Show this text.
  -pr_ic       Print image coords.
  -pr_input    Print all input data.
  -pr_oc       Print object points after initialization.
  -prec        Evaluate precision of parameters.
  -update_cams Update cameras by AP sets.
  -verb        Gives more information.
  -version     Show program version.
  -wr_cam file Write cameras in file.
  -wr_ocs file Write adjusted object coords.
  -wr_eos file Write adjusted EOs.
  -wr_aps file Write adjusted AP sets.
  -wr_opa file Write object point analysis.
  -wr_res file Write residuals in file.
  -wr_icr file Write residuals plus image coords.
```

Option	Beschreibung
--------	--------------

Fortsetzung auf der nächsten Seite

<code>-chk_in</code>	Zum Testen der Eingabedaten. Die Eingabedaten werden nur eingelesen. In Verbindung mit den Optionen <code>-pr_input</code> und <code>-pr_ic</code> kann überprüft werden, ob die Eingabedaten richtig eingelesen werden.
<code>-corr</code>	Berechnung und Ausgabe der Korrelationskoeffizienten. Die Anzahl der Koeffizienten die ausgegeben werden wird durch das Ausgabelimit <code>ccoef_lim</code> beeinflusst werden. Die Ausgabe erfolgt in Tabellenform.
<code>-corr_spec</code>	Berechnung und Ausgabe bestimmter Korrelationskoeffizienten. Es werden nur Korrelationen innerhalb und zwischen den Klassen: Orientierungsparameter, Zusatzparameter, Positions- und Lagekorrekturparameter berechnet. Die Ausgabe erfolgt in Matrixform.
<code>-db_upari</code>	Drucken der UPARI-Tabelle
<code>-help</code>	Anzeige des Hilfstextes
<code>-pr_ic</code>	Drucken der Bildkoordinaten. Die Option hat nur Wirkung in Kombination mit der Option <code>-pr_input</code> .
<code>-pr_input</code>	Drucken aller Eingabedaten ohne die Bildkoordinaten.
<code>-pr_oc</code>	Drucken der Objektpunkte nach der Initialisierung
<code>-prec</code>	Berechnung der inneren Genauigkeit
<code>-update_cams</code>	Update der Kameradaten (innere Orientierung und Kamerakonstante) durch Zusatzparameter
<code>-version</code>	Anzeige der Programmversion
<code>-wr_cam file</code>	Ausgabe der Kameradaten in Datei <code>file</code>
<code>-wr_ocs file</code>	Ausgabe der ausgeglichenen Objektkoordinaten in Datei <code>file</code>
<code>-wr_eos file</code>	Ausgabe der ausgeglichenen Orientierungsparameter in Datei <code>file</code>
<code>-wr_aps file</code>	Ausgabe der ausgeglichenen Zusatzparameter in Datei <code>file</code>
<code>-wr_opa file</code>	Ausgabe der Objektpunktanalyse-Daten (OPA) in Datei <code>file</code>
<code>-wr_res file</code>	Ausgabe der Verbesserungen einschliesslich der beobachteten Bildkoordinaten in Datei <code>file</code>

Tabelle 15.24: Optionen beim Programmaufruf

Für die Berechnung der inneren Genauigkeit und der Korrelationskoeffizienten ist die Inversion des Normalgleichungsmatrix notwendig.

15.14 Programmausgabe

Die Ausgabe erfolgt auf der Standardausgabe der Konsole. Für längere Ausgaben und zur Dokumentation ist es sinnvoll die Standardausgabe mit den Operator `>` auf eine Datei umzuleiten. Ein Beispiel für die Programmausgabe (s. Verzeichnis: `test/schw_ack_dpe`) ist in Anhang A zu finden. Das Beispiel wurde mit folgenden Programmaufruf erzeugt:

```
> dgap -pr_input -prec -wr_ocs test.aoc -wr_eos test.aeo
-wr_res test.res test.cfg > test.out
```

Kapitel 16

Installation

16.1 Verzeichnisstruktur

Tabelle 16.1 zeigt die Struktur des Hauptverzeichnisses von `dgap-release-<version>` :

Verzeichnis	Inhalt
<code>doc</code>	Dokumentation
<code>libdep</code>	DEP-Bibliothek
<code>main</code>	Hauptprogramm
<code>tests</code>	Testbeispiele
<code>tools</code>	Hilfsprogramme, Werkzeuge

Tabelle 16.1: Hauptverzeichnis-Struktur

Literaturverzeichnis

- K. B. Atkinson, Herausgeber. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, 2001.
- Horst A. Beyer. *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System*. Doktorarbeit, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich, May 1992. Diss. ETH Nr. 9701.
- Duane C. Brown. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, August 1971.
- Duane C. Brown. The bundle adjustment — progress and prospects. In *International Archives of Photogrammetrie*, Band XXI, Part 3, Commission III, Seiten 1–33, 1976. XIII ISP Congress, Helsinki, Finland.
- M. A. R. Cooper und P. A. Cross. Statistical concepts and their application in photogrammetry and surveying. *Photogrammetric Record*, 12(71):637–663, April 1988.
- H. Ebner. Self calibrating block adjustment. In *International Archives of Photogrammetrie*, Band XXI, Part 3, Commission III, Seiten 1–17, 1976. XIII ISP Congress, Helsinki, Finland.
- R. Finsterwalder und W. Hofmann. *Photogrammetrie*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1968.
- John G. Fryer. Recent developments in camera calibration for close-range applications. In *International Archives of Photogrammetrie and Remote Sensing*, Band XXIX, Part B5, Commission V, Seiten 594–599, 1992. XVII ISPRS Congress, 2–14 Aug., Washington, D.C., USA.
- Herbert Goldstein. *Klassische Mechanik*. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt a. M., 1963.
- S. I. Granshaw. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 10(56):181–207, 1980.
- F. Sebastian Grassia. Practical Parametrization of Rotations Using the Exponential Map. *The Journal of Graphics Tools*, 3(3):29–48, 1998.
- W. Großmann. *Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung*. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 3. Auflage, 1976.
- Armin Grün. Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchner Bündelprogramm MBOP. In *International Archives of Photogrammetrie*, Band XXI, Part 3, Commission III, Seiten 1–23, 1976. XIII ISP Congress, Helsinki, Finland.
- Armin Grün. Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry. In *International Archives of Photogrammetrie*, Band XXII, Part V, Commission V, Seiten 1–24, 1978. ISP Inter-Congress Symposium, 14–17 August, Stockholm.

- Armin Grün. Photogrammetrische Punktbestimmung mit der Bündelmethode. Technischer Report 41, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1986.
- B. Heck. *Rechenverfahren und Auswertemodelle in der Landesvermessung*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1987.
- Tobias Heuchel. Rotation matrix in PATB, 1994. Fax, Inpho GmbH, Smaragdweg 1, 70174 Stuttgart.
- H. M. Karara. Non-metric Cameras. In K. B. Atkinson, Herausgeber, *Developments in Close Range Photogrammetry - 1*, Kapitel 4, Seiten 63–80. Applied Science Publishers Ltd, London, 1980.
- John F. Kenefick, Maurice S. Gyer und Bill F. Harp. Analytical Self-Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 38(11):1117–1126, Nov. 1972.
- E. H. Knickmeyer und M. Nitschke. Rotationsparameter – Grundlagen für die Praxis. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 119(9):455–464, 1994.
- G. Konecny und G. Lehmann. *Photogrammetrie*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 4. Auflage, 1984.
- K. Kraus. *Photogrammetrie, Band 1*. Dümmler Verlag, Bonn, 5. Auflage, 1994.
- K. Kraus. *Photogrammetrie, Band 2*. Dümmler Verlag, Bonn, 3. Auflage, 1996.
- K. Kraus. *Photogrammetrie, Band 1*. Dümmler Verlag, Bonn, 6. Auflage, 1997. unveränderter Nachdruck der Voraufgabe.
- Thomas Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- E. M. Mikhail, J. S. Bethel und J. C. McGlone. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons, Inc., New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto, 2001.
- H. Pelzer, Herausgeber. *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, Band 13. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985. Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985 in Hannover.
- Photometrix. Image Correction Model, June 2001. URL <http://www.photometrix.com.au/downloads/australis/ImageCorrectionModel.pdf>.
- Karl Rinner. Über räumliche Drehungen. Reihe A Heft 25, Deutsche Geodätische Kommission, 1957.
- W. Rüger, J. Pietschner und K. Regensburger. *Photogrammetrie, Verfahren und Geräte*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 4. Auflage, 1978.
- G. H. Schut. Construction of orthogonal matrices and their application in analytical photogrammetry. *Photogrammetria*, 15(4):149–162, 1958/59.
- K. Schwedefsky und F. Ackermann. *Photogrammetrie*. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 1976.
- Ken Shoemake. Euler Angle Conversion. In Paul Heckbert, Herausgeber, *Graphics Gems IV*, Seiten 222–229. Academic Press, 1994.
- C. C. Slama, C. Theurer und S. W. Henriksen, Herausgeber. *Manual of Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 4. Auflage, 1980.

- Bill Triggs, Philip McLauchlan, Richard Hartley und Andrew Fitzgibbon. Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In W. Triggs, A. Zisserman und R. Szeliski, Herausgeber, *Vision Algorithms: Theory and Practice*, LNCS, Seiten 298–375. Springer Verlag, 2000.
- B. Wrobel und D. Klemm. Über die Vermeidung singulärer Fälle bei der Berechnung allgemeiner räumlicher Drehungen. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 25, Part A3b, Seiten 1153–1163, 1984. ISPRS XV Congress, 17–29 June, Rio de Janeiro, Brazil.

Anhang A

Beispiel

Vgl. Schwidofsky und Ackermann (1976), Seite 191, Tab. 191.1 Zahlenbeispiel für die räumliche Doppelpunkteinschaltung (direkte analytische Orientierung eines Bildpaares nach der Bündelmethode). Siehe auch Testbeispiel im Verzeichnis `dgap-<version>/tests/schw_ack_dpe`.

Programmname, Version, ...

```
dgap22 version 2.4.4 system unknown compiled Aug  8 2003 11:31:20
```

Anzahl der eingelesenen Objekte: Bilder, Kameras, Objektpunkte, ...

```
Input data
=====
Number of ...
- images           : 2
- cameras          : 1
- object points    : 9
- EOs              : 2
- AP sets          : 0
- Position corrs. : 0
- Attitude corrs. : 0
```

Parameter und Optionen zur Beeinflussung der Ausgabe.

```
Parameters/Options
=====
Single ray option           : on
Print check approximations  : off
Print check rays            : off
Print intersection results   : on
Print image coords.         : on
Print unknown parameters
- object coords.           : off
- exterior orientations     : on
- additional parameter sets : off
- position corrections      : off
- attitude corrections      : off
Debug UPARI table          : off
```

```

Debug intersection           : off
Print AP set corrections
- number of grid points in x and y : 0 x 0
Output of normal equations. Filename of ...
- normal matrix structure      : none
- normal matrix               : none
- right hand side vector      : none
- solution vector             : none

```

Least-Squares-Parameter und Optionen.

```

Least-squares parameters/options
=====
Standard deviation of unit weight : 6.00e-06
Maximum number of iterations      : 10

Unknowns used for iteration criterion
- object point coords.          : off
- perspective centre coords.    : off
- rotation parameters           : on
- image geometry parameters     : off

Convergence limits
- object point coords.          : 0.0010 m
- perspective centre coords.    : 0.0010 m
- rotation parameters           : 1.57e-06
- image geometry parameters     : 1.00e-08

Limit of std. dev. to indicate that
- unknown should be eliminated  : 1.00e-30
- value is an unknown           : 1.00e+30

Value of std. dev. to indicate that
- unknown is fixed              : 1.00e-31
- unknown is free               : 1.00e+31

Weight for suppression of unknowns : 1.00e+10
Weight for constraints             : 1.00e+10
Output limit of correlation coeffs : 0.80

Increment for num. derivatives
- object point coordinates      : 1.00e+00 m
- rotation angles               : 1.00e-03 rad

Limit for single significance test : 1.96
Limit for A'Pv-check              : 1.00e-04
Limit for printing residuals      : 0.00 um

Unit of object space coords.      : m
Unit of rotation angles           : gon

Adjustment interface               : lapack

```

Aufstellung aller Bilder, mit zugehörigen Stationen, Kameras und Bildkoordinaten mit Standardabweichungen (nur bei gesetzter Option).

```

Images
=====

```

```

Image ID       : 1
Station ID     : 1
Camera ID      : 101

```

Number of points : 9
 Coord. system type : image

ID	x/mm	y/mm	sx/mm	sy/mm
11	16.0120	79.9630	0.0060	0.0060
13	88.5600	81.1340	0.0060	0.0060
31	13.3620	-79.3700	0.0060	0.0060
33	82.2400	-80.0270	0.0060	0.0060
12	51.7580	80.5550	0.0060	0.0060
21	14.6180	-0.2310	0.0060	0.0060
22	49.8800	-0.7820	0.0060	0.0060
23	86.1400	-1.3460	0.0060	0.0060
32	48.0350	-79.9620	0.0060	0.0060

Image ID : 2
 Station ID : 2
 Camera ID : 101

Number of points : 9
 Coord. system type : image

ID	x/mm	y/mm	sx/mm	sy/mm
11	-73.9300	78.7060	0.0060	0.0060
13	-5.2520	78.1840	0.0060	0.0060
31	-79.1220	-78.8790	0.0060	0.0060
33	-9.8870	-80.0890	0.0060	0.0060
12	-39.9530	78.4630	0.0060	0.0060
21	-76.0060	0.0360	0.0060	0.0060
22	-42.2010	-1.0220	0.0060	0.0060
23	-7.7060	-2.1120	0.0060	0.0060
32	-44.4380	-79.7360	0.0060	0.0060

Kameras

Cameras
 =====

Camera ID : 101
 Camera type : frame
 Comment : RMK
 Coord. system type : image
 Focal length : f = 150.0000 mm
 Principal point : xp = 0.0000 mm yp = 0.0000 mm
 Image format : sx = 230.0000 mm sy = 230.0000 mm

Gegebene Objektkoordinaten mit Standardabweichungen. Aufgrund der Standardabweichungen werden die Punkte gekennzeichnet: Schnitt-/Verknüpfungspunkte (in), Passpunkte (co) und Kontrollpunkte (ch).

Object point coordinates
 =====
 Object point type:
 in=intersection, co=control point, ch=check point

Point ID	X/m	Y/m	Z/m	sX/m	sY/m	sZ/m	
11	5083.205	5852.099	527.925	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
13	5780.020	5906.365	571.549	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
31	5210.879	4258.446	461.810	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
33	5909.264	4314.283	455.484	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
12	5430.762	5877.971	504.192	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
21	5145.744	5040.026	504.192	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
22	5495.459	5070.680	504.192	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
23	5855.069	5102.227	504.192	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
32	5558.274	4284.780	504.192	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in

Number of object points with type
 intersection : 5
 control : 4
 check : 0
 total : 9

Parameter der äußere Orientierung mit Standardabweichungen.

Exterior orientations
 =====

Station ID : 1
 Exposure time : 0.0000 s
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)

Param.	State	Value	Std.dev.
Xo	unk	5000.765	1.0e+31
Yo	unk	5027.343	1.0e+31
Zo	unk	1997.357	1.0e+31
phi	unk	0.00000	1.0e+31
omega	unk	0.00000	1.0e+31
kappa	unk	6.56071	1.0e+31

Rotation matrix:
 0.9946945 -0.1028731 0.0000000
 0.1028731 0.9946945 -0.0000000
 0.0000000 0.0000000 1.0000000

Station ID : 2
 Exposure time : 0.0000 s
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)

Param.	State	Value	Std.dev.
Xo	unk	5918.253	1.0e+31
Yo	unk	5134.023	1.0e+31
Zo	unk	2022.014	1.0e+31
phi	unk	0.00000	1.0e+31
omega	unk	0.00000	1.0e+31
kappa	unk	6.89616	1.0e+31

Rotation matrix:
 0.9941386 -0.1081129 0.0000000
 0.1081129 0.9941386 -0.0000000
 0.0000000 0.0000000 1.0000000

Bestimmung von Näherungswerten durch Vorwärtsschnitt. Sofern keine Näherungswerte gegeben wurden werden ausgehend von den gegebenen äusseren Orientierungen die Neupunkte durch räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt. Als Ergebnis wird der Mittelwert aus allen möglichen 2-Bild-Kombinationen verwendet. Achtung: Es findet keine Überprüfung der Schnittgenauigkeit statt. Es ist daher notwendig schleifende Schnitte zu vermeiden.

*** Start initialize adjustment

Calculate object point approximations

=====

(By spatial intersection)

	X/m	Y/m	Z/m	e/m
--	-----	-----	-----	-----

Number of intersection points : 0

Total average distance of rays: e_mean = --- m

Löschen nicht verwendeter Objektpunkte, äußerer Orientierungen, Kameras, etc.

Clean up

(Remove unused object points, EOs, Apsets, etc.)

Number of removed ...

- images	:	0
- cameras	:	0
- object points	:	0
- EOs	:	0
- AP sets	:	0
- Position corr.	:	0
- Attitude corr.	:	0

(GPS-)Zeitintervall. Anfangs-, Endzeit und Zeitdauer mit der äusseren Orientierung evtl. gegeben. Für die Positions- und Lagekorrektur unbedingt erforderlich.

Time interval

t_min	=	0.0000 s
t_max	=	0.0000 s
duration dt	=	0.0000 s

Reference time t0 (= t_min) = 0.0000 s

Anzahl der Bilder, Kameras, Objektpunkte, etc. die an der Ausgleichung teilnehmen.

Data defined for adjustment

Images	:	2
Cameras	:	1
Exterior orientations	:	2
Additional parameter sets	:	0
Position corrections	:	0
Attitude corrections	:	0
Object points (total)	:	9
Control points	:	4
Check points	:	0

Anzahl der Beobachtungen, Bedingungen (constraints) und Unbekannten. Getrennt nach Art der Unbekannten und die jeweilige Anzahl der beobachteten (obs) und eliminierten (eli) Unbekannten.

Number of observations, unknowns and redundancy

Observations:

Image point coordinates : 18
 Total number of observations : 36

Unknowns:

	total	thereof	
		obs.	eli.
Object point coordinates	: 27	0	12
Exterior orientations	: 12	0	0
Additional parameters	: 0	0	0
Position corrections	: 0	0	0
Attitude corrections	: 0	0	0
Total number of unknowns	: 39	0	12

Constraints : 0

Redundancy : 9

Elapsed cpu time to initialize adjustment: 0.00 s

Beginn der Iterationsschleife. 1. Iterationsschritt.

*** Start iteration loop

Iteration number 1

Änderungen der unbekannt Parameter. Hier der Änderung der äußeren Orientierung. Jeweils mit Näherungswert (Approx), Änderung (Change) und ausgeglichene Unbekannte (Adjusted).

Exterior orientations

Station ID : 1

Type : EO (phi-omega-kappa, rotated)

Index : 27

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
Xo	unk	5000.765	-1.292	4999.473
Yo	unk	5027.343	-27.303	5000.040
Zo	unk	1997.357	2.832	2000.189
phi	unk	0.00000	-0.01236	-0.01236
omega	unk	0.00000	1.83967	1.83967
kappa	unk	6.56071	-0.49527	6.06544

Station ID : 2

Type : EO (phi-omega-kappa, rotated)

Index : 33

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
------	-------	---------	--------	----------

Xo	unk	5918.253	-21.508	5896.745
Yo	unk	5134.023	-63.894	5070.129
Zo	unk	2022.014	10.247	2032.261
phi	unk	0.00000	-0.94009	-0.94009
omega	unk	0.00000	2.93746	2.93746
kappa	unk	6.89616	0.13674	7.03290

Mittlere Änderungen der Unbekannten. Getrennt für die Objektkoordinaten, die Lage des Projektionszentrums und die Drehwinkel.

Average change of unknown parameters

- object point coords.	:	1.213e+01 m
- perspective centre coords.	:	2.118e+01 m
- rotation parameters	:	1.665e-02
- geometry parameters	:	---

Anzahl der Beobachtungen, Unbekannten und Bedingungen, Redundanz, die Summe $\mathbf{v}^t\mathbf{P}\mathbf{v}$ und die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori $\hat{\sigma}_0$.

Number of observations	:	36
Number of unknowns	:	39 (thereof: 0 obs. 12 elim.)
Number of constraints	:	0
Redundancy	:	9
vtpv	:	4.72e-09
Sigma 0 a posteriori	:	2.29e-05

Kommentar, in welcher Unbekannten den Konvergenz-Test nicht erfüllt wurde.

Convergence check failed at

ID	:	1
Type	:	E0 (phi-omega-kappa, rotated)
Parameter	:	phi

Rechenzeit für den Iterationsschritt.

Elapsed cpu time per iteration: 0.00 s, solution only: 0.00 s

2. Iterationsschritt.

Iteration number 2

Exterior orientations

Station ID	:	1
Type	:	E0 (phi-omega-kappa, rotated)
Index	:	27

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
------	-------	---------	--------	----------

Xo	unk	4999.473	0.284	4999.757
Yo	unk	5000.040	-0.206	4999.834
Zo	unk	2000.189	-0.195	1999.994
phi	unk	-0.01236	-0.00189	-0.01424
omega	unk	1.83967	0.00773	1.84739
kappa	unk	6.06544	-0.00317	6.06226

Station ID : 2
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)
 Index : 33

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
Xo	unk	5896.745	0.085	5896.830
Yo	unk	5070.129	0.152	5070.281
Zo	unk	2032.261	-1.811	2030.449
phi	unk	-0.94009	0.02122	-0.91887
omega	unk	2.93746	-0.00908	2.92838
kappa	unk	7.03290	0.00057	7.03346

Average change of unknown parameters
 - object point coords. : 8.396e-01 m
 - perspective centre coords. : 4.555e-01 m
 - rotation parameters : 1.143e-04
 - geometry parameters : ---

Number of observations : 36
 Number of unknowns : 39 (thereof: 0 obs. 12 elim.)
 Number of constraints : 0
 Redundancy : 9
 vtpv : 2.88e-10
 Sigma 0 a posteriori : 5.65e-06

Convergence check failed at
 ID : 1
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)
 Parameter : phi

Elapsed cpu time per iteration: 0.01 s, solution only: 0.00 s

3. Iterationsschritt.

Iteration number 3

Exterior orientations

Station ID : 1
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)
 Index : 27

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
Xo	unk	4999.757	0.000	4999.757
Yo	unk	4999.834	0.000	4999.834

Zo	unk	1999.994	0.000	1999.994
phi	unk	-0.01424	0.00001	-0.01423
omega	unk	1.84739	-0.00000	1.84739
kappa	unk	6.06226	0.00000	6.06227

Station ID : 2
 Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)
 Index : 33

Name	State	Approx.	Change	Adjusted
Xo	unk	5896.830	-0.001	5896.829
Yo	unk	5070.281	-0.002	5070.279
Zo	unk	2030.449	0.002	2030.451
phi	unk	-0.91887	-0.00004	-0.91892
omega	unk	2.92838	0.00006	2.92844
kappa	unk	7.03346	-0.00002	7.03345

Average change of unknown parameters
 - object point coords. : 1.740e-03 m
 - perspective centre coords. : 9.398e-04 m
 - rotation parameters : 3.653e-07
 - geometry parameters : ---

Number of observations : 36
 Number of unknowns : 39 (thereof: 0 obs. 12 elim.)
 Number of constraints : 0
 Redundancy : 9
 vtpv : 2.86e-10
 Sigma 0 a posteriori : 5.64e-06

Elapsed cpu time per iteration: 0.00 s, solution only: 0.00 s

Iterationskriterien wurden erfüllt. Anzahl der benötigten Iterationsschritte und Rechenzeit.

*** Iteration criterion limit has been reached.

Number of iterations: 3
 Total cpu time for iterations : 0.01 s

Ausgleichungstest.

Check adjustment on A'Pv = 0

A'Pv limit: 1.0e-04

Number of A'Pv-values > limit : 0

Verbesserungen (Residuen) in den Bildkoordinaten. Die Passpunkte werden extra gekennzeichnet mit "control point for". Mittelwert und RMS-Wert getrennt nach x/y-Komponente für das Einzelbild.

Residuals of image coords.
 =====
 Limit for printing residuals: 0.00 um

Image ID : 1

Point ID	vx/um	vy/um	v /um	
11	-3.23	2.28	3.95	control point for X Y Z
13	-0.41	-1.03	1.11	control point for X Y Z
31	6.38	1.58	6.57	control point for X Y Z
33	-2.76	-5.19	5.88	control point for X Y Z
12	0.00	-0.21	0.21	
21	0.04	2.54	2.54	
22	0.04	2.46	2.46	
23	-0.07	-4.10	4.10	
32	0.06	1.74	1.74	

Number of points : 9
RMS of residuals : 2.56 2.75
Average of residuals : 0.01 0.01

Image ID : 2

Point ID	vx/um	vy/um	v /um	
11	3.95	1.58	4.25	control point for X Y Z
13	-0.56	1.94	2.02	control point for X Y Z
31	3.97	-4.70	6.15	control point for X Y Z
33	-7.33	3.53	8.14	control point for X Y Z
12	0.01	0.22	0.22	
21	-0.08	-2.56	2.57	
22	-0.08	-2.49	2.49	
23	0.13	4.17	4.17	
32	-0.07	-1.74	1.74	

Number of points : 9
RMS of residuals : 3.08 2.87
Average of residuals : -0.01 -0.01

Mittelwert und RMS-Wert getrennt nach x/y-Komponente für alle Bilder. Anteil der Verbesserungen an der Standardabweichung der Gewichtseinheit.

Summary for all image points of all images

```
-----
                vx/um      vy/um

Total number of points : 18
RMS of residuals      : 2.83      2.81
Average of residuals  : -0.00      0.00

Contribution to vtpv and sigma 0: 2.864e-10 m^2 5.64 um
Redundancy : 9
```

*** Residual output file written: test.res

Ausgabe der ausgeglichenen Parameter.

*** Final (adjusted) unknown parameters ***

Object point coordinates

=====

Object point type:

in=intersection, co=control point, ch=check point

Point ID	X/m	Y/m	Z/m	sX/m	sY/m	sZ/m	
11	5083.205	5852.099	527.925	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
13	5780.020	5906.365	571.549	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
31	5210.879	4258.446	461.810	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
33	5909.264	4314.283	455.484	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
12	5431.489	5879.359	549.739	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
21	5147.387	5055.564	484.995	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
22	5495.786	5082.741	506.668	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
23	5844.172	5109.875	528.423	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in
32	5559.944	4286.174	463.499	1.0e+31	1.0e+31	1.0e+31	in

Number of object points with type

```

intersection : 5
control      : 4
check        : 0
total        : 9
    
```

Exterior orientations

=====

Station ID : 1

Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)

Index : 27

Param.	State	Initial	Adjusted	Change	Std.dev.
Xo	unk	5000.765	4999.757	-1.008	1.0e+31
Yo	unk	5027.343	4999.834	-27.509	1.0e+31
Zo	unk	1997.357	1999.994	2.637	1.0e+31
phi	unk	0.00000	-0.01423	-0.01423	1.0e+31
omega	unk	0.00000	1.84739	1.84739	1.0e+31
kappa	unk	6.56071	6.06227	-0.49844	1.0e+31

Rotation matrix:

```

0.9954688 -0.0950885 -0.0002235
0.0950420 0.9950503 -0.0290147
0.0029813 0.0288620 0.9995790
    
```

Station ID : 2

Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)

Index : 33

Param.	State	Initial	Adjusted	Change	Std.dev.
Xo	unk	5918.253	5896.829	-21.424	1.0e+31
Yo	unk	5134.023	5070.279	-63.744	1.0e+31
Zo	unk	2022.014	2030.451	8.437	1.0e+31
phi	unk	0.00000	-0.91892	-0.91892	1.0e+31
omega	unk	0.00000	2.92844	2.92844	1.0e+31
kappa	unk	6.89616	7.03345	0.13729	1.0e+31

Rotation matrix:

```

0.9937265 -0.1109047 -0.0144185
    
```



```
0.1101399  0.9928518  -0.0459837
0.0194153  0.0441071  0.9988381
```

Verbesserungen in den Passpunkten. Alle Passpunkte werden aufgeführt. Komponenten ohne Verbesserung werden mit -- gekennzeichnet. Absoluter Maximalwert, Mittelwert und RMS-Wert werden für die Komponenten getrennt berechnet.

Control point residuals
=====

Point ID	X/m	Y/m	Z/m	vX/m	vY/m	vZ/m
11	5083.205	5852.099	527.925	---	---	---
13	5780.020	5906.365	571.549	---	---	---
31	5210.879	4258.446	461.810	---	---	---
33	5909.264	4314.283	455.484	---	---	---

Std. dev. from control point residuals

	vX/m	vY/m	vZ/m
Number of residuals	: 0	0	0
Maximum of abs. residuals	: 0.000	0.000	0.000
Average of residuals	: 0.000	0.000	0.000
RMS of residuals	: 0.000	0.000	0.000

Differenzen in den Kontrollpunkten. Komponenten ohne Differenz werden mit -- gekennzeichnet. Absoluter Maximalwert, Mittelwert und RMS-Wert werden für die Komponenten getrennt berechnet.

Check point analysis
=====

Point ID	X-new/m	Y-new/m	Z-new/m	DX/m	DY/m	DZ/m
----------	---------	---------	---------	------	------	------

Summary of check point analysis

Empirical accuracy in object space.

	DX/m	DY/m	DZ/m
Number of differences	: 0	0	0
Maximum of abs. differences	: 0.000	0.000	0.000
Average of differences	: 0.000	0.000	0.000
RMS of differences	: 0.000	0.000	0.000

Start der Matrizeninversion und benötigte Rechenzeit.

*** Matrix inversion ... Done

Elapsed cpu time for inversion: 0.00 s

Ausgabe der ausgeglichenen Parameter mit ihren Standardabweichungen.

*** Precision from Qxx and Sigma 0 a posteriori ***

Object point coordinates

=====

Object point type:

in=intersection, co=control point, ch=check point

Point ID	X/m	Y/m	Z/m	sX/m	sY/m	sZ/m	
11	5083.205	5852.099	527.925	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
13	5780.020	5906.365	571.549	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
31	5210.879	4258.446	461.810	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
33	5909.264	4314.283	455.484	1.0e-31	1.0e-31	1.0e-31	co
12	5431.489	5879.359	549.739	0.049	0.103	0.158	in
21	5147.387	5055.564	484.995	0.056	0.060	0.159	in
22	5495.786	5082.741	506.668	0.046	0.060	0.152	in
23	5844.172	5109.875	528.423	0.062	0.061	0.150	in
32	5559.944	4286.174	463.499	0.051	0.095	0.170	in

Number of object points with type

```

intersection : 5
control      : 4
check        : 0
total        : 9
    
```

Average precision of object coords.

=====

Derived from std. dev. of coordinates of non-control points.

	sX/m	sY/m	sZ/m
Number of std. devs. :	5	5	5
Maximum of std. devs. :	0.062	0.103	0.170
Average of std. devs. :	0.053	0.078	0.158

Exterior orientations

=====

```

Station ID   : 1
Exposure time : 0.0000 s
Type         : E0 (phi-omega-kappa, rotated)
    
```

Param.	State	Value	Std.dev.
Xo	obs	4999.757	0.209
Yo	obs	4999.834	0.215
Zo	obs	1999.994	0.088
phi	obs	-0.01423	0.00845
omega	obs	1.84739	0.00674
kappa	obs	6.06227	0.00275

Rotation matrix:

```

0.9954688 -0.0950885 -0.0002235
0.0950420 0.9950503 -0.0290147
0.0029813 0.0288620 0.9995790
    
```

Station ID : 2

Exposure time : 0.0000 s
Type : E0 (phi-omega-kappa, rotated)

Param.	State	Value	Std.dev.
Xo	obs	5896.829	0.220
Yo	obs	5070.279	0.220
Zo	obs	2030.451	0.078
phi	obs	-0.91892	0.00874
omega	obs	2.92844	0.00696
kappa	obs	7.03345	0.00259

Rotation matrix:

0.9937265	-0.1109047	-0.0144185
0.1101399	0.9928518	-0.0459837
0.0194153	0.0441071	0.9988381

*** Adjusted object coords. written: test.aoc

*** Adjusted E0 data written: test.aeo

Ende der Bündelausgleichung mit gesamter Rechenzeit.

*** Processing completed ***

Total cpu time (all included): 0.03 s