

EFFIZIENTE BERÜCKSICHTIGUNG GEODÄTISCHER
BEOBACHTUNGEN UND OBJEKTINFORMATIONEN
IN DER BÜNDELBLOCKAUSGLEICHUNG

Franz Müller und Manfred Stephani
Lehrstuhl für Photogrammetrie
Technische Universität München
Arcisstraße 21
D-8000 München 2
Fed. Rep. Germany

Commission V

SUMMARY

An efficient method for the consideration of various geodetic observations as well as object information in photogrammetric bundle adjustment is presented. The proposed technique leads to favourable structures of normal equations and to very reasonable computing times.

Based upon this new concept an universal and operational program package for bundle block adjustment with general control information and simultaneous self calibration was developed. Though the package is written for applications in close range, it may be used in aerial triangulation as well. First results are presented and discussed.

1. EINLEITUNG

Die auf der Bündelblockausgleichung beruhende photogrammetrische Methode der Punktbestimmung wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt und verfeinert. Für hochpräzise Anwendungen war es notwendig, das mathematische Modell durch zusätzliche Parameter (EBNER, 1976, GRON, 1978) zu erweitern. Zur Aufdeckung grober Fehler im Datenmaterial ist die Theorie der Zuverlässigkeit entwickelt und erfolgreich in der Praxis eingesetzt worden (BAARDA, 1967, FÖRSTNER, 1976, GRON, 1979).

Eine Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung kann auch durch die Einbeziehung zusätzlicher geodätischer Information und ggf. der Objektgestalt in eine simultane Ausgleichung erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit der Blockausgleichung kann durch diese Maßnahmen ebenfalls gesteigert werden, da die Zahl der Paßpunkte reduziert und ihre Verteilung optimiert werden kann. Die Möglichkeit der Einbeziehung von allgemeiner geodätischer Paßinformation wie Strecken, Richtungen, Lote usw. ist insbesondere in der Nahbereichsphotogrammetrie eine aktuelle Forderung an ein modernes Bündelblockprogramm.

Aus dieser Erkenntnis wurde am Lehrstuhl für Photogrammetrie der TU München ein Rechenprogramm konzipiert, welches es gestattet, sowohl zusätzliche Paßinformation als auch Objekteigenschaften in einer erweiterten Bündelblockausgleichung zu berücksichtigen.

Wirtschaftliche Gesichtspunkte, wie Einsatz von Minirechnern und die Forderung nach kurzen Rechenzeiten sind die Ursache, daß bei der Block-

ausgleichung die Struktur der Normalgleichungen berücksichtigt werden muß. Insbesondere bei großen photogrammetrischen Blöcken ergeben sich Strukturen, die optimal mit besonderen Algorithmen (Bandalgorithmen, Sparse Technik (STEIDLER, 1980)) bearbeitet werden können.

Eine Charakteristik der Zusatzpaßinformation ist es, daß sie neue Verknüpfungen im Normalgleichungssystem bewirkt und außerdem weniger gut schematisch behandelt werden kann. Das gleiche gilt auch, wenn Information über die Objektform im Ausgleichungsprozeß berücksichtigt werden soll.

Es werden daher effiziente, theoretisch fundierte Algorithmen benötigt, mit denen eine schnelle, gemeinsame Ausgleichung aller verfügbaren Information im Bild- und Objektraum möglich ist. Das Ziel - hochpräzise Punktbestimmung durch Bündelblockausgleichung - soll als Hauptaufgabe der analytischen Photogrammetrie bei diesen Algorithmen im Vordergrund stehen.

2. GEMEINSAME AUSGLEICHUNG HYBRIDER BEOBACHTUNGEN

2.1 BISHERIGE LÖSUNGSANSÄTZE

Die meßbaren und fiktiven Größen wurden bisher als Beobachtungen im Objektraum betrachtet und im Sinne einer vermittelnden Ausgleichung über zusätzliche Verbesserungsgleichungen in die Blockausgleichung eingebracht (KAGER, 1976, HELL, 1979, LARSSON, 1983).

Bei Zusatzpaßinformationen, die nur eine unbekannte Punktkoordinate bzw. eine Bildunbekannte betreffen, ist dies ohne Zweifel der günstigste und der am einfachsten zu realisierende Weg. Es stellt sich aber so- gleich die Frage, was passiert, falls die zusätzliche Information

- mehrere Unbekannte verknüpft und
- als fehlerfrei

betrachtet werden soll? In diesem praxisrelevanten Sonderfall müssen die Beobachtungen hoch gewichtet ($p=+\infty$) werden. Dies kann, falls mehrere Unbekannte an der Beobachtungsgleichung beteiligt sind, zu einer schlechten Kondition des Normalgleichungssystems bis hin zur Singularität führen.

Die Verknüpfung mehrerer Unbekannten (Punkt- und/oder Bildunbekannte) durch eine geodätische oder fiktive Beobachtung, führt zu einer Störung der regelmäßigen Struktur der Normalgleichungsmatrix. Insbesondere im Bereich der unbekannt Punktkoordinaten treten unerwünschte Nichtnullelemente außerhalb der 3×3 blockdiagonalen Submatrizen auf. Die bei der reinen Bündelblockausgleichung einfach durchzuführende Reduktion auf die Bildunbekannten wird erschwert. Darum wird oft die Punktfolge im Normalgleichungssystem geändert, wozu jedoch besondere Sortierprozesse nötig sind. Weiterhin führt eine Punktverknüpfung automatisch zu einer Verknüpfung der Bilder (in der reduzierten Normalgleichungsmatrix), in die diese Punkte abgebildet sind. Die bei größeren (Aerotriangulations-) Blöcken durch Sortieren der Bilder erzielbare optimale Bandstruktur kann durch 'ungünstige' zusätzliche Beobachtungen erheblich gestört werden.

Die aufgezeigten Probleme waren Anlaß für Professor Ebner, eine neue Vorgehensweise vorzuschlagen. Ein Vergleich der verschiedenen Ansätze und Programme zur Berücksichtigung zusätzlicher Paßinformation findet sich in EBNER /1984/.

2.2 MODIFIZIERTE FORM DES MODELLS DER BÜNDELBLOCKAUSGLEICHUNG

Bei diesem neuen Konzept werden die hybriden Beobachtungen in einer vermittelnden Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen zwischen den Unbekannten verarbeitet. Als stochastische Größen werden dabei zunächst nur die Messungen der Bildkoordinaten und die direkten Beobachtungen einzelner Unbekannten betrachtet. Die Paßinformation wird in Bedingungsgleichungen formuliert.

Damit ist aber noch keine Aussage über das stochastische Verhalten der zusätzlichen Beobachtungen möglich. Um dies zu erreichen, werden diese (in Analogie zur Behandlung von Paßpunkten) als direkt beobachtete Unbekannte in das Normalgleichungssystem eingeführt. Diese Vorgehensweise bietet folgende Vorteile:

- Die Struktur der Normalgleichungsmatrix, insbesondere im Bereich der Punktunbekannten, bleibt erhalten; eine Reduktion auf die unbekannt Bildparameter kann weiterhin leicht durchgeführt werden.
- Die Objektpunkte, die an geodätischen und/oder fiktiven Beobachtungen beteiligt sind, müssen nicht umsortiert werden.
- Die vorhandene Bandstruktur der reduzierten Normalgleichungsmatrix bleibt unbeeinflusst.
- Die zusätzlichen Beobachtungen können praktisch beliebig gewichtet werden; Singularitäten des Normalgleichungssystems werden nicht induziert.
- Besondere Problemstellungen, z.B. freie Ausgleichung photogrammetrischer Blöcke können mit diesem Ansatz bearbeitet werden.

Als 'Nachteil' könnte angeführt werden:

- Erweiterung des Normalgleichungssystems durch Bedingungsgleichungen (banded-bordered-Struktur).

Dieser letzte Umstand fällt umso weniger ins Gewicht, je günstiger das Verhältnis photogrammetrischer Beobachtungen zu geodätischer Paßinformation ist. Wegen der Möglichkeit der Berücksichtigung von zusätzlichen Parametern muß für die Gleichungslösung ohnehin ein Algorithmus implementiert werden, der die Band/Rand-Struktur der Normalgleichungsmatrix berücksichtigt.

Ferner sei bemerkt, daß dieser neue Ansatz nur eine effektive Alternative zu bisherigen Methoden darstellen soll. Eine Verknüpfung mit anderen Vorgehensweisen ist nicht ausgeschlossen.

2.3 MATHEMATISCHE FORMULIERUNG

Die Berücksichtigung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen und Objektinformationen in einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit Nebenbedingungen kann wie folgt durchgeführt werden:

Formulierung der nichtlinearen Beobachtungsgleichungen:

$$\hat{b}_i = f_i(\hat{x}, \hat{t}, \hat{z}, \hat{p}, \hat{f}) \quad (1)$$

Formulierung der nichtlinearen Bedingungsgleichungen:

$$0 = g_i(\hat{x}, \hat{t}, \hat{z}, \hat{p}, \hat{f}) \quad (2)$$

mit:

- \hat{b}_i ausgeglichene Beobachtung i
- f_i nichtlineare Funktion
- g_i nichtlineare Bedingung
- \hat{x} Punktkoordinaten (X_j, Y_j, Z_j)
- \hat{t} Bildparameter ($XO_k, YO_k, ZO_k, \phi_k, \omega_k, \kappa_k$)
- \hat{z} zusätzliche Parameter
- \hat{p} geodätische und fiktive Beobachtungen (Paßinformation)
- \hat{f} freie Unbekannte
(z.B. Orientierungsunbekannte eines Richtungssatzes)

Man beachte bei dieser Formulierung, daß die geodätischen Beobachtungen als zu schätzende Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt werden.

Mögliche Typen von Beobachtungsgleichungen:

- Bildkoordinaten : $\hat{b}_i = f_i(\hat{x}, \hat{t}, \hat{z})$
- direkt beobachtete zusätzliche Parameter : $\hat{b}_i = f_i(\hat{z})$
- Paßpunkte : $\hat{b}_i = f_i(\hat{x})$
- direkt beobachtete Bildunbekannte : $\hat{b}_i = f_i(\hat{t})$
- Paßinformation : $\hat{b}_i = f_i(\hat{p})$
- direkt beobachtete freie Unbekannte : $\hat{b}_i = f_i(\hat{f})$

Mögliche Typen von Bedingungsgleichungen:

- Verknüpfung von Objektpunkten
(Strecken, Zenitdistanzen) : $g_i(\hat{x}, \hat{p}) = 0$
- Verknüpfung von Objektpunkten und
Projektionszentren (Strecken) : $g_i(\hat{x}, \hat{t}, \hat{p}) = 0$
- Formbedingungen und Paßinformation
mit zusätzlichen freien Unbekannten : $g_i(\hat{x}, \hat{t}, \hat{p}, \hat{f}) = 0$

Stochastisches Modell:

Für die Beobachtungen werden \bar{a} -priori-Gewichte festgelegt:

$$p_{b_i} = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{b_i}^2}$$

mit:

σ_o^2 Varianz der Gewichtseinheit

$\sigma_{b_i}^2$ \bar{a} -priori-Varianz der Beobachtung b_i .

Den Bildkoordinatenbeobachtungen wird das Gewicht $p_{b_i}=1.0$ zugeordnet.

Nach Linearisierung der Beobachtungs- und Bedingungsgleichungen und Aufstellen der Normalgleichungen nach den Regeln der vermittelnden Ausgleichung mit Nebenbedingungen ergibt sich das vollständige Normalgleichungssystem zu:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} & N_{xt} & N_{xz} & N_{xk} & 0 & 0 \\ & N_{tt} & N_{tz} & N_{tk} & 0 & 0 \\ & & N_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & -I & N_{kf} \\ \text{symm.} & & & & P_p & 0 \\ & & & & & P_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{dx} \\ \hat{dt} \\ \hat{dz} \\ k \\ \hat{dp} \\ \hat{df} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix}$$

mit:

\hat{dx} Zuschläge zu den Näherungswerten der Punktkoordinaten

\hat{dt} Zuschläge zu den Näherungswerten der Bildparameter

\hat{dz} Zuschläge zu den Näherungswerten der zusätzlichen Parameter

k Lagrange'sche Multiplikatoren (Korrelaten)

\hat{dp} Zuschläge zu den Näherungswerten der geodätischen und fiktiven Beobachtungen

\hat{df} Zuschläge zu den Näherungswerten der freien Unbekannten

P_p Gewichtsmatrix der zusätzlichen geodätischen und fiktiven Beobachtungen

P_f Gewichtsmatrix für beobachtete freie Unbekannte

I Einheitsmatrix

Bemerkung: Blockdiagonalstruktur N_{xx} 3x3 Submatrizen
 N_{tt} 6x6 Submatrizen

Wegen der einfachen Struktur der N_{xx} - und P_p -Matrizen bietet sich die Reduktion des Normalgleichungssystems an.

Das reduzierte, zu lösende Normalgleichungssystem ergibt sich dann zu:

$$\begin{bmatrix}
 N_{tt} - N_{xt}^T N_{xx}^{-1} N_{xt} & N_{tz} - N_{xt}^T N_{xx}^{-1} N_{xz} & N_{tp} - N_{xt}^T N_{xx}^{-1} N_{xp} & 0 & \hat{dt} \\
 \text{symm.} & N_{zz} - N_{xz}^T N_{xx}^{-1} N_{xz} & -N_{xz}^T N_{xx}^{-1} N_{xp} & 0 & \hat{dz} \\
 & & -P_p^{-1} - N_{xp}^T N_{xx}^{-1} N_{xp} & N_{kf} & k \\
 & & & P_f & \hat{df}
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 h_2 - N_{xt}^T N_{xx}^{-1} h_1 \\
 h_3 - N_{xz}^T N_{xx}^{-1} h_1 \\
 h_4 - N_{xp}^T N_{xx}^{-1} h_1 + P_p^{-1} h_5 \\
 h_6
 \end{bmatrix}$$

Nach Lösung dieses banded-bordered-Normalgleichungssystems erhält man die Zuschläge zu den Näherungswerten der Punkunbekannten zu:

$$\hat{dx} = N_{xx}^{-1} (h_1 - N_{xt} \hat{dt} - N_{xz} \hat{dz} - N_{xp} k)$$

2.4 STRUKTURBEISPIEL

Zur Demonstration der Wirkungsweise des neuen Ansatzes und zum Vergleich mit alternativen Lösungsvorschlägen sei folgendes Beispiel gewählt:

AEROTRIANGULATIONSBLOCK	
- Bilder	5x5
- Längsüberdeckung	60%
- Querüberdeckung	30%
- regelmäßiges Objektpunktraster	55
- ohne zusätzliche Parameter	
- Zusatzpaßinformation ohne freie Unbekannte	
- beliebige Paßpunktanordnung	

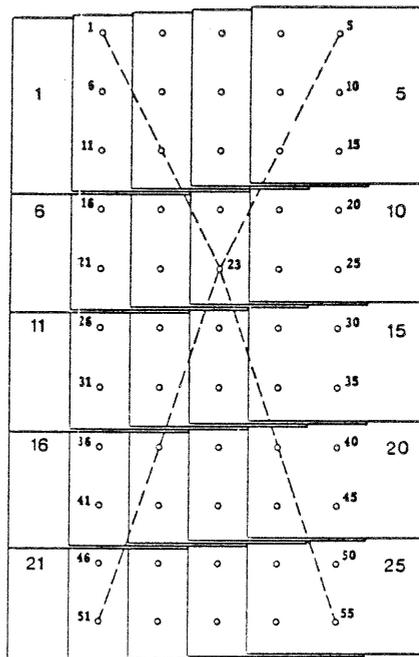


Fig. 1: Skizze eines photogrammetrischen Blocks mit Zusatzpaßinformation

Als zusätzliche geodätische Beobachtungen sind vorhanden:

- die Raumstrecke $P_{23} - P_1$,
- die Raumstrecke $P_{23} - P_5$,
- die Raumstrecke $P_{23} - P_{51}$,
- die Raumstrecke $P_{23} - P_{55}$.

Die Struktur der vollständigen Normalgleichungsmatrix ist, falls die geodätischen Beobachtungen über Verbesserungsgleichungen formuliert werden, in Figur 2 dargestellt.

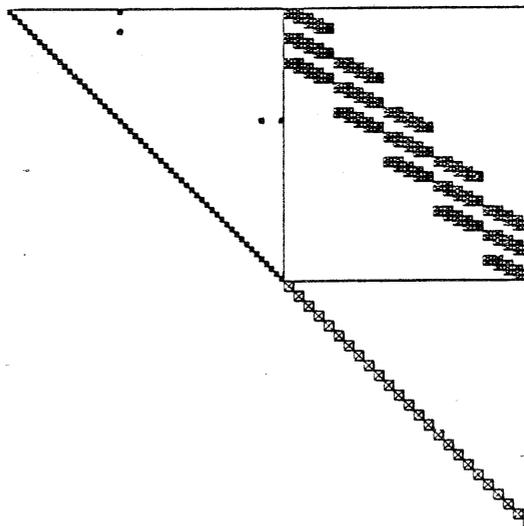


Fig. 2: Vollständige Normalgleichungsmatrix (nicht umsortiert) des photogrammetrischen Blocks mit Zusatzpaßinformation (4 Raumstrecken)

Bei dem vorgestellten Ansatz wird das Normalgleichungssystem um die Bedingungsgleichungen und die geodätischen Beobachtungen erweitert.

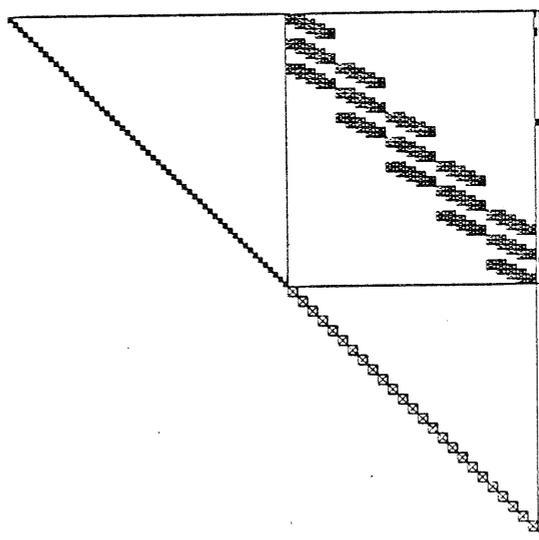


Fig. 3: Vollständige Normalgleichungsmatrix für den neu vorgeschlagenen Ansatz

Nach Übergang auf das reduzierte Normalgleichungssystem zeigt sich folgende Struktur:

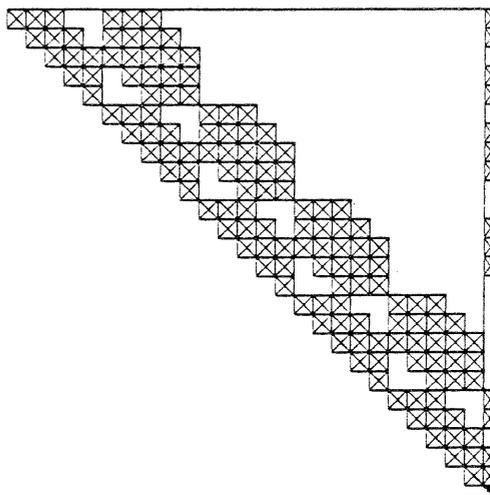


Fig. 4: Reduziertes Normalgleichungssystem

Man erkennt:

- Die Bandstruktur der reduzierten Normalgleichungsmatrix, hier aber mit Rand, bleibt erhalten.
- Die Lösung mit schnellen Algorithmen, die das Band und den Rand berücksichtigen ist möglich.

3. PRAKTISCHE REALISIERUNG

Ausgehend von dem vorgestellten Konzept wurde ein neues Bündelblockprogramm entwickelt. Auf folgende Gesichtspunkte wurde dabei besonders geachtet:

- Hohe Flexibilität bezüglich des Anwendungsbereiches. Das gleiche Programm soll sowohl in der Nahbereichs- als auch in der Aerophotogrammetrie eingesetzt werden können.
- Modularer Programmaufbau, der die Weiterentwicklung begünstigt und Overlaystrukturen ermöglicht.
- Kurze Rechenzeiten, bei optimaler Ausnutzung des Kernspeichers der Rechanlage.
- Programmiersprache FORTRAN IV
- Einfache Handhabung für den Nutzer

Mit dem neuen Bündelblockprogramm können Ausgleichungen von Einzelbildern, Einzelmodellen und umfangreichen Blöcken durchgeführt werden. Es besteht die Möglichkeit

- allgemeine Zusatzpaßinformation (z.B. Strecken, Richtungen, Ebenen, Lote, unterschiedliche Höhensysteme)

zu berücksichtigen und

- unterschiedliche Ansätze für zusätzliche Parameter zu verwenden, für die auch Beobachtungen vorliegen dürfen (z.B. Kalibrierungswerte für Parameter der inneren Orientierung)

Eine grobe Gliederung des Programms wird bei der Handhabung durch den Nutzer sichtbar. Zunächst wird über ein

- (i) Interaktives Dialogprogramm eine Datei der Projektparameter erstellt. Dabei können interaktiv Namen von Dateien und projektspezifische Kenngrößen eingegeben oder Defaultwerte verwendet werden.

Danach wird der so aufgebaute Datensatz als Input für das

- (ii) Bündelblockprogramm verwendet. Die Ausgleichung läuft ohne Operateureingriff als Hintergrund-(Batch-)programm ab.

Der modulare Aufbau des neuen Bündelprogramms gestattet es, beliebige Zusatzpaßinformation zu berücksichtigen. Dies wurde programmintern durch die Unterscheidung zwischen 'punkt-' bzw. 'bild-' spezifischer Information erreicht. Die so 'generalisierte' Information erlaubt es, einerseits unterschiedliche Ansätze für die Zusatzpaßinformation auch künftig leicht zu implementieren und andererseits bei der Vorwegreduktion der Punkte auf die unbekannt Bildparameter, Korrelaten und freien Unbekannten einem vorgegebenen Schema folgen zu können. Dies gilt natürlich auch für unterschiedliche Ansätze von zusätzlichen Parametern zur Korrektur systematischer Fehler.

Aus dem folgenden Ablaufschema werden in aller Kürze die Leistungen des Programmpakets ersichtlich:

I INTERAKTIVES VORPROGRAMM
<p>1. <u>Eingabe von Projektparametern</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Projektname - Kenngrößen (Kammerkonstante, Maßeinheiten ...) - Dateinamen für die Informationsquellen - A priori Genauigkeiten - Berechnung von Genauigkeitseigenschaften? - Simulationsrechnung? - Umfang der Ausgabe
<p>2. <u>Erstellen und Editieren der Informationsquellen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bildkoordinaten - zusätzliche Parameter (optional) - Paßpunkte (optional) - Zusatzpaßinformation (optional) - Objektform (optional)

II HAUPTPROGRAMM

1. Organisation
 - Einlesen der Informationsquellen
 - Erstellung von Verknüpfungslisten
2. Bündelausgleichung
 - Aufstellung der Normalgleichungen
 - Lösung der Normalgleichungen
Iteration bis zum Erreichen unterschiedlicher Abbruchschranken
3. Genauigkeitsberechnung (optional) für
 - Bildparameter
 - Objektpunkte
 - zusätzliche Parameter
 - freie Unbekannte
 - zusätzliche Paßinformation
4. Ausgabe
 - Umfang und Ausgabemedium sind steuerbar durch das Dialogprogramm

4. STAND UND AUSBLICK

4.1 Beispiele zur Leistungsfähigkeit des Programms

Derzeit können Bündelblöcke mit beliebiger Bildanordnung aus der Nahbereichsphotogrammetrie oder aus dem Bereich der Aerophotogrammetrie in einem Guß ausgeglichen werden. Dabei können die Genauigkeitseigenschaften sowohl für die Projektionszentren als auch für die Objektpunkte ermittelt werden. Zwei Beispiele werden kurz vorgestellt:

4.1.1 Hochpräzise Formbestimmung im Nahbereich

Die Form eines Subreflektors eines Antennensystems wurde photogrammetrisch überprüft. Der Bildverband besteht aus 6 horizontalen Aufnahmen, die das Objekt kreisförmig umgeben, sowie 4 Schrägansichten von oben.

Projektparameter:
10 Bilder
89 Neupunkte
5 Paßpunkte
643 Beobachtungen
327 Unbekannte
60 Bandbreite
1.2 ^s CPU pro Iteration

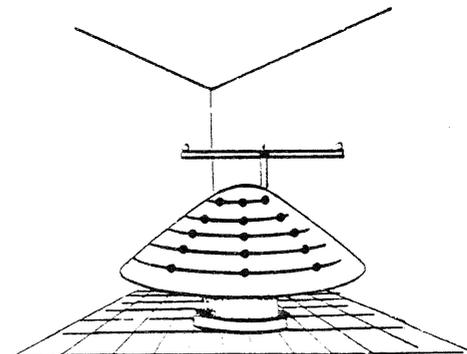


Fig. 5: Subreflektor eines Antennensystems

4.1.2 KAPUNDA - Aerotriangulationsblock

Aerotriangulationstestblock mit 9 Streifen; 60% Längsüberdeckung, 30% Querüberdeckung.

Projektparameter:
81 Bilder
254 Neupunkte
11 Paßpunkte
2675 Beobachtungen
1248 Unbekannte
≈ 15 Punkte/Bild
126 Bandbreite
18.7 ^s CPU pro Iteration
CDC Cyber 175

4.2 EINIGE GEPLANTE ERWEITERUNGEN DES PROGRAMMPAKETS

Der derzeitige Entwicklungsstand des Programms soll durch eine Reihe von Erweiterungen, denen unterschiedliche Priorität zukommt, verbessert werden.

Die kombinierte Ausgleichung von photogrammetrischen und geodätischen Beobachtungen, die im Nahbereich gefordert wird, ist auch in der Aerotriangulation, z.B. in der Katasterphotogrammetrie praxisrelevant. Daher ist es ein unmittelbares Ziel, die Verarbeitung beliebiger geodätischer Zusatzpaßinformation und ggf. Objektinformation über den vorgestellten Ansatz zu realisieren.

In der Nahbereichsphotogrammetrie ist die Simulationsrechnung zur Optimierung des Verhältnisses von Aufwand und erzielbarer Genauigkeit ein sehr nützliches Hilfsmittel. Mit dem neuen Bündelprogramm sollen solche Simulationsberechnungen unter unterschiedlichsten Voraussetzungen möglich sein.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Punktbestimmung wird zuweilen die freie Bündelblockausgleichung herangezogen. Beim vorgestellten Ansatz ist das Konzept der freien Netzausgleichung in einfacher Weise realisierbar, da der Datumsdefekt der Normalgleichungsmatrix über geeignete Bedingungen beseitigt werden kann.

Für die Aufdeckung grober Fehler im Datenmaterial sind statistische Tests notwendig. Die Signifikanz der im Zuge der Ausgleichung bestimmten Unbekannten muß statistisch überprüft werden. Eine Methode zur Aufdeckung grober Fehler, bei der die Beobachtungen auf Grund der im Ausgleichungsprozeß ermittelten Verbesserungen gewichtet werden, ('dänische Methode') soll in das Programmpaket integriert werden.

LITERATUR

- BAARDA, W.: Statistical concepts in Geodesy. Netherlands Geodetic Commission. Publications on Geodesy, Volume 2, Number 4, Delft, 1967.
- EBNER, H.: Self calibrating block adjustment. Invited Paper to the XIIIth Congress of ISP, Commission III, Helsinki, 1976.
- EBNER, H.: Combined Adjustment of Photogrammetric and Non-photogrammetric Information. Invited Paper to the XVth Congress of ISP, Commission III, Rio de Janeiro, 1984.
- FÖRSTNER, W.: Statistical test methods for blunder detection in planimetric block triangulation. Presented Paper to the XIIIth Congress of the ISP, Commission III, Helsinki, 1976.
- GRON, A.: Progress in Photogrammetric Point Determination by Compensation of Systematic Errors and Detection of Gross Errors. Presented Paper of Commission III. ISP Symposium, Moscow, 1978.
- GRON, A.: Gross Error Detection in Bundle Adjustment. International Symposium on Current Trends in the Development, Execution and Use of Aerial Triangulation, Brisbane, 1979, Proceedings.
- HELL, G.: Terrestrische Bildtriangulation mit Berücksichtigung zusätzlicher Beobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 252, 1979.
- KAGER, H. und KRAUS, K.: Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen. Technische Universität Wien. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 8, 1976.
- LARSSON, R.: Simultaneous Photogrammetric and Geodetic Adjustment - Algorithms and Data Structures, Stockholm, 1983.
- STEIDLER, F.: Darstellung und Vergleich von Lösungsstrategien für große schwach besetzte Normalgleichungssysteme in der Geodäsie und in der Photogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 261, 1980.
- STEPHANI, M.: Simultane Auswertung photogrammetrischer, geodätischer und objektbezogener Information an Analytischen Plotttern. Presented Paper to the XVth Congress of ISP, Commission V, Rio de Janeiro, 1984.