

STAND UND TENDENZEN DER NUMERISCHEN PHOTOGRAMMETRIE

von F. Ackermann, Stuttgart

Einleitung

1. Am Anfang dieser photogrammetrischen Woche stehen Übersichtsreferate über Aerotriangulation, Stereokartierung, Orthophotographie und Fernerkundung. Dabei soll jeweils über den erreichten Stand der Verfahren und Anwendungen berichtet werden, ohne näher auf die nur für Spezialisten interessanten Einzelheiten einzugehen.
2. In der Photogrammetrie wurde schon sehr früh numerisch gearbeitet, nachdem mit dem Stereokomparator von Pulfrich (1901) und anderen Konstruktionen die entsprechenden Meßgeräte geschaffen waren. Mit vertretbarem Aufwand blieb die Berechnung der räumlichen Koordinaten von Einzelpunkten im wesentlichen aber auf den (Normal-) Fall der terrestrischen Photogrammetrie beschränkt, bei dem die Elemente der äußeren Orientierung der Bilder direkt gemessen werden.

Mit dem Aufschwung der Luftbildmessung und der Analog-Auswertung nach dem 1. Weltkrieg verschwanden dann die numerischen Verfahren bis etwa 1960 weitgehend aus der photogrammetrischen Praxis (abgesehen von einigen Ausnahmen, die hier nicht diskutiert werden können). Die wirtschaftliche Lösung der Orientierungs- und der Kartierungsaufgaben ebenso wie der Punktbestimmung übernahmen Analog-Auswertegeräte und Analog-Rechner (z.B. Radialschlitztriangulation).

Das Umgehen komplizierter numerischer Berechnungen durch Analog-Lösungen war geradezu die Erfolgsphilosophie der Luftbildmessung etwa ab 1930. Darauf beruhte über 3 Jahrzehnte der große Aufschwung und der praktische Erfolg der Photogrammetrie. O.VON GRUBER konnte damals die Photogrammetrie als die Kunst bezeichnen, Rechnungen zu vermeiden.

3. Weshalb war das so? Es ist im historischen Rückblick interessant festzustellen, daß der Grund nicht im Fehlen numerischer Aufgabenstellungen oder geeigneter Meßgeräte als vielmehr in den unzureichenden Rechenhilfsmitteln zu suchen ist. Sie waren nicht ausreichend, um z.B. auch nur die Aufgabe der Orientierung eines Bildpaares zu lösen, die mathematisch durch die Bestimmung von 12 äußeren Orientierungselementen aus nichtlinearen Beziehungen gekennzeichnet ist, wobei jeweils nur ungenaue Näherungswerte bekannt sind.
4. Diese technologische Situation der Rechenhilfsmittel hat sich seit Mitte der 50er Jahre mit dem Erscheinen der elektronischen Rechanlagen völlig gewandelt. Sie bildeten die entscheidende Voraussetzung, stimuliert durch Neukonstruktionen von Stereo- und Monokomparatoren und den verschiedenen digitalen Registriergeräten sowie teilweise durch neue Aufgabenstellungen (z.B. in der Ballistik), um die heutigen Vorstellungen und Verfahren der numerischen Präzisionsphotogrammetrie zu entwickeln und zu prägen. Dank der modernen Meß- und Rechenhilfsmittel haben sich die numerischen Methoden über die zunächst noch sehr konventionell arbeitende analytische Photogrammetrie zu einem zunehmend selbständigen und eigengesetzlichen Zweig der Photogrammetrie entwickelt, der heute eine ganz wesentliche Komponente ihrer Leistungsfähigkeit bildet und ihr technologisches Bild weithin prägt. Die technischen Hilfsmittel haben inzwischen sogar einen Stand erreicht, daß auch graphische oder photographische Endprodukte, die eine Domäne nicht-numerischer, analoger Arbeitshilfsmittel zu sein schienen, mit numerisch-digitalen Techniken erzeugt werden.

In völliger Umkehrung der Vorstellungen noch vor 20 Jahren könnte man die heutigen Techniken der photogrammetrischen Auswertungen durch das Bemühen kennzeichnen, möglichst viele Prozesse mit numerischen Methoden zu behandeln. Diese Umkehrung beruht ausschließlich auf den Möglichkeiten der modernen Datenverarbeitung. Deren wesentliche technische Entwicklung ist sehr rasch, praktisch innerhalb eines Jahrzehnts, erfolgt. Trotzdem war parallel zur technologischen die Evolution der Denkmodelle und der Zielvorstellungen der numerischen Photogrammetrie - und im Zusammenhang damit der entsprechenden

Rechenprogramme, d.h. der Software - ein recht langwieriger Prozeß, der heute noch anhält. Dieser Aspekt wird bei den folgenden Ausführungen mehrfach gestreift werden.

5. Die numerische Photogrammetrie hat sich in den vergangenen 20 Jahren zunächst auf die Punktbestimmung mit den konventionellen Aufgaben der Aerotriangulation und des Katasters (Koordinatenbestimmung von Grenzpunkten) konzentriert. Die nachfolgenden Ausführungen werden sich ausschließlich mit dieser Klasse numerischer Verfahren beschäftigen.

Auf weitere Entwicklungsrichtungen und Arbeitsbereiche der numerischen Photogrammetrie sei jedoch hingewiesen, nämlich die digitale Bildverarbeitung, die digitalen Geländemodelle und die digitale Kartierung. Diese Themen werden im Verlauf der Photogrammetrischen Woche durch weitere Vorträge behandelt.

Entwicklung der rechnerischen Aerotriangulation

6. Die Aerotriangulation ist definiert als die gemeinsame Bestimmung von Punkten eines Bildverbandes, wobei zwischen der Bestimmung der räumlichen (x, y, z) und der Lagekoordinaten (x, y) unterschieden werden kann. Das eigentliche Problem ist dabei die gemeinsame Orientierung bzw. die Verknüpfung der Bilder eines Verbandes (vgl. Bild 1).

Man kann die Entwicklung der Aerotriangulation unter dem Gesichtspunkt sehen, daß sich im Gesamtprozeß der Punktbestimmung der früher auf analogen, instrumentellen Hilfsmitteln beruhende Hauptanteil ganz eindeutig auf numerische Techniken verlagert hat. Dies gilt insbesondere für die Verknüpfung des Bildverbandes.

7. Die räumliche Aerotriangulation war lange Zeit nur Streifentriangulation. Man hat dabei angestrebt, die Verknüpfung der Bilder im Streifen, die sog. Streifenbildung, möglichst vollständig im Gerät (z.B. Multiplex) zu realisieren. Die eigentliche Messung der Triangulationspunkte erfolgte im Prinzip nach der Herstellung der Verknüpfungen.

Noch deutlicher erkennt man diese Verwirklichung der Verknüpfungen mit nicht-numerischen Hilfsmitteln beim Schlitzschablonen-Blockverband der Radialtriangulation.

Die heutige Strategie ist genau umgekehrt. Man legt die notwendigen Messungen, die noch stets an Analog-Meßgeräte gebunden sind, an den Anfang des Prozesses, belastet die Messungen aber nicht gleichzeitig mit der Realisierung der Verknüpfung von Bildern, abgesehen von der entsprechenden Auswahl der Meßpunkte. Der eigentliche Triangulationsprozeß, die Orientierung bzw. Verknüpfung der Bilder und die Berechnung der Koordinaten der Neupunkte, wird Aufgabe des Rechenprozesses (Bild 2).

8. Diese Umkehrung der Strategie, die angesichts der technischen Hilfsmittel logisch und konsequent erscheint, hat Auswirkungen verschiedener Art:

Der ganze Prozeß der Aerotriangulation ist in sich klarer gegliedert; die einzelnen Schritte sind besser kontrollierbar geworden. Der Meßprozeß ist einfacher und auf die Messung von Bildkoordinaten (und Rahmenmarken) beschränkt.

Umgekehrt müssen die gemessenen Bildpunkte alle rechnerisch zu realisierenden Verknüpfungsfunktionen erfüllen. Daher sind die Vorbereitung, die Auswahl und Codierung der Bildpunkte gewichtiger und wohl auch schwerfälliger geworden. Die vollständige Trennung von Messung und rechnerischer Verknüpfung macht das System zwar leichter kontrollierbar, aber fehleranfälliger und stellt höhere Anforderungen an die formale Organisation.

Eine weitere Folge ist die Entlastung und Vereinfachung der Auswertegeräte. Die numerischen Verfahren der Modellverknüpfung haben dazu geführt, daß die früheren Geräte 1. Ordnung (mit Basiswechsel) nicht mehr gebaut werden. Die heute weit verbreiteten Präzisions-Stereoauswertegeräte sind als Meßgeräte für die Aerotriangulation (mit der Methode der unabhängigen Modelle) geeignet

und in der Praxis vielfach dafür eingesetzt. Im übrigen geht die Tendenz aus Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsgründen auf Stereo- oder Monokomparatoren. (Die Verwendung von analytischen Auswertegeräten als Stereokomparatoren sei dabei inbegriffen.)

Andererseits stellt die Abhängigkeit von Software (Rechenprogrammen) und von Rechenanlagen eine erhebliche Belastung der Aerotriangulation dar, die hier nicht übersehen werden soll.

Die genannten Auswirkungen der rechnerischen Punktbestimmung besagen in erster Linie, daß die moderne Aerotriangulation gegenüber früher organisatorisch anders strukturiert ist. Gerade damit sind aber die Vorbedingungen geschaffen für die ganz gewaltige Ausweitung, Qualitäts- und Leistungssteigerung der Aerotriangulation, die im folgenden besprochen werden. Es sei jedoch nicht verkannt, daß die Behandlung einfacher Fälle, wie die Überbrückung einiger weniger Bildpaare in einem Streifen, gegenüber den früheren individuellen Verfahren heute eher schwerfälliger geworden ist.

9. Die Zunahme des rechnerischen Anteils im Prozeß der Aerotriangulation hat sich schrittweise vollzogen. Zunächst wurde lediglich bei der Streifentriangulation die bis dahin graphische oder mechanische Korrektur der im Analoggerät gebildeten Streifen rechnerisch durchgeführt. Man unterschied deutlich zwischen Streifentriangulation = Streifenbildung und der nachfolgenden Ausgleichung (Bild 2). Für die rechnerischen Korrekturen wurden einfache Polynomansätze benutzt. Sie sind verschiedentlich durch leistungsfähigere Interpolationsverfahren mit verknüpften Polynomen oder Spline-Funktionen erweitert worden.

Das Prinzip der nachträglichen rechnerischen Korrektur von Streifen durch Polynome oder verwandte Interpolationsformeln war durch seine Einfachheit sehr attraktiv. Es wurde deshalb auch beim Übergang auf rein rechnerische Verfahren der Streifenbildung (analytische Streifentriangulation) beibehalten und auf die Blockausgleichung, d.h. auf die gleichzeitige Korrektur aller Streifen eines Blocks übertragen. Die Polynomverfahren der Blockausgleichung sind heute weit verbreitet. Sie sind als Interpolationsverfahren zu charakterisieren und zeichnen sich durch einfache mathematische Ansätze und vergleichsweise geringe Anforderungen an die Rechentechnik aus.

10. Im völligen Gegensatz zu den Polynom-Verfahren der Blockausgleichung stehen die beiden anderen Verfahrensgruppen der Block-Triangulation die als die Bündel-Methode und die Methode der unabhängigen Modelle bekannt sind und die als verhältnismäßig strenge Ausgleichung gelten.

Sie gehen von gemessenen Bild- oder Modellkoordinaten als Beobachtungen im Sinne der Ausgleichung aus und streben an, die Lösung der Gesamtaufgabe in einem möglichst direkten, umfassenden Rechenalgorithmus zu bewältigen. Er umfaßt die gemeinsame Orientierung und Verknüpfung aller Bilder oder Modelle und die Koordinatenbestimmung der Neupunkte. Der ganze Prozeß ist als Kleinste-Quadrate-Ausgleichung (mit vereinfachtem stochastischen Modell) angesetzt, so daß die Unterscheidung in Aerotriangulation und Ausgleichung völlig entfällt. Man spricht seitdem von Blocktriangulation an Stelle von Blockausgleichung (Bild 2, Tabelle 1).

Der wesentliche Inhalt des Rechenprozesses sind die gleichzeitigen Transformationen aller Einzelbilder oder Bildpaare, unter Beachtung aller Verknüpfungen und Paßpunkte. Bei der Bündelmethode handelt es sich um projektive Transformationen, bei der Methode der unabhängigen Modelle um räumliche Ähnlichkeitstransformationen.

Mit dieser Konzeption ist die Aerotriangulation zwar klar in Messung (einschließlich Vorbereitung) und Berechnung gegliedert, die Anforderungen an den Rechenprozeß sind jedoch außerordentlich hoch.

11. Die hohen Anforderungen an den Rechenprozeß ergeben sich aus mehreren Gründen:

Die Gleichungssysteme sind in der Regel mit 10^3 bis 10^4 Unbekannten sehr umfangreich. Gewisse Reduktionsmöglichkeiten ändern diese Situation nicht wesentlich.

Die Gleichungssysteme sind nicht-linear. Die Lösung muß daher mit jeweiliger Linearisierung in mehreren Iterationen schrittweise angenähert werden. Glücklicherweise konvergieren die Iterationen bei dem Newtonschen Verfahren (jeweilige volle Kleinste-Quadrate-Lösung bei jedem Schritt) schnell.

Das Problem der iterativen Annäherung wird dadurch verschärft, daß am Anfang nur ungenaue Näherungswerte für die Unbekannten und damit für die Linearisierungen bekannt sind. Die automatische Beschaffung von Näherungswerten stellt besonders bei der Bündelmethode, die im Gegensatz zur Methode der unabhängigen Modelle stark davon abhängig ist, ein eigenes Problem dar.

Und schließlich liegt eine besondere Schwierigkeit darin, daß das Datenmaterial praktisch stets grobe Fehler enthält, die erst im Verlaufe der Ausgleichung entdeckt und eliminiert werden können.

Gelegentlich ergeben sich weitere Schwierigkeiten dadurch, daß ein Block geometrisch nur schwach bestimmt ist (Gefahr der Singularität) und dann Probleme der begrenzten Rechenschärfe auftreten können.

12. Neben der Aufzählung der mathematischen Probleme der rechnerischen Aero-triangulation muß ganz besonders auf die mit dem digitalen Rechner, der Datenadministration und der Speicherung zusammenhängenden Probleme hingewiesen werden. Der ganze Prozeß ist unter dem Gesichtspunkt der automatischen Verarbeitung großer Datenmengen (bis zu $5 \cdot 10^4$ gemessene Koordinaten) zu sehen.

Die großen Rechenprogramme der Aerotriangulation treiben daher für die Datenverwaltung einen erheblichen Aufwand, der im Programm etwa den Umfang der rein arithmetischen Befehle erreicht.

Gemeint sind hierbei die vielerlei Prüfungen der Daten auf formale Fehler und auf Mindestbedingungen für die Lösbarkeit des Systems. Ein wichtiger Punkt ist bei möglichst einfacher Form der Dateneingabe und der Codiervorschriften die automatische Zuordnung der Meßdaten in ihren verschiedenen Funktionen (Verknüpfungen, Paßpunkte). Im Zusammenhang damit steht die optimale Reihenfolge in der Anordnung bzw. Numerierung der Unbekannten, was über die sog. Minimierung der Bandbreite der Koeffizientenmatrix den zur direkten Lösung der Normalgleichungen erforderlichen Rechenaufwand sehr stark (quadratisch) beeinflußt. Diese Probleme werden umso komplexer, je verschiedenartiger die eingebrachten Daten sind (Hilfsdaten wie APR-Profile, Laser-Altimeter- oder Statoskop-Messungen; terrestrische Strecken- und Richtungsmessungen, Höhendifferenzen).

Weitere Probleme sind der möglichst effiziente Zugriff der extern gespeicherten Daten, um möglichst kurze Rechenzeiten zu erzielen. Die vollautomatische Bereinigung der Daten von groben Fehlern ist zwar noch nicht verwirklicht, aber vom Rechenprogramm werden wirksame Hinweise für die manuelle Datenbereinigung verlangt.

13. Im vergangenen Jahrzehnt sind eine Reihe von Rechenprogrammen entstanden, die den aufgezählten Anforderungen sehr weitgehend entsprechen. Mit ihnen ist die Durchführung bzw. Berechnung der Aerotriangulation aus dem photogrammetrischen fast vollständig in den Bereich der Datenverarbeitung übergegangen und weitgehend automatisiert worden. Solche Programme existieren sowohl für die Bündelmethode als auch für die Methode der unabhängigen Modelle.

Diese auf praktisch alle Fälle der Aerotriangulation allgemein anwendbaren Rechenprogramme haben in allen Fällen einen hohen Entwicklungsaufwand von mindestens 5 - 10 Mannjahren benötigt. Sie gehören zu den anspruchsvollsten und umfangreichsten, die es im Bereich der praktischen Photogrammetrie und Geodäsie gibt.

Der zu bewältigende Rechenaufwand liegt bei Blocktriangulationen in der Größenordnung von 1 Million Multiplikationen pro Bild, ist also sehr hoch. Entsprechend setzen diese Rechenprogramme schnelle Computer mit entsprechender Kernspeicherkapazität voraus. Die notwendigen Leistungen werden heute schon von Computern der Mittelklasse erbracht, wie z.B. IBM 370/145. Man ist also nicht auf ausgesprochene Großrechenanlagen angewiesen. Dennoch bleibt die Tendenz zum Großrechner aus Gründen der Wirtschaftlichkeit bestehen, da die Kosten pro Rechenoperation im allgemeinen immer noch niedriger sind als bei langsamen Anlagen.

Bei schnellen Rechenanlagen (wie z.B. CDC 6600, UNIVAC 1108, IBM 370/165) betragen die Rechenzeiten (CPU-Zeiten) für Blockausgleichungen nach der Methode der unabhängigen Modelle nur noch etwa 1 sec/Modell (s. Tab. 2).

Bei der rechenaufwendigeren Bündelmethode dürften die entsprechenden Zeiten jedenfalls unter 5 sec/Bild bleiben. Diese Angaben gelten für einen vollständigen Durchgang einer Ausgleichung. Danach könnten die Rechenkosten im Vergleich zu den Kosten der Messung praktisch völlig vernachlässigt werden, weist sich also die rechnerische Aerotriangulation als ein höchst wirtschaftliches System aus.

Dieses außerordentlich günstige Bild wird dadurch empfindlich gestört, daß bis zur völligen Bereinigung des Datenmaterials von groben Fehlern in der Regel die Ausgleichung 3 bis 6 mal, in ungünstigen Fällen noch öfter wiederholt werden muß. Die Datenbereinigung, die bisher manuell erfolgt, erfordert also einen vergleichsweise sehr hohen Arbeits- und Rechenaufwand, der offenbar nur wenig von der Strategie der Fehlersuche abhängt (schrittweise durch vorläufige Teilausgleichungen oder durch Gesamtausgleichung), über die unter den Experten keine Einigkeit besteht und bisher keine Untersuchungen bekannt sind.

Es ist deutlich, daß für eine weitere und erhebliche Kostensenkung der Rechenverfahren der Aerotriangulation eine wirksamere, automatische Datenbereinigung erforderlich ist.

14. Bei einem Überblick über die Entwicklung der rechnerischen Aerotriangulation kann man nach praktischen Gesichtspunkten mit dem erreichten Stand recht zufrieden sein. Abgesehen von der automatischen Datenbereinigung sind die wichtigsten Anforderungen erfüllt, die man sich vor einem Jahrzehnt wünschen konnte. Wir verfügen über außerordentlich leistungsfähige Systeme, die den ganzen Prozeß der Aerotriangulation stark vereinfacht und vereinheitlicht haben. Die rechnerischen Lösungen sind in der Praxis sehr verbreitet eingeführt. Sie haben die Genauigkeit der Aerotriangulation ganz erheblich verbessert (s.u.) und ihre Anwendungen stark ausgeweitet. Die Rechenprogramme sind derartig allgemein, daß praktisch kaum mehr Beschränkungen hinsichtlich Blockgröße, Anzahl der Punkte und Paßpunkte, der Mehrfachüberdeckungen und zum Teil auch hinsichtlich der Einbeziehung von Hilfsdaten bestehen. Die Verfahren sind außerdem wirtschaftlich, so daß tatsächlich die Aerotriangulation im vergangenen Jahrzehnt ein völlig neues Leistungsniveau erreicht hat. Dabei ist die Feststellung wesentlich, daß dieses günstige Bild nicht für isolierte Spitzenanwendungen oder wissenschaftliche Projekte gilt sondern an vielen Stellen der täglichen Praxis entspricht.

Diese Fortschritte wurden durch intensive Programmentwicklungen erreicht und setzen als Hilfsmittel leistungsfähige Computer voraus. Auf die entsprechenden organisatorischen Umstrukturierungen wurde eingangs schon hingewiesen.

15. Das Leistungsniveau der Aerotriangulation ist, abgesehen von den Messungen, durch Rechenprogramme und schnelle Computer gekennzeichnet. Gerade diese technologischen Bedingungen sind es aber auch, die der vollständigen Verbreitung der rechnerischen Verfahren als praktisches Hindernis entgegenstehen.

Kleine Firmen und Behörden verfügen nicht ohne weiteres über die Rechenprogramme. Der Zugang zu den entsprechenden Rechenanlagen ist ebenfalls nicht überall möglich. Für Kleinprojekte erscheinen außerdem einfachere Rechenverfahren ausreichend und ein großer Teil der aufwendigen Datenadministration der großen Rechenprogramme entbehrlich zu sein.

Die Lösung, die Berechnung von Aerotriangulationen außer Haus an Rechen-service-Zentren zu geben, wird vielfach nur zögernd beschritten. Sie bringt zumindest organisatorische und Kommunikationsprobleme mit sich und ist nicht überall durchführbar.

Aus diesen Gründen wird immer wieder aus der Praxis der Wunsch nach einfacheren Rechenprogrammen laut, die nur Midi-Computer oder gar Tischrechner benötigen, die jedermann zugänglich sind. Auf dieselben Gründe ist auch die nach wie vor verbreitete Anwendung von Polynom-Verfahren zurückzuführen, obwohl sie in der Genauigkeit und bei der Lokalisierung grober Datenfehler den strengeren Verfahren unterlegen sind (abgesehen von den Streifen-

ausgleichungen), sich im Gesamt-Rechenaufwand gar nicht so sehr von ihnen unterscheiden und daher kaum wirtschaftlicher sind. Man kann diesen Argumenten eine gewisse Berechtigung nicht versagen. Zweifellos sollten für kleine Aerotriangulationsprojekte ausreichende Rechenprogramme für Tisch- und Midi-Computer entwickelt werden.

Dem Wunsch, die anspruchsvolle rechnerische Aerotriangulation auf kleinere Computer zu übertragen, stehen jedoch bis auf weiteres folgende Argumente entgegen: Vereinfachte Rechenprogramme oder die schrittweise Lösung der Aufgabe verlagern einen Teil des Aufwandes in die Bearbeitung, speziell in die Vorbereitung, Messung und Codierung (z.B. Punktnumerierung) und insbesondere in die Paßpunkte, was insgesamt nur scheinbar wirtschaftlicher ist. Sie schreiben durch die Beschränkung auf bestimmte Voraussetzungen den entsprechenden Anwendungsstand fest und verhindern die weitere Ausdehnung der Aerotriangulation nach Leistung, Umfang und Anwendungen. Ebenso werden die weiteren Entwicklungen (Fehlersuche, zusätzliche Parameter, s.u.) eher verhindert und die Leistungsmöglichkeiten der Aerotriangulation nicht ausgeschöpft. Durch die permanente Steigerung der Anforderungen und die vielen Parallel-Entwicklungen ist auch der gesamte Programmieraufwand nicht wesentlich geringer als bei den wenigen Großprogrammen. Außerdem werden an die Qualität der Programmierungen ebenfalls sehr hohe Anforderungen gestellt. Die rechnerische Aerotriangulation ist Anfang der 60er Jahre schon einmal durch eine ähnliche Entwicklung hindurch gegangen, die nach kurzer Zeit überholt war. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß in Entwicklungs-ländern, Einrichtung, Betrieb und Wartung regionaler Rechenzentren einschließlich der Programmpflege eher gegeben ist als die Ausrüstung photogrammetrischer Dienststellen mit Midi-Computern.

Genauigkeit und Anwendungen der Blocktriangulation

16. Die Erfolge und Anwendungen der Blocktriangulation hängen eng mit ihren Genauigkeitseigenschaften zusammen. Darüber liegen umfangreiche theoretische Untersuchungen vor, die auf der vereinfachten Annahme beruhen, daß nur zufällige, unkorrelierte Fehler wirksam seien (z.B. Bild 3, Bild 4). Unter dieser einschränkenden Voraussetzung haben wir heute eine ziemlich vollständige Übersicht über die wichtigsten durchschnittlichen Genauigkeitseigenschaften ausgeglichener Streifen und Blöcke, und zwar in Abhängigkeit von der Anzahl und Anordnung der Paßpunkte, von Blockgröße und Überdeckung ($q = 20\%$, 60%), von der Anzahl der Verknüpfungen, von den verfügbaren Hilfsdaten und (mit Einschränkungen) von der angewendeten Rechenmethode. Diese Erkenntnisse spielen heute bei der Projektplanung eine wichtige Rolle.

Nachfolgend werden einige der Genauigkeitseigenschaften aufgeführt, die entscheidende Auswirkungen auf die Anwendungen gehabt haben.

17. Hinsichtlich der Lagegenauigkeit von Bündel- und von Modellblöcken ist die Anordnung der Lagepaßpunkte am Blockrand von besonderer Bedeutung. Dabei folgt die Fehlerfortpflanzung (zufälliger Fehler) einem besonders günstigen, logarithmischen Gesetz, daß selbst bei sehr großen Blöcken die durchschnittlichen Lagefehler die Meßgenauigkeit (σ_0) der Bild- oder Modellkoordinaten nur wenig übersteigen ($\mu_{xy} < 2\sigma_0$). Man kann pauschal sagen, daß die Lagegenauigkeit des Blocks bei Paßpunkt-Randbesetzung in der Größenordnung der Genauigkeit des Einzelmodells bleibt.

Die Folgerung daraus ist, daß für kleinmaßstäbe Kartierungen Großblöcke zweckmäßig und wirtschaftlich sind. Mit aufgelockerter Paßpunkt-Randbesetzung auch größter Blöcke werden die Genauigkeitsanforderungen erfüllt und gleichzeitig die Anzahl der notwendigen Paßpunkte ganz entscheidend reduziert. Je aufwendiger die Paßpunktbestimmung im Gelände ist, desto wirtschaftlicher sind Großblöcke. Die praktische Grenze der Großblöcke liegt bei 1500 bis 2000 Modellen (Beispiel COED, Canada, Bild 5). Die Übernahme dieses Prinzips z.B. für die Top.Karte 1:50 000 in Canada hat inzwischen dazu geführt, daß die Aerotriangulation aus dem früheren Engpaß der Paßpunktbestimmung herausgekommen ist und der Kartierung deutlich vorausseilt. Mit Hilfe der sozusagen auf Vorrat arbeitenden Aerotriangulation wird dort von den noch nicht kartierten Gebieten eine Datenbank (topographical data base) angelegt.

18. Die zweite Folgerung aus der hohen Lagegenauigkeit von Blöcken betrifft die großen Bildmaßstäbe. Auch dabei bleibt die Genauigkeit des Einzelmodells bestimmend, sodaß mit Bildmaßstäben um 1:5000 im flächenhaften Block Lagegenauigkeiten um 5 cm oder besser erzielt werden können. Wichtig ist dabei, daß man weitgehend unabhängig von der Dichte der gegebenen Paßpunkte ist. In den großmaßstäbigen Anwendungen liegen vielfach gleichmäßig verteilte Paßpunkte aus trigonometrischen oder Polygonnetzen vor. Häufig genügen diese Punkte (abgesehen von gewissen Lücken am Blockrand) unmittelbar für die Aerotriangulation, sodaß die gesonderte Paßpunktbestimmung praktisch entfallen kann.

Diese Zusammenhänge haben der numerischen Photogrammetrie den Anwendungsbereich der Punktbestimmung hoher Genauigkeit erschlossen, und zwar mit der weitgehenden Unabhängigkeit von den Paßpunkten unter wirtschaftlich günstigen Bedingungen. Bekannte Beispiele sind in unserem Raum die Koordinatenbestimmung von Kataster-Grenzpunkten. Weiterhin sind aus mehreren Ländern erste Anwendungen der photogrammetrischen Punktbestimmung für die geodätischen Zwecke der Netzverdichtung bekannt geworden.

19. In Bezug auf die Höhengenauigkeit und die Einsparung von Höhenpaßpunkten hat die rechnerische Aerotriangulation zunächst nicht die gleichen spektakulären Erfolge gehabt wie hinsichtlich der Lagegenauigkeit. Immerhin ist das Genauigkeitsniveau ebenfalls gesteigert worden und konnte nachgewiesen werden, daß mit Weitwinkel-Bildern bei Überbrückungen von 4 - 5 Basislängen eine absolute Höhengengenauigkeit im Streifen (!) oder Block von 0.1 % der Flughöhe erreicht wird, was der Höhengengenauigkeit des Einzelmodells entspricht. Dieser Befund ist für Präzisions-Höhenauswertungen höchst wesentlich.

Für kleinmaßstäbige Höhenauswertungen hat erst die Einbeziehung von Stoskop- oder APR-Daten (APR = Radar-Höhenprofil-Messung) in die Blockausgleichung einen entscheidenden Durchbruch gebracht, der die Abhängigkeit von Höhenpaßpunkten drastisch reduziert. Mit diesen Hilfsdaten ist es nun möglich, für Schichtlinienauswertungen mit Äquidistanzen von 50 m, 20 m und 10 m, wie sie in der kleinmaßstäbigen Kartierung vorkommen, ebenfalls Großblöcke zu verwenden, die in der Fläche keine Höhenpaßpunkte zu haben brauchen. Damit sind für kleinmaßstäbige Kartierungen die Abhängigkeiten von Höhenpaßpunkten noch drastischer reduziert als von Lagepaßpunkten.

20. Die theoretischen und experimentellen Genauigkeitsuntersuchungen lassen erkennen, daß die sog. Meßgenauigkeit, d.h. die Genauigkeit der gemessenen Bild- oder Modellkoordinaten für die Genauigkeit der ausgeglichenen Streifen und Blöcke von primärer Bedeutung ist. Für diese Meßgenauigkeit erhält man aus jeder Ausgleichung eine Schätzung in Form des σ_0 -Wertes. Nach den bisherigen Erfahrungen kann man je nach Art und Auswahl der zu messenden Punkte, insbesondere der Verknüpfungspunkte, verschiedene Genauigkeitsklassen unterscheiden.

Für die Methode der unabhängigen Modelle (mit Lage-Höhen-Iteration, wobei für Lage- und Höhenausgleichung getrennte σ_0 -Werte erhalten werden) liegen folgende Erfahrungsbereiche für Weitwinkel-Bilder vor:

- a) Topographische Anwendungen, künstlich markierte Verknüpfungspunkte oder natürliche Verknüpfungspunkte; Messungen mit Komparator oder Zweibild-Auswertegeräten:

$$\sigma_{OL} \approx 15 \mu\text{m bis } 30 \mu\text{m} \quad \sigma_{OH} \approx 15 \mu\text{m} \approx 0.1 \% h$$

- b) Präzisions-Auswertungen, signalisierte Verknüpfungs- und Paßpunkte oder natürliche Verknüpfungspunkte hoher Präzision; Messungen an Zweibild-Auswertegeräten:

$$\sigma_{OL} \approx 8 \mu\text{m bis } 12 \mu\text{m} \quad \sigma_{OH} \approx 12 \mu\text{m bis } 15 \mu\text{m} \leq 0.1 \% h$$

- c) Wie b), Messungen mit Komparator:

$$\sigma_{OL} \approx 4 \mu\text{m bis } 8 \mu\text{m} \quad \sigma_{OH} \approx 8 \mu\text{m bis } 10 \mu\text{m} \approx 0.05\text{-}0.07 \% h$$

Für die Bündelmethode liegen die σ_0 -Werte für Präzisionsauswertungen mit signalisierten Geländepunkten in der Praxis im Bereich von

$$\sigma_0 \sim 4 \mu\text{m bis } 10 \mu\text{m}.$$

Hierzu sei angemerkt, daß sich bei der Bündel- und Modellmethode die σ_0 -Werte auf verschiedene Größen beziehen (Bildkoordinaten bzw. Modellkoordinaten, Lage) und daher nicht direkt vergleichbar sind. Unter sonst gleichen Umständen müßte theoretisch das Verhältnis 1,5 zwischen ihnen bestehen. Die empirischen Ergebnisse bestätigen dieses theoretische Verhältnis vorläufig noch nicht eindeutig (s.u.).

21. Neben den theoretischen sind in den letzten Jahren eine Reihe von teilweise sehr umfangreichen empirischen Untersuchungen von Genauigkeiten ausgeglichener Streifen und Blöcke durchgeführt worden (siehe z.B. Tab. 3, 4, 5). Ohne die Ergebnisse hier im einzelnen zu besprechen, können etwa folgende Pauschalaussagen getroffen werden:
- Bei Streifentriangulation mit Minimal-Paßpunktbesetzung sind die Polynomverfahren den strengeren Verfahren gleichwertig.
 - Bei Blocktriangulationen ist die Genauigkeitsleistung der Polynom-Verfahren dagegen deutlich geringer als die der strengeren Verfahren.
 - Das hohe absolute Genauigkeitsniveau der ausgeglichenen Blöcke ist empirisch bestätigt. Insbesondere sind die praktisch wichtigen Fälle der Paßpunkt-Randbesetzung und der flächenhaften Verteilung von Lagepaßpunkten als praktisch gleichwertig ausgewiesen. Die Theorie ist mit $\mu_{xy} < 2\sigma_0$ wenigstens insoweit bestätigt, daß man diese Paßpunktanordnungen in der Praxis anwenden kann. Ebenso ist die gute Höhengenaugigkeit von Streifen und Blöcken mit $\mu_z \approx 0.1 \% h$ für kurze Überbrückungsdistanzen nachgewiesen.
 - Andere theoretische Befunde haben sich jedoch empirisch nicht bestätigen lassen. Hierzu gehören die Fälle ungünstiger und schwacher Paßpunktanordnungen sowie Blöcke mit 60 % Querüberdeckung. In diesen Fällen muß zunächst noch gewarnt werden, sich auf die theoretischen Erwartungen zu verlassen.
 - Hinsichtlich des Vergleichs zwischen Bündel- und Modellmethode hat sich die theoretische Überlegenheit der Bündelmethode noch nicht eindeutig nachweisen lassen. Es sind sogar gegenteilige Ergebnisse bekannt.
22. Zusammenfassend muß zum Stand der Aerotriangulation betont werden, daß mit den rechnerischen Verfahren das praktische Leistungsniveau ganz beträchtlich gesteigert worden ist. Es werden regelmäßig und zuverlässig Genauigkeiten erreicht, die nach früheren Vorstellungen als extrem hoch gelten. Daraus haben sich der Präzisions-Aerotriangulation neue Anwendungen erschlossen. Die relative Unabhängigkeit von Paßpunkten und der Wegfall von Begrenzungen aller Art haben die Aerotriangulation zu einem wirtschaftlichen, flexibel einsetzbaren Verfahren gemacht, dessen Bedeutung und Anwendung innerhalb der Photogrammetrie deutlich zugenommen hat. Weiterhin sind die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Projektparametern immerhin so gut bekannt, daß das Verfahren als unproblematisch und zuverlässig gelten kann, vielleicht für die Praxis das wichtigste und erfreulichste Ergebnis dieser Entwicklung.

Systematische Bildfehler, Selbstkalibrierung

23. Wenn soeben festgestellt wurde, die wichtigsten der theoretisch erwarteten Genauigkeitsleistungen der Blocktriangulation hätten sich in der Praxis im wesentlichen bestätigt, so gilt diese Aussage nur höchst pauschal. Sie bedeutet praktisch nur, daß bei hinreichender Paßpunktbesetzung ein sehr hohes Genauigkeitsniveau erreicht wird. Tatsächlich haben aber entsprechende Untersuchungen ergeben, daß bei genauerem Hinsehen die empirischen Ergebnisse mit den theoretischen Erwartungen nicht genügend übereinstimmen. Signifikante Diskrepanzen zeigen sich im Verhältnis der Absolutgenauigkeiten $\mu_{x,y}$ und μ_z zu den σ_0 -Werten. Die Methodenvergleiche entsprechen nicht den theoretischen Erwartungen. Und insbesondere die empirische Abhängigkeit der Absolutgenauigkeit von Blockgröße und aufgelockerter Paßpunktanordnung widerspricht der Theorie umso mehr, je schwächer die Paßpunktbesetzung ist. Besonders kraß klaffen die theoretischen Erwartungen mit den tatsächlich erreichten Höhengenaugigkeiten bei Blöcken mit 60 % Querüberdeckung auseinander, bei denen beispielsweise die gemeinsame Blockausgleichung größere mittlere Höhenfehler ergeben kann als jeder der beteiligten Halblöcke für sich.

24. Obwohl wegen des hohen Aufwandes nur wenige derartige Untersuchungen existieren, muß die in geringerem oder stärkerem Maße beobachtete Nichtübereinstimmung zwischen theoretischen und praktischen Genauigkeitsergebnissen als höchst signifikant gewertet werden. Die Ursache ist darin zu suchen, daß die vereinfachten theoretischen Annahmen über das mathematische Modell des photogrammetrischen Meßbildes (strenge Zentralperspektive mit vorgegebener innerer Orientierung und zufällige, unkorrelierte Fehler der Bildkoordinaten) nicht genügend den Realitäten der Luftbilder und der Bildkoordinaten-Messung entsprechen. Es muß also ein allgemeineres Fehlermodell aufgestellt und berücksichtigt werden, das systematische Fehler (Trend), stochastische Abhängigkeiten (Korrelationen) und die zufälligen Fehleranteile ("Rauschen") beinhaltet.

Im Grunde hat auch niemand erwartet, daß der vereinfachte theoretische Ansatz ausreichend sein würde. Die Frage war, wieweit man mit ihm kommen würde. Wir können heute feststellen, daß das konventionelle mathematische Modell der Bündelmethode und der Methode der unabhängigen Modelle sich zwar im praktischen Sinne als außerordentlich leistungsfähig erwiesen hat, daß es aber im Genauigkeitsbereich unter $10 \mu\text{m}$ nicht mehr realistisch ist und verfeinert werden muß. Dieser Befund ist sehr deutlich. Es sei aber daran erinnert, daß man noch vor kurzer Zeit nicht zu hoffen wagte, für die Aerotriangulation in diesem extremen Genauigkeitsbereich Aussagen machen zu können.

25. Die Verfeinerung des mathematischen Modells und seine Berücksichtigung bei der rechnerischen Punktbestimmung ist seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung und Entwicklung in der Aerotriangulation. Man beschränkt sich dabei zunächst, weil offenbar am wirksamsten, auf die Erfassung und Berücksichtigung systematischer Bildfehler, d.h. systematische Bilddeformationen.

Zunächst wurde durch Simulation nachgewiesen, daß gewisse systematische Bildfehler zu erheblichen Blockdeformationen führen können, vor allem bei schwachen Paßpunktbesetzungen. Dabei kann man noch unterscheiden, ob sich die Anwesenheit systematischer Fehler in Spannungen im Block bemerkbar macht oder unerkannt bleibt. In anderen Fällen werden systematische Fehler durch den Prozeß der Blocktriangulation weitgehend kompensiert bzw. wird ihre Fortpflanzung auf den Block verhindert.

Die weiteren Untersuchungen (durch Fehleranalysen und mit Hilfe der inzwischen verfügbaren Rechenprogramme mit Selbstkalibrierung, s.u.) haben empirisch bestätigt, daß praktisches Bildmaterial fast stets mehr oder weniger ausgeprägt systematische Bildfehler mit maximalen Beträgen um $10 \mu\text{m}$ enthält. Entsprechende Modelldeformationen treten in ähnlicher Größe auf (s. Bild 6).

Das bis heute verfügbare Material läßt noch keinen eindeutigen Schluß auf das Auftreten bestimmter Typen von Bildfehlern zu. In einigen Fällen sind jedoch mit Beträgen von über $10 \mu\text{m}$ recht große und auf ganz bestimmte Typen beschränkte Modelldeformationen aufgetreten (Lage: Affinitäten und Trapezform, Höhe: Verwindung, Durchbiegungen), die sich in Abhängigkeit von der verwendeten Kammer-Film-Kombination als bemerkenswert konstant herausgestellt haben.

Man muß demnach mit dem Auftreten signifikanter systematischer Bild- und Modellfehler rechnen.

26. Die Aerotriangulation steht somit vor der Aufgabe, die jeweiligen systematischen Bildfehler zu erfassen und rechnerisch zu korrigieren.

Hier ist zunächst auf die Möglichkeit der Bildkalibrierung von Testfeld-Aufnahmen hinzuweisen, mit der deutliche Genauigkeitsverbesserungen erreichbar sind. Die Übertragbarkeit der Korrekturen und die praktischen Voraussetzungen werden jedoch nicht stets gegeben sein.

Die beste und allgemein anwendbare Methode, systematische Bildfehler zu erfassen und zu korrigieren, sieht man derzeit in der Methode der Selbstkalibrierung. Sie ist auch unter der Bezeichnung Blockausgleichung mit zusätzlichen Parametern bekannt. Dabei werden zur Beschreibung der Bildfehler zusätzliche Korrekturglieder in die mathematische Formulierung der Blockausgleichung eingeführt (Tab. 1.4). Im Unterschied zu den bisher üblichen und weiterhin beibehaltenen "a-priori" Korrekturen sind diese Korrekturglieder zunächst unbekannt. Ihre Zahlenwerte werden zusammen mit allen anderen Unbekannten durch die Blockausgleichung bestimmt.

Die Selbstkalibrierung ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Es ist noch nicht völlig abgeklärt, durch welche und wieviele Parameter die systematischen Bildfehler am besten beschrieben werden. Weiterhin muß noch mehr Erfahrung gewonnen werden, über welche Bereiche eines Blocks (z.B. einzelne Streifen) die Bildfehler als hinreichend konstant angesehen werden können.

Ein wichtiges mathematisches Problem ist die Bestimmbarkeit der Parameter, die von der Bildüberdeckung, den Paßpunkten und der Anzahl und Verteilung der Meßpunkte abhängt. Um das Gleichungssystem automatisch gegen Singularität zu schützen, werden für die unbekannt Parameter z.B. zusätzliche Fehlergleichungen angesetzt, ihnen also fiktive oder geschätzte Zahlenwerte als Beobachtungen mit entsprechendem Gewicht zugeordnet.

Das Prinzip der Selbstkalibrierung läßt sich sowohl auf die Bündelmethode als auch auf die Methode der unabhängigen Modelle anwenden.

Obwohl die Selbstkalibrierung noch Gegenstand weiterer Forschungen und Entwicklungen ist, gibt es seit mehreren Jahren selbstkalibrierende Rechenprogramme für die Blocktriangulation nach der Bündelmethode, die mit großem Erfolg in der Praxis eingesetzt werden (D. Brown Assoc. (DBA) Melbourne, Florida; Programm BAP, Hannover; Programm der Techn. Hochschule Helsinki).

27. Die bisher vorliegenden Ergebnisse sind zwar nicht völlig einheitlich, aber sie bestätigen eindrucksvoll, daß mit der Selbstkalibrierung in vielen Fällen eine ganz wesentliche Genauigkeitssteigerung erzielt wird.

In den günstigsten Fällen werden σ_0 -Werte von 2 bis 3 μm (Bündelmethode) bzw. 3 - 4 μm (unabhängige Modelle) erreicht. Diese Werte sind insofern besonders bemerkenswert, als sie wirklich die Grenzgenauigkeit bilden. Sie erreichen die aus der Satelliten-Photogrammetrie bekannten Werte. Die Selbstkalibrierung im Block erzielt also praktisch dasselbe Ergebnis wie die Kalibrierung der Einzelbilder durch Sternaufnahmen.

Die Steigerung der Absolutgenauigkeit ausgeglichener Blöcke durch Selbstkalibrierung hängt von verschiedenen Bedingungen ab. Sie ist bei einfach überdeckten Blöcken in der Höhe meistens gering, ebenso wie bei ohnehin gut kontrollierten Blöcken. Mit ungünstigen Paßpunkt-Anordnungen tritt die Genauigkeitssteigerung umso deutlicher hervor und kann den Faktor 2 und darüber erreichen.

Weiterhin konnte festgestellt werden, daß bei selbstkalibrierenden Blockausgleichungen die Ergebnisse wesentlich besser mit den theoretischen Erwartungen übereinstimmen als mit konventionellen Verfahren. Für die Projektplanung ist dieser Befund hoch bedeutsam. Ob mit zusätzlichen Parametern allein eine völlig befriedigende Übereinstimmung zwischen theoretischen und empirischen Genauigkeitsergebnissen erreicht werden kann muß durch die weitere Forschung geklärt werden.

Die Selbstkalibrierung stellt zweifellos eine weitere Vollendung der Verfahren der rechnerischen Aerotriangulation dar. Ihre für die Praxis wichtigen Ergebnisse sind allgemein die zusätzliche Genauigkeitssteigerung und die weitere Absicherung der Resultate, vor allem in Fällen schwacher Paßpunktbesetzung.

28. Zusammenfassend und rückblickend kann man feststellen, daß mit der rechnerischen Aerotriangulation außerordentlich genaue, leistungsfähige, allgemein anwendbare, wirtschaftliche Methoden der Punktbestimmung zur Verfügung stehen. Sie sind praxisgerecht und finden in großem Umfang Anwendung. Die Zielvorstellungen der klassischen Aerotriangulation sind weitgehend erfüllt und in vieler Hinsicht übertroffen worden.

Die Forschung und Entwicklung wird sich neben verschiedenen Einzelheiten der Verfahren mit weiteren Genauigkeitsuntersuchungen und Zuverlässigkeitsanalysen beschäftigen. Der Schwerpunkt der zukünftigen Bemühungen wird die automatische Datenbereinigung und -kontrolle sowie die praktischen und instrumentellen Probleme der Punktauswahl, -übertragung und -messung betreffen. Weitere Entwicklungen stehen durch die Verbindung photogrammetrischer und geodätischer Verfahren der Punktbestimmung an.

Dank der geschlossenen und genau überschaubaren Struktur des Gesamtprozesses der Aerotriangulation ist seine fast vollständige Automation im Prinzip möglich. Die großen Fortschritte der Aerotriangulation im letzten Jahrzehnt beruhen auf der weitgehenden Automation der Datenverarbeitung. Der Ansatzpunkt, sich um die Automation der Datengewinnung zu bemühen, ist damit gegeben, obwohl man ähnlich spektakuläre Fortschritte nicht mehr ohne weiteres erwarten kann.

Bild 1

Veranschaulichung des geometrischen Modells der räumlichen Aerotriangulation

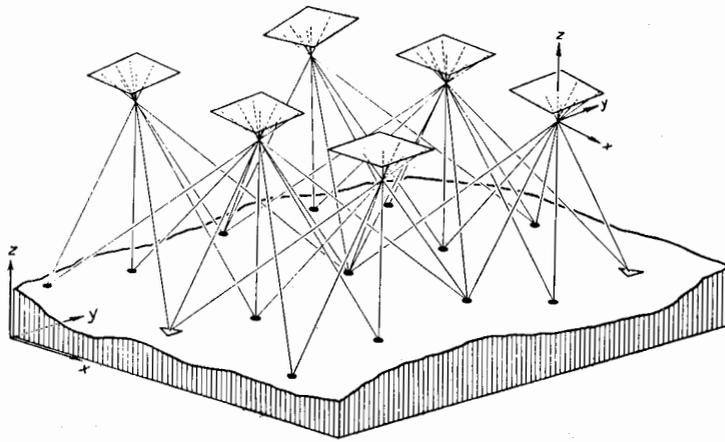
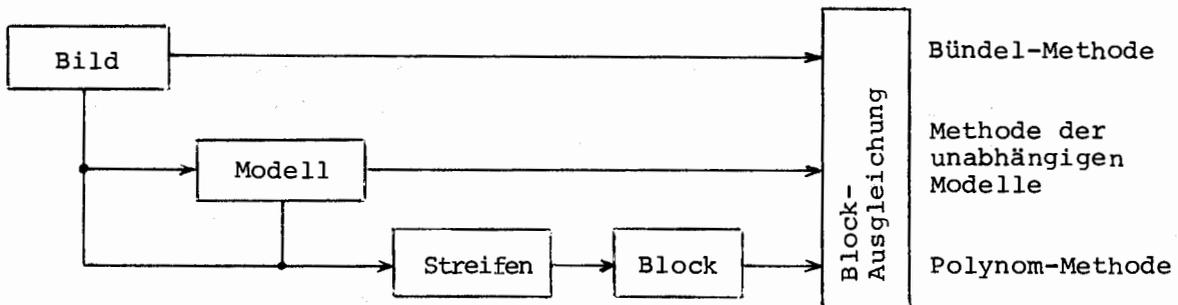


Bild 2

Übersichtsschema der Rechenmethoden der Blockausgleichung



Formelansätze für verschiedene Rechenverfahren der Blockausgleichung

Tabelle 1

1. Polynom Methode

$$(v_x + \Delta x)_{ij} = a_{0j} + a_{1j}x_{ij} - b_{1j}y_{ij} + a_{2j}x_{ij}^2 - 2b_{2j}x_{ij}y_{ij} + \dots$$

$$(v_y + \Delta y)_{ij} = b_{0j} + b_{1j}x_{ij} + a_{1j}y_{ij} + b_{2j}x_{ij}^2 + 2a_{2j}x_{ij}y_{ij} + \dots$$

$$(v_z + \Delta z)_{ij} = c_{0j} + c_{1j}x_{ij} + c_{2j}y_{ij} + c_{3j}x_{ij}^2 + c_{4j}x_{ij}y_{ij} + \dots$$

Fehlergleichungen für die Korrekturen $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)_{ij}$ der Streifenkoordinaten $(x, y, z)_{ij}$ eines Punktes i im Streifen j .

Unbekannte sind die Parameter $(a_0, a_1, \dots, b_0, b_1, \dots, c_0, c_1, \dots)_j$.

2. Methode der unabhängigen Modelle

$$v_{x_{ij}} + X_i = a_{1j}x_{ij} + a_{2j}y_{ij} + a_{3j}z_{ij} + X_{0j}$$

$$v_{y_{ij}} + Y_i = b_{1j}x_{ij} + b_{2j}y_{ij} + b_{3j}z_{ij} + Y_{0j}$$

$$v_{z_{ij}} + Z_i = c_{1j}x_{ij} + c_{2j}y_{ij} + c_{3j}z_{ij} + Z_{0j}$$

Fehlergleichungen für die Modellkoordinaten $(x, y, z)_{ij}$ eines Punktes i im Modell j .

Unbekannte sind die Geländekoordinaten $(X, Y, Z)_i$ der Geländepunkte i und die Transformationsparameter $(a_1, \dots, c_3, X_0, Y_0, Z_0)_j$ der Modelle j (a_1, \dots, c_3 orthogonal).

3. Bündelmethode

$$(v_x + \Delta x)_{ij} = c_j \frac{a_{1j}(X_i - X_{0j}) + b_{1j}(Y_i - Y_{0j}) + c_{1j}(Z_i - Z_{0j})}{a_{3j}(X_i - X_{0j}) + b_{3j}(Y_i - Y_{0j}) + c_{3j}(Z_i - Z_{0j})}$$

$$(v_y + \Delta y)_{ij} = c_j \frac{a_{2j}(X_i - X_{0j}) + b_{2j}(Y_i - Y_{0j}) + c_{2j}(Z_i - Z_{0j})}{a_{3j}(X_i - X_{0j}) + b_{3j}(Y_i - Y_{0j}) + c_{3j}(Z_i - Z_{0j})}$$

Fehlergleichungen für die Bildkoordinaten $(x, y)_{ij}$ des Punktes i im Bild j .

Unbekannte sind die Geländekoordinaten $(X, Y, Z)_i$ der Geländepunkte i und die Transformationsparameter $(a_1, \dots, c_3, X_0, Y_0, Z_0)_j$ der Bilder j (a_1, \dots, c_3 orthogonal).

4. Bündelmethode mit Selbstkalibrierung

$$(v_x + \Delta x)_{ij} + r_1 k x_{ij} + r_2 k y_{ij} + r_3 k x_{ij}^2 + r_4 k x_{ij} y_{ij} + \dots \quad \text{rechte Seiten wie bei 3.}$$

$$(v_y + \Delta y)_{ij} + s_1 k x_{ij} + s_2 k y_{ij} + s_3 k x_{ij}^2 + s_4 k x_{ij} y_{ij} + \dots$$

Fehlergleichungen wie bei 3.

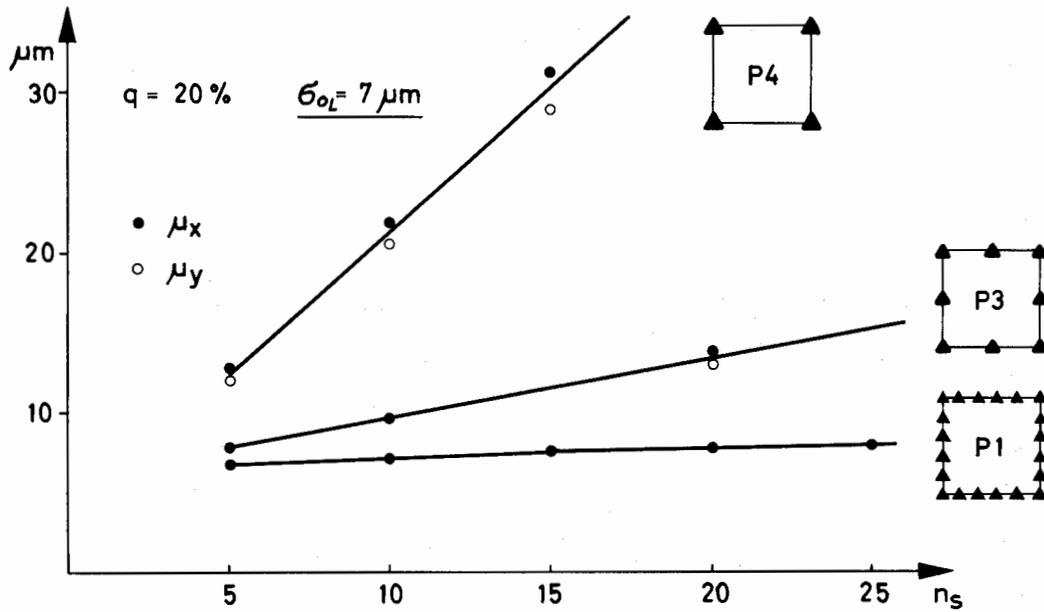
Zusätzliche unbekannte Parameter $(r_1, r_2, \dots, s_1, s_2, \dots)_k$ gemeinsam für die Bildgruppen k .

Beispiele für Rechenzeiten an verschiedenen Rechenanlagen für Blocktriangulation mit dem Programm PAT-M-43 (Methode der unabhängigen Modelle); jeweils 3 Lage-Höhen-Iterationen desselben Blocks; 72 Modelle, 1341 Punkte.

Tabelle 2

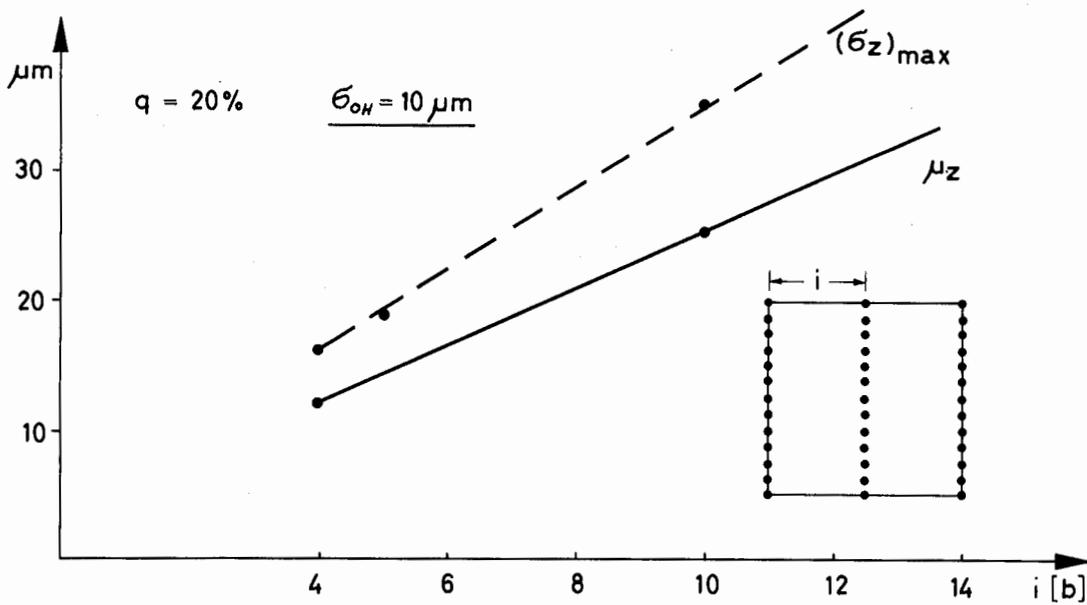
Anlage	CPU-Zeit/Modell	Anlage	CPU-Zeit/Modell
CDC 6600	0,85 sec	UNIVAC 1106	2,8 sec
6400	3,2	1108	1,4
IBM 360/50	20	IBM 370/145	6,2
360/65	5,1	370/155	3,8
360/75	3,7	370/158	2,2
360/85	0,94	370/165	1,1

Bild 3



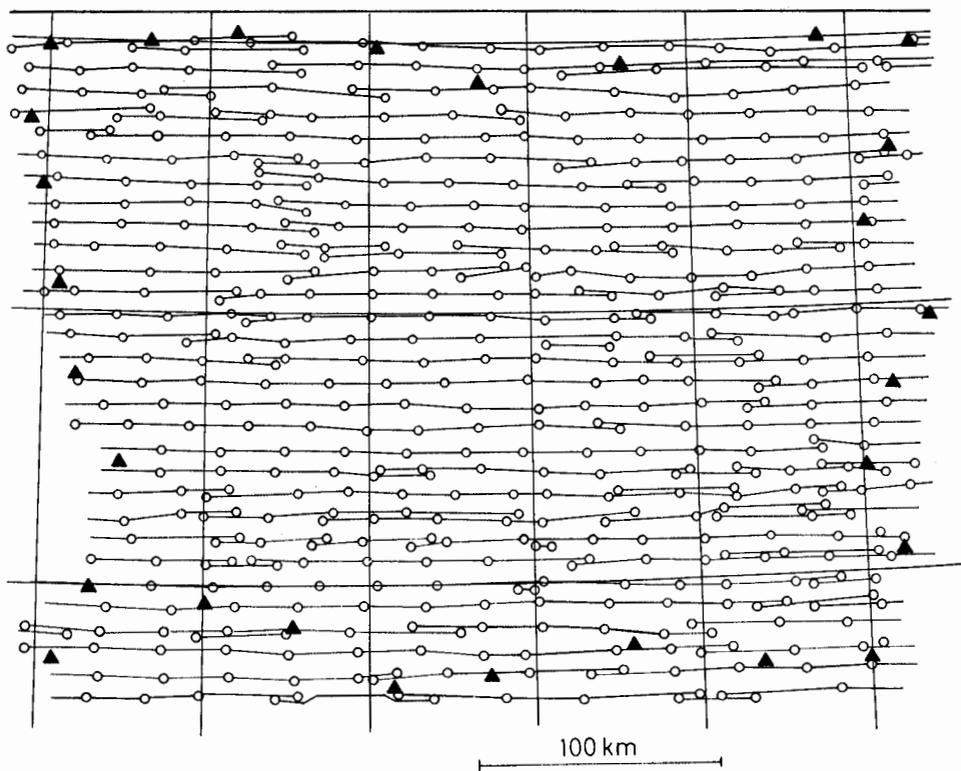
Theoretische mittlere Genauigkeit ($\mu_x \approx \mu_y$) der Lagekoordinaten quadratischer Blöcke nach Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen, in Abhängigkeit von der Blockgröße (n_s = Anzahl der Streifen), nach H. Ebner.

Bild 4



Theoretische Höhengenaugigkeit ($\mu_z, \sigma_{z\text{max}}$) nach Blockausgleich mit unabhängigen Modellen in Abhängigkeit vom Abstand i der Paßpunktketten, nach H. Ebner

Bild 5 Beispiel eines Großblocks

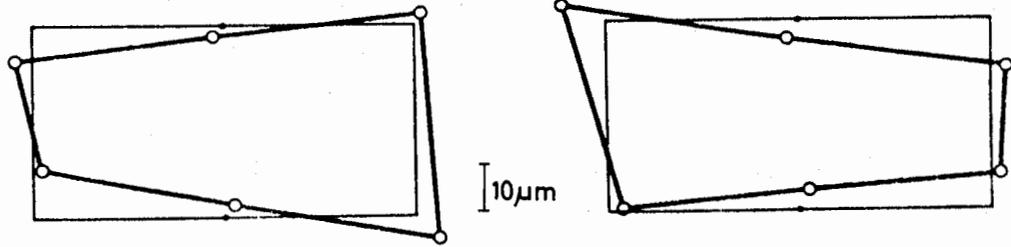


Block "COED" (Canada), 270 km x 360 km, 100 000 km²,
 Bildmaßstab 1:60 000, 2193 Modelle, 25580 gemessene Modellpunkte.
 Genauigkeit: $\mu_x = 10.4 \text{ m}$, $\mu_y = 11.2 \text{ m}$, aus 168 Vergleichspunkten

Bild 6

Beispiele systematischer Modelldeformationen
OEEPE Versuch "Oberschwaben" (nach M.Schilcher)

Lage

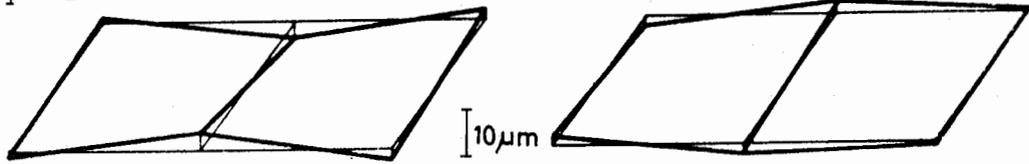


Weitwinkel $q = 20 \%$
(Mittel aus 15 Streifen)

Überweitwinkel $q = 20 \%$
(Mittel aus 15 Streifen)

Höhen - Weitwinkel

$q = 20 \%$



7 Streifen Nord-Süd

8 Streifen Süd-Nord

$q = 60 \%$

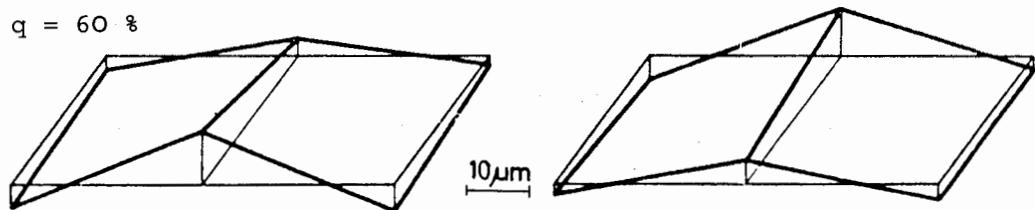


Tabelle 3 Beispiele kontrollierter Blockausgleichungen

1. Unabhängige Modelle, Lage, $q = 20 \%$

Projekt	Bildmaßstab 1:m _B	Meß- gerät	Anzahl der			Genauigkeit				Bemer- kungen
			Mo- delle	Paß- Punkte	Vergl. Pkte.	σ_0	$\mu_{x,y} \mu_{x,y}/\sigma_0$			
			n _M	n _{pp}	n _{check}	cm	μ m	cm	cm	
Hermuthausen	1: 6 000	C8	32	42 Rand	48	4.4	= 7.3	8.0	1.8	Kataster
Föhr	1: 7 500	A7	170	32 Rand	14	5.7	= 7.6	8.0	1.4	"
Heumaden	1: 10 000	C8	33	13 Rand	6	8.1	= 8.1	12.0	1.5	"
Neckarsulm	1: 3 600	PSK	9	30	424	1.8	= 5.0	4.1	2.3	"
Altenfelden	1: 7 300	StK1	105	89 Rand	37	3.7	= 5.1	4.2	1.1	
Böhmenkirch	1: 1 500	PSK	5	11	117	1.3	= 8.7	1.3	1.0	Versuch
Venezuela (ÜWW)	1:125 000		84	8 Rand	9	3.4	= 27.0	6.4	1.9	Top.Kart.
Oberschwaben I	1: 28 000	PSK	200	40 Rand	~ 500	19.4	= 6.9	33.8	1.7	Versuch
						13.0	= 4.6	23.0	1.8	Selbstkal.
Oberschwaben II	1: 28 000	PSK	175	38 Rand	~ 450	18.1	= 6.5	33.2	1.8	Versuch
Appenweier I	1: 7 800	PSK	112	25 Rand	79	3.8	= 4.9	6.1	1.6	"
(SN)			112	27	77	2.9	= 3.7	4.4	1.5	Selbstkal.

Tabelle 4 Beispiele kontrollierter Blockausgleichungen

2. Unabhängige Modelle, Höhen, $q = 20 \%$

Projekt	Bild- maßstab 1:m _B	Meß- Ge- rät	Anzahl der			Genauigkeit				Bemer- kungen
			Mod.	Höhen- paßp.	Vergl. Pkte.	σ_{0z}	μ_z			
			n _M	n _{pp}	n _{check}	cm	μ m	%oh	cm	
Hohenzollern	1: 8 000	PSK	50	26, i=5b	229	14.5	= 18.1	= 0.12	21.2	nat.Punkte
Altenfelden	1: 7 300	StK1	105	88, Rand	37	6.9	= 9.5	= 0.06	7.2	sign. "
Wien	1:26 000	A7	55	16, Rand	67	40.0	= 15.5	= 0.10	110.0	nat. "
Oberschwaben (Fr.)	1:28 000	PSK	200	31, i=12,5b	~ 500	23.4	= 8.4	= 0.05	53.1	sign. "
Oberschwaben (Fr.)	1:28 000	PSK	200	53, i=6b	500	22.4	= 8.0	= 0.05	42.0	Selbstkal.
Appenweier	1: 7 800	PSK	112	138, i=4b	60	23.4	= 8.4	= 0.05	44.6	sign.Punkte
Southern Ontario I	1:33 000		380	i _{pp} = 76 b,	440				2.45 m	nat.Punkte
(mit APR Längs- und II	1:33 000		380	i _{APR} = 76 b,	440				1.66 m	" "
Quer- profilen) III	1:33 000		380	i _{pp} = 76 b,	440				1.46 m	" "
				i _{APR} = 38 b						
Oberschwaben (mit I	1:28 000	PSK	200	i = 25 b ~ 500					80.0 cm	sign.Punkte
Status- II	(WW)	PSK	200	i = 12 b ~ 500					63.0 cm	" "
kop) III	1:28 000	StK1	200	i = 25 b ~ 500					70.0 cm	" "
IV	(ÜWW)	StK1	200	i = 12 b ~ 500					59.0 cm	" "

Tabelle 5 Beispiele kontrollierter Blockausgleichungen

3. Bündel-Methode

Projekt	Bildmaßstab $1:m_B$	Querüberdeckung q	Bildanzahl n_B	Anzahl der				Genauigkeit			Bemerkungen
				Paßpunkte Lage /Höhe	Vergl.Pkte Lage/Höhe		σ_0 μm	$\mu_{x,y}$ cm	μ_z cm		
Kansas	1:70 000	60 %	180	50				7.0	64.0		
Jämijärvi	1: 4 000	60 %	48	8	16	112	104	5.4	2.6	3.3	
		20 %	28	8	16	110	102	5.8	3.0	5.8	
		60 %	48	8	16	112	104	5.1	1.9	3.1	selbstkal.
Oberschwaben	1:28 000	20 %	200	40 Rand	117	469	330	5.7	41.0	51.0	
		20 %	200	40 Rand	117	469	330	3.4	19.0	33.0	selbstkal.
Steinbergen	1: 8 000	60 %	100	14	26		58	5.9		14.0	
		20 %	50	14	26		54	5.2		21.0	
		60 %	50	14	26		55	5.3		9.0	selbstkal.
		20 %	50	14	26		55	5.1		20.0	selbstkal.

Zusammenfassung

Numerische Verfahren dringen in allen Bereichen der Photogrammetrie vor. Der Vortrag gibt eine Übersicht über die photogrammetrische Punktbestimmung durch Aerotriangulation.

Die Entwicklung ist gekennzeichnet durch Vereinfachung der Messung (Bildkoordinaten, unabhängige Modelle) und die Betonung der Aerotriangulation als umfassenden Rechenprozeß.

Als Folge ist die Bedeutung der Verknüpfungsfunktionen der Meßpunkte und der Punktübertragung gewachsen, sind die sog. Geräte 1. Ordnung und die Methode des Aeropolygonen weitgehend verschwunden und ist die Aerotriangulation fast völlig durch elektronisches Rechnen geprägt und von Rechenprogrammen abhängig geworden.

In der Praxis werden eine große Anzahl von Rechenprogrammen von sehr unterschiedlicher Art und Qualität angewendet. Ihre Eigenschaften und Leistungen sind nur grob vergleichend abgeklärt. Es bestehen verschiedene Auffassungen über die Anforderungen an Methoden, Rechenprogramme und Rechenanlagen.

Der erreichte Stand der Aerotriangulation ist durch verbreitete Anwendung, erhebliche Genauigkeitssteigerung und effiziente Paßpunktanordnung gekennzeichnet.

Für kleinmaßstäbige Kartierungen sind Großblöcke mit wenigen Lagepaßpunkten und APR- oder Statoskop-Daten für die Höhen besonders wirtschaftlich. Im großmaßstäbigen Bereich hat sich die Aerotriangulation als Präzisionsverfahren bewährt, mit entsprechenden Anwendungen für Katastervermessung, Ingenieurphotogrammetrie und Netzverdichtung. Bündel- und Modellverfahren bestehen nebeneinander.

Gegenwärtig konzentriert sich die Entwicklung auf das Problem der systematischen Bildfehler, ihre Typen und Beträge, ihre Auswirkungen und ihre Kompensation durch sog. selbstkalibrierende Verfahren der Blockausgleichung mit zusätzlichen Parametern. Damit ist noch einmal eine erhebliche Genauigkeitssteigerung zu erwarten.

Im Ergebnis stehen für die photogrammetrischen Punktbestimmung außerordentlich genaue, leistungsfähige, allgemein anwendbare und wirtschaftliche Methoden zur Verfügung.

Die klassische Aufgabenstellung der Aerotriangulation kann in Kürze als gelöst gelten, auch wenn noch Genauigkeitsuntersuchungen und -vergleiche sowie Programmentwicklungen durchzuführen sind. Die zukünftige Entwicklung wird sich hauptsächlich mit der weiteren Automation des Gesamtprozesses zu beschäftigen haben.

Abstract

Numerical techniques are on the advance everywhere in photogrammetry. This lecture reviews the technique of photogrammetric point measurement by aerotriangulation.

The general trend is towards simplified measurement (image coordinates, independent models) and a stress on aerotriangulation as a comprehensive numerical process.

As a result, the tie-in functions of test points and of point transfer have become more important, the so-called first-order instruments and the method of aerial traversing have largely disappeared and aerotriangulation is now dominated almost exclusively by electronic computation and dependent on computer software.

In practice, a great variety of computer programs of greatly varying characteristics and quality are being used. Their characteristics and efficiency have up to now been studied only by very rough comparison. There is no general consensus on the requirements that should be made of techniques, software and hardware.

The present status of aerotriangulation is marked by extensive use, considerably increased accuracy and a very efficient distribution of control.

For small-scale mapping, large blocks with a few horizontal control points and APR or statorscope data for vertical control are particularly economical. In the field of large scale mapping, aerotriangulation has proved very valuable as a highly precise technique, suitable applications here being cadastral surveys, civil-engineering photogrammetry and control extension. Bundle and model techniques here exist side by side.

Development presently concentrates on the problem of systematic image errors, their types and magnitude, their effect and compensation by so-called self-calibrating techniques of block adjustment with additional parameters. A considerable additional increase in accuracy may be expected as a result of these endeavors.

Summarizing, it may be said that extremely accurate, efficient, generally applicable and economical techniques are available photogrammetric point measurement.

The classical problem of aerotriangulation will soon be completely solved, even if further studies and comparisons of accuracy will have to be made and software developed. Future developments will focus on further automation of the entire process.

Résumé

Les techniques numériques pénètrent dans tous les secteurs de la photogrammétrie. L'exposé procure un aperçu de la détermination photogrammétrique des points par aérotriangulation.

La tendance générale se caractérise par une simplification des mesures (coordonnées des points-image, modèles indépendants) et par l'accent donné à l'aérotriangulation comme processus numérique global.

Plusieurs conséquences en résultent: - les fonctions de rattachement des points de mesure et le report des points prennent une plus grande importance; - les appareils dits de premier ordre et la méthode de l'aérepolygonation se trouvent en voie de disparition; - l'aérocheminement est presque complètement dominé par le calcul électronique et dépend des programmes de calcul.

Dans la pratique, on emploie de nombreux programmes de calcul, dont la nature et la qualité diffèrent fortement. Jusqu'à présent, les caractéristiques et les

performances de ces programmes n'ont été examinées que dans le cadre d'une comparaison assez rudimentaire. Les avis sont partagés en ce qui concerne les exigences à fixer pour les méthodes, les programmes de calcul (software) et les ensembles calculateurs (hardware).

A son stade actuel, l'aérotriangulation se distingue par un usage très répandu, une exactitude considérablement accrue et une distribution efficiente des points de contrôle.

Pour les restitutions cartographiques à petite échelle, les ensembles de bandes étendus avec quelques points d'appui planimétriques et les données fournies par un statoscope ou un altimètradar, s'avèrent particulièrement économiques. Dans le domaine des restitutions à grande échelle, l'aérotriangulation a fait ses preuves comme méthode extrêmement précise, applicable pour les levés cadastraux, la photogrammétrie de génie civil et l'augmentation de la densité des points d'appui dans les canevas. Les techniques de triangulation sur blocs de faisceaux et sur blocs de modèles s'offrent ici à l'utilisateur.

Le développement actuel se concentre sur le problème des aberrations systématiques, ainsi que sur l'étude de leurs types, de leur ampleur, de leurs répercussions et de leur élimination par les techniques dites d'autocalibrage de la compensation sur bloc de bandes avec paramètres additionnels. Une amélioration sensible de l'exactitude en découlera sûrement.

En définitive, on dispose de méthodes très précises, efficaces, économiques et généralement praticables pour la détermination photogrammétrique des points.

Le problème classique de l'aérotriangulation pourra être considéré sous peu comme résolu, même s'il reste encore à effectuer certaines analyses ou comparaisons de qualité et à élaborer des programmes. Les développements futurs porteront principalement sur une automatisation plus poussée des processus.

Resumen:

Los métodos numéricos se imponen en todos los sectores de la fotogrametría. La conferencia da una vista de conjunto sobre la determinación fotogramétrica de puntos por triangulación aérea.

El desarrollo está caracterizado por simplificación de la medición (coordenadas de la imagen, modelos independientes) y por la acentuación de la triangulación aérea como proceso amplio de cálculo.

Como consecuencia, ha aumentado la importancia de las funciones de enlace de los puntos de medida y del transporte de los puntos, han desaparecido en gran medida los llamados instrumentos de primer orden y el método de la poligonación aérea y la triangulación aérea se ha caracterizado casi exclusivamente por el cálculo electrónico, haciéndose dependiente de los programas correspondientes.

En la práctica se emplea un gran número de programas de cálculo de tipo y calidad muy distintos. Sus propiedades y su rendimiento sólo se han comparado de forma muy vaga. Existen diferentes opiniones respecto a las exigencias a formular a los métodos, programas y computadoras.

El estado alcanzado por la triangulación aérea queda caracterizado por su amplia utilización, un aumento considerable de exactitud y una eficiente disposición de los puntos de apoyo.

En levantamientos a pequeña escala son particularmente económicos bloques grandes con pocos puntos planimétricos y datos APR o de estatóscopo para las alturas. En el sector de las escalas grandes, se ha acreditado la triangulación aérea como método muy preciso con aplicaciones en el catastro, la fotogrametría de ingeniería y aumento del control. Los métodos de haces y de modelos se emplean indistintamente.

Actualmente, el desarrollo se concentra en el problema de los errores sistemáticos de la imagen, sus tipos y magnitudes, sus efectos y su compensación por los llamados métodos autocalibrantes de la compensación de bloques con parámetros adicionales. De ello se espera otro aumento considerable de la exactitud.

En total existen para la determinación fotogramétrica de puntos métodos económicos muy exactos, eficientes y de aplicación universal.

Muy pronto podrá considerarse como resuelta la tarea clásica de la triangulación aérea, aun cuando deban efectuarse todavía investigaciones y comparaciones de la exactitud, así como el desarrollo de nuevos programas. El desarrollo futuro tendrá por objeto primordialmente la mayor automatización del proceso total.