

HAALA, PLIETKER und SESTER in dieser ZPF-Ausgabe beschrieben (s. auch HAALA, 1994).

Eine weitere interessante Anwendung des Matching zweier DGMs liegt in der Verknüpfung von DGMs unterschiedlicher Herkunft, wie z. B. Laser-DGM und dem DGM, welches automatisch aus Luftbildern mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung generiert worden ist. In dicht bebauten oder bewaldeten Gebieten neigen die Verfahren der digitalen Bildverarbeitung dazu, das DGM auf die Dächer der Gebäude oder im Wald auf eine nicht klar definierte Bezugsfläche zu legen. Aus den Widersprüchen in den beiden DGMs lassen sich Hinweise darüber gewinnen, wo die DGMs jeweils schwach sind und deshalb nähere Untersuchungen durchgeführt werden sollten.

#### Literatur

- ACKERMANN, F. (1992): Laserabtastung zur Küsten- und Wattvermessung. Zeitschrift für Vermessungswesen 117, S. 24-35.
- ACKERMANN, F., J. KILIAN, M. ENGLISH (1994): Die Laser-Profil-Befliegung „Gammertingen 1992“. Zeitschrift für Vermessungswesen 119, S. 264-277.
- FRITSCH, D., KILIAN, J. (1994): Filtering and Calibration of Laser Scanner Measurements, Paper presented at ISPRS Commission III Symposium München, Deutschland, September 1994.

HAALA, N. (1994): Detection of Buildings by Fusion of Range and Image Data, Paper presented at ISPRS Commission III Symposium München, Deutschland, September 1994.

KILIAN, J. (1994): Calibration Methods for Airborne Laser Systems, Paper presented at ISPRS Commission I Symposium, Como, Italien, September 1994.

LINDENBERGER, J. (1993): Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 400.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. JOHANNES KILIAN, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, D-70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21. 33 85.

Dipl.-Ing. (FH) MARKUS ENGLISH, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstr. 11, D-70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21. 33 85.

JOHANNES KILIAN, geboren am 27. 11. 1965, 1985-1990 Studium des Vermessungswesens an der Universität Stuttgart, seit 1991 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, insbesondere im Sonderforschungsbereich 228 „Hochgenau Navigation“, Teilprojekt C1 „Digitale Geländemodelle und Mikrowellen“.

MARKUS ENGLISH, geboren am 18. 8. 1959, 1981-1985 Studium des Vermessungswesens an der Fachhochschule Stuttgart, seit 1986 Technischer Angestellter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.

## Von der Blockausgleichung zur automatischen Acrotriangulation

DIETER FRITSCH, VASILIOS TSINGAS und WERNER SCHNEIDER, Stuttgart

### Zusammenfassung

Die Entwicklungen innerhalb der Blockausgleichung und Acrotriangulation wurden wesentlich von F. ACKERMANN initiiert und durch Softwarelösungen wie z. B. PAT-M und PAT-B in die photogrammetrische Praxis eingeführt. Um die Acrotriangulation vollkommen zu automatisieren, sind ausgehend von digitalen Bildern homologe Verknüpfungspunkte festzulegen und deren Bildkoordinaten automatisch zu ermitteln. Des weiteren können Paßpunkte durch Verfahren der digitalen Bildzuordnung (Template Matching) lokalisiert und deren Bildkoordinaten erfaßt werden. Auch hier konnte F. ACKERMANN ein Forschungsprojekt anregen, welches sich mit diesen so wichtigen Abschnitten innerhalb des Datenflusses in der Acrotriangulation auseinandersetzt. Der vorliegende Beitrag wendet sich daher der automatisierten Identifizierung, Übertragung und Messung von Verknüpfungspunkten zu. Dabei werden insbesondere die Stuttgarter Arbeiten auf diesem Gebiet vorgestellt. Anhand des OEEPE-Tests „Digital Methods in Aerial Triangulation“ und der Punktübertragung von MOMS02/D2-Dreizilenaufnahmen wird das entwickelte Verfahren demonstriert.

## From Block Adjustment to Automatic Aerial Triangulation

The developments within photogrammetric block adjustments and aerial triangulations have been initiated substantially by F. ACKERMANN. Resulting software packages for instance PAT-M and PAT-B helped to introduce photogrammetric research and developments in praxis. A further step to be reached is the automatic aerial triangulation. Using digital images tie points have to be located and automatically measured. Moreover, ground control points can be located by template matching. Also in this field F. ACKERMANN initiated a research project, which aimed at a fully automated data flow in aerial triangulation. Therefore, this contribution concentrates on automated identification, transfer and measurement of tie points. In particular the research work carried out by the Institute of Photogrammetry, Stuttgart University is presented. The methods are applied onto digital imagery resulting from the OEEPE test "Digital Methods in Aerial Triangulation" and MOMS02/D2 image data.

### 1. Einleitung

Die Aerotriangulation ist ein komplexer photogrammetrischer Arbeitsprozeß. Im engeren Sinne umfaßt der Begriff der Aerotriangulation die Arbeiten, die nach dem Bildflug und der Entwicklung des Bildmaterials durchzuführen sind, nämlich die Messung der Bildkoordinaten von Paß- und Verknüpfungspunkten sowie die Blockausgleichung. Die Arbeiten in den sechziger und siebziger Jahren konzentrierten sich im wesentlichen auf die Bereitstellung von leistungsfähigen mathematischen Modellen zur Ausgleichung von Modellkoordinaten, abgeleitet nach dem Verfahren der unabhängigen Modelle und von Bildkoordinaten zur Realisierung des Bündelansatzes sowie ihre programmtechnische Umsetzung. Die Entwicklungen innerhalb der *analytischen* Photogrammetrie führten somit die Aerotriangulation auf ein hohes Leistungsniveau. Obwohl manche Teilaufgaben der Berechnung immer noch manuell durchgeführt werden müssen (z. B. Datenbereinigung, Fehlerbehandlung, Qualitätskontrolle), ist die Blockausgleichung als ein weitgehender automatischer Prozeß zu betrachten. Die eigentliche Messung von Modell- bzw. Bildkoordinaten wurde jedoch von diesen Entwicklungen wenig beeinflusst. Somit blieben die unter dem Sammelbegriff der *Punktübertragung* zusammengefaßten Operationen wie Auswahl, Identifizierung, Übertragung und Messung von Verknüpfungs- und Paßpunkten bis heute der manuellen Bearbeitung überlassen. Dadurch ist die Aerotriangulation ein nach wie vor arbeitsintensives, langsames und kostenintensives Verfahren innerhalb der Photogrammetrie. Erst die Entwicklungen der digitalen Bildzuordnungsverfahren lieferten das notwendige Rüstzeug, um auch

den Abschnitt der Punktübertragung zu automatisieren. Damit scheint nun endgültig der Weg geebnet, die Aerotriangulation in ihrem gesamten Arbeitsumfeld zu automatisieren.

### 2. Automatisierung der Aerotriangulation

Während in der Vergangenheit in erster Linie die Parameterschätzung von Punktkoordinaten sowie von Ort und Lage der Projektionszentren im Vordergrund wissenschaftlichen Interesses stand, konnte sich erst mit der Weiterentwicklung von Methoden der digitalen Bildzuordnung der Automatisierung der Punktübertragung von Paß- und Verknüpfungspunkten zugewendet werden. Durch die Kombination von Punktübertragung und Blockausgleichung ergibt sich nun eine zweiphasige Auswertestrategie, die im folgenden näher beschrieben wird.

#### 2.1 Meßaufgaben

Bei der Messung unterscheidet man in drei Hauptaufgaben, nämlich die Bildvorbereitung, die Identifikation und Messung der Paßpunkte sowie die Auswahl (Identifikation), die Übertragung und Messung der Verknüpfungspunkte. Während die Messung der Paßpunkte durch die Korrelation mit einem vorgegebenen Muster (Template) erfolgen kann, ist die automatische Identifikation der Paßpunkte nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grunde soll diese im folgenden nicht weiter ausgeführt werden.

Unter Bildvorbereitung verstehen wir die Festlegung und Beschreibung der Blockgeometrie sowie die Suche von geeigneten Stellen zur Auswahl von Verknüpfungspunkten. Die topologische Beschreibung der Blockstruktur erfolgt anhand der Überlappungsbeziehungen

der einzelnen Bilder untereinander. Die Auswahl von geeigneten Stellen zur Punktübertragung betrifft die Abgrenzung der Überlappungsgebiete und die Definition der ursprünglichen homologen Bildausschnitte, innerhalb derer die Verknüpfungspunkte liegen sollen. Bei regelmäßiger Bildüberdeckung liegen die homologen Bildausschnitte jeweils in der Nähe der 9 Standardpositionen zur Punktübertragung.

Nach der Festlegung von geeigneten Stellen beginnt die eigentliche Phase der Punktübertragung, die im wesentlichen drei Schritte umfaßt:

1. Auswahl (bzw. Identifikation) und mögliche künstliche Markierung der Bildpunkte im Referenzbild.
2. Übertragung in die homologen Bilder bzw. Bildausschnitte sowie mögliche künstliche Markierung, und
3. Messung der Bildkoordinaten (oder Modellkoordinaten).

Die Genauigkeit der Bildkoordinaten, die als Beobachtungen in der Blockausgleichung Verwendung finden, wird grundsätzlich vom Schritt 2 festgelegt. Bei der Verwendung von im Gelände signalisierten Verknüpfungspunkten entfällt dieser Schritt; die Acrotriangulation erreicht in diesem Fall ihr höchstes Genauigkeitsniveau.

## 2.2 Strategien

Die Entwicklung der digitalen Photogrammetrie ermöglicht heute die Teil- oder Vollautomatisierung der bisher manuell auszuführenden Operationen. Als Voraussetzung hierzu wird stets angenommen, daß die Bilder digital vorliegen und eine photogrammetrische Arbeitsstation oder eine leistungsfähige graphische Arbeitsstation zur Verfügung steht. Unter diesen beiden generellen Prämissen ist die Punktübertragung automatisierbar. Die bereits realisierten Ansätze zur automatischen Punktübertragung können grundsätzlich unterschieden werden in die interaktive sowie die vollkommen automatisierte Lösung.

Bei der interaktiven Punktübertragung hat man sich an der konventionellen Vorgehensweise der manuellen Verfahren orientiert und diese in Softwarepakete umgesetzt. Hier wählt

der Operator interaktiv die geeigneten Bildpunkte im digitalen Bild aus. Somit erfolgt Schritt 1 durch visuelle Beobachtung am Bildschirm sowie Positionierung des Cursors an dem geeigneten Punkt. Die Punktübertragung 2. innerhalb der zugeordneten homologen Bildausschnitte weiterer digitaler Bilder wird nun automatisch durch Methoden der Bildzuordnung vollzogen, solange hinreichend genaue Näherungswerte vorhanden sind. Der dritte Schritt, die Punktmessung 3., erfolgt somit simultan durch Schritt 1. für den Referenzpunkt (Master) und Schritt 2. für die weiteren Punkte (Slaves) – beide Schritte erscheinen grundsätzlich nicht als voneinander getrennte Operationen. In diesem Fall sprechen wir von einem *teilautomatisierten* Verfahren, da die Punktübertragung automatisch erfolgt, die Auswahl des Referenzpunktes sowie der Näherungswerte seiner homologen Bildpunkte jedoch manuell durchgeführt wird. Eine erste experimentelle Anwendung dieses Verfahrens ist mit F. ACKERMANN/W. SCHNEIDER (1986) gegeben. Der später beschriebene OEEPE-Test *Digital Methods in Aerial Triangulation* aus dem Jahre 1993 hat gezeigt, daß derzeit die meisten Verfahren zur Automatisierung der Punktübertragung und -messung dieser Strategie folgen. Dabei sind die Zuordnungsmethoden natürlich hochentwickelt (z. B. Mehrfach-Zuordnung), sie werden jedoch immer in einer interaktiven Umgebung ausgeführt, so daß es sich somit um teilautomatisierte Verfahren handelt.

Der vollkommen automatisierte Ansatz versucht, mit möglichst geringen Vorinformationen auszukommen und so den Meßprozeß automatisch ablaufen zu lassen. Bei dieser Strategie sind nicht nur die Punktübertragung und die Punktmessung, sondern auch die Auswahl der Verknüpfungspunkte sowie die Bildvorbereitung Teile eines integrierten Prozesses, der grundsätzlich automatisch abläuft. Die Rolle des Operators beschränkt sich dabei auf Überwachungsfunktionen und die visuelle Kontrolle der Ergebnisse. Ein interaktives Eingreifen ist dabei möglich, jedoch nur selten notwendig – lediglich kritische Fälle verlangen eine sorgfältigere Auswahl der Referenzpunkte, als sie durch merkmalsbasierte Verfahren vorgeschla-

gen werden. Auch hier finden digitale Bildzuordnungsverfahren ihren Einsatz für die eigentliche Punktübertragung, im Gegensatz zum teilautomatisierten Ansatz sind jedoch wegen der groben Näherungswerte robuste merkmalsgestützte Methoden hinzuzuziehen.

Eine Erweiterung des Verfahrens der Punktübertragung und -messung besteht darin, die Messung der Bildkoordinaten und Berechnung der Objektkoordinaten als ein Softwaresystem zu betrachten. Die eigentliche Separation ist ja vor dem Hintergrund des Einsatzes von analogen und analytischen Geräten zur stereoskopischen Übertragung und Messung entstanden. Durch den Einsatz einer digitalen photogrammetrischen Arbeitsstation ist diese Trennung nun nicht mehr notwendig.

Mittlerweile sind einige Ansätze verfügbar, die das geometrische und radiometrische Modell integriert haben (H. EBNER et al., 1987, B. WROBEL, 1987, A. GRÜN/E. BALTSAVIAS, 1988, U. A. HELAVA, 1988, P. AGURIS/T. SCHENK, 1992). Damit werden nicht nur die Punktübertragung und -messung, sondern auch gleichzeitig die Bestimmung der Geländekoordinaten der Verknüpfungspunkte durchgeführt sowie die Orientierungsparameter der Bilder bestimmt. Der Einsatz von allein solchen Verfahren kann sich in der Praxis jedoch als äußerst problematisch erweisen. Das Problem liegt in den ursprünglich zu groben Näherungswerten, die eigentlich nur für robuste und nicht für präzise Verfahren geeignet sind. Um dennoch solche Verfahren in der automatischen Acrotriangulation einzusetzen, bedarf es der Verwendung robuster Verfahren zur Beschaffung von hinreichend genauen Näherungswerten.

Andererseits erlaubt die getrennte Behandlung der Punktübertragung und -messung sowie Bündelblockausgleichung die Verwendung von in der Praxis bereits seit langer Zeit angewendeten ausgereiften und effizienten Blockausgleichungsprogrammen.

### 3. Der Stuttgarter Ansatz

Am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart wurde ein vollautomatisiertes Verfahren zur Punktübertragung und -messung entwickelt. Unter der Eingangsprämisse des Minimums von äußeren Informationen als An-

fangswerte wurde sich die Kenntnis der Gruppierung der Bilder in Streifen, ihrer Reihenfolge innerhalb der Streifen, der Überlappungsbereich von zwei Bildern sowie der Reihenfolge der Streifen vorgegeben. Aufgrund dieser Voraussetzungen konnte ein Verfahren bereitgestellt werden, welches das eigentliche Problem der Punktübertragung und -messung als auch der Beschaffung der notwendigen Näherungswerte vollautomatisiert löst.

Eine weitere Vorgabe bestand darin, die Zuordnungs- bzw. Meßgenauigkeit des Verfahrens im Subpixelbereich anzusiedeln. Aufgrund vorheriger Untersuchungen war bekannt (vgl. F. ACKERMANN/W. SCHNEIDER, 1986), daß Flächenkorrelationsverfahren und insbesondere der *Kleinste-Quadrate-Ansatz* ideal für die Punktübertragung und -messung geeignet sind. Mit einer Zuordnungsgenauigkeit von 1/10 Pixel ist bei einem mit 15 µm digitalisierten Bild das Genauigkeitsniveau der Präzisionsacrotriangulation ( $\sigma_0 \sim 3 \mu\text{m}$ ) zu erreichen. Dieser hohen Genauigkeitseigenschaft steht der geringe Konvergenzbereich dieser Verfahren gegenüber. Wegen der hochgradigen Nichtlinearität der Grauwertfunktionen müssen daher die Anfangswerte im Bereich von mindestens 2–3 Pixel liegen. Aus diesem Grund wurde sich bei der Konzeption eines Programmsystems für ein robustes Merkmalszuordnungsverfahren entschieden, welches zwar eine niedrigere Zuordnungsgenauigkeit ausweist, aber mit groben Näherungswerten auskommt. Die geringere Zuordnungsgenauigkeit kann, zumindest was die Genauigkeit der Parameter der äußeren Orientierung betrifft, durch eine höhere Redundanz (d. h. eine größere Anzahl von Verknüpfungspunkten) kompensiert werden. Falls darüber hinaus genauere Ergebnisse bei der Bildkoordinatenmessung angestrebt sind, können die Bildkoordinaten der bereits zugeordneten Punkte als Näherungswerte für eine Kleinste-Quadrate-Bildzuordnung dienen.

Das entwickelte Verfahren besteht aus einer elementaren Methode für die automatische Auswahl und Zuordnung von homologen Bildpunkten sowie einer Strategie zur vollautomatisierten Anwendung der Methode auf die vertikale Bildstruktur der aufzubauenden Bildpyramiden und der horizontalen Bildstruktur

des Blocks. Eine analytische Beschreibung der eingesetzten Methoden ist in V. TSINGAS (1992) wiedergegeben.

### 3.1 Mehrfache Merkmalszuordnung

Bei der Entwicklung der Zuordnungsverfahren ist das Problem der variablen Überlappung innerhalb des photogrammetrischen Blockes zu überwinden. Deshalb wurde durch eine allgemeine Formulierung der mehrfachen Merkmalszuordnung erreicht, daß unabhängig von der Überlappung derselbe Algorithmus angewendet werden kann. Das eigentliche Merkmalszuordnungsverfahren wird daher in 4 Schritte unterteilt:

1. Merkmalsextraktion in jedem Bild.
2. Vorläufige paarweise Zuordnung aufgrund der Ähnlichkeit der Merkmale in jedem Bildpaar.
3. Lokalisierung und Elimination der groben Zuordnungsfehler mit Hilfe eines geometrischen Modells, und
4. Bestimmung der mehrfachen Zuordnung aufgrund eines graphentheoretischen Modells.

In unserem Fall sind die zu extrahierenden Merkmale markante Bildpunkte, die mit dem Förstnerschen Interestoperator gesucht werden. Die Extraktion liefert Bildkoordinaten mit Subpixelgenauigkeit ( $\frac{1}{4}$  Pixel) und entspricht den Operationen der Auswahl 1. und Punktmessung 2. bei den konventionellen, manuellen Verfahren (siehe Abschnitt 2.1). Somit bestimmt die Genauigkeit der Punktextraktion auch die Genauigkeit der Bildzuordnung und das  $\sigma_p$  der Blockausgleichung, welches  $\frac{1}{3}$  Pixel erreichen kann. Innerhalb der Listen der extrahierten Bildpunkte von jedem möglichen Bildpaar wird nun im zweiten Schritt nach möglichen Punktpaaren gesucht. Nach diesem Schritt kann ein Bildpunkt von einem Bild einem oder mehreren Bildpunkt(en) eines anderen Bildes zugeordnet sein. Diese paarweisen vorläufigen Bildzuordnungen müssen nun zu einem geometrischen Modell passen, welches den geometrischen Zusammenhang der homologen Bildausschnitte beschreibt. Große Abweichungen von diesem Modell werden als *grobe Zuordnungsfehler* interpretiert und die entsprechenden Punktpaare eliminiert. Als

geometrisches Modell wird eine kombinierte Affintransformation zwischen allen möglichen Bildpaaren vorgegeben, die für diese Aufgabe hinreichend geeignet ist.

Nach der Elimination der groben Fehler sind immer noch kleine Zuordnungsfehler oder Doppeldeutigkeiten in der Liste der paarweisen Zuordnungen enthalten. Im vierten Schritt werden nun die Restfehler eliminiert, die mehrfachen Zuordnungen definiert und die homologen Bildpunkte mit derselben Punktnummer (Geländepunktnummer) für die Blockausgleichung numeriert. Zur Lösung dieses Problems werden Methoden der Graphentheorie und der binären Programmierung eingesetzt. Extrahierte Bildpunkte und verbliebene paarweise Zuordnungen können durch die Knoten bzw. die Kanten eines  $n$ -partiten Graphen dargestellt werden, wobei  $n$  die Anzahl der überlappenden Bilder oder Bildausschnitte ist. Die Abweichung eines Punktpaares vom geometrischen Modell wird als *Bewertung* der entsprechenden Kante verwendet. Eine mehrfache Punktzuordnung bildet dann einen vollständigen Teilgraphen (Clique). Die Aufgabe besteht nun darin, den maximalen vollständigen Teilgraphen mit der minimalen Kantenbewertung in einem  $n$ -partiten Graphen zu finden. Da es sich hierbei um die Auswahl einer Teilmenge von diskreten Objekten (Knoten und Kanten) handelt, ist ein binäres Optimierungsproblem zu lösen. Hierfür können entweder heuristische Suchverfahren oder Verfahren der binären Programmierung eingesetzt werden. Vollständige Teilgraphen bzw. Aufgaben innerhalb der binären Programmierung stellen in aller Regel kombinatorische Probleme dar, ihre numerische Komplexität ist *NP-complete* (Nicht-deterministisch polynomial, vgl. J. McHUGH, 1990). Deshalb schien es notwendig, für den ungeschränkten Einsatz des Zuordnungsverfahrens in der photogrammetrischen Praxis einen speziell hochoptimierten Suchalgorithmus zu entwickeln und zu implementieren, der sich auf dem *Additive Algorithm of BALAS* stützt (K. NEUMANN, 1975).

### 3.2 Anwendungsstrategie

Die vorher angegebene Methode operiert mit homologen Bildausschnitten, die sich hin-

reichend überlappen müssen. Sie definieren in der Bildebene ein Überlappungsgebiet. Somit ist der photogrammetrische Block in Überlappungsgebiete mit variabler Überlappung eingeteilt. Die Dimension der Bildausschnitte muß etwa  $100 \times 100$  Pixel betragen. Der Ausschnitt sollte mindestens so groß sein, daß eine ausreichende Anzahl von Bildpunkten extrahiert werden kann, und so klein, daß das geometrische Modell der Affintransformation eine gute Näherung darstellt. Um die homologen Bildausschnitte mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, wird das Verfahren iterativ auf eine symbolische Bildpyramide angewendet.

Bevor jedoch mit der eigentlichen Anwendung des vollautomatisierten Verfahrens zur Punktübertragung und -messung gestartet werden kann, sind die Stellen für die Punktübertragung auszuwählen und die homologen Bildausschnitte (Überlappungsgebiete) in der obersten Ebene der Bildpyramide zu definieren (vgl. Abb. 1). Dies geschieht automatisch durch Anwendung derselben Methode. In diesem Fall sind aber nicht die homologen Bildpunkte von Bedeutung, sondern die Parameter der kombinierten Affintransformation. Diese Parameter beschreiben genau die Überdeckung zwischen den überlappenden Bildern bzw. Bildausschnitten. Die Bildausschnitte werden im Referenzbild möglichst an den idealen 9 Stellen der Punktübertragung positioniert und auf die nachfolgenden Bilder mittels der Transformationsparameter übertragen.

Nach der Anwendung des Verfahrens auf ein Überlappungsgebiet werden ein oder mehrere Typen von homologen Bildpunkten ausgewählt und auf die nächstniedrige Ebene der Bildpyramide umgesetzt. Dort definieren sie die Mitte der neuen homologen Bildausschnitte, auf die das Verfahren erneut angewendet wird. Es hat sich herausgestellt, daß mit einer Bildpyramide von nur drei Ebenen ausgekommen werden kann. Die Pixelkoordinaten der in der hochaufgelösten (niedrigsten) Ebene zugeordneten Punkte werden nach ihrer Reduktion auf das Bildkoordinatensystem als Beobachtungen in der Bündelblockausgleichung verwendet.

#### 4. Praktische Beispiele

Das hier beschriebene Verfahren zur automatischen Aerotriangulation wurde bereits 1990 mit experimentellen Daten getestet, ein erster Test mit realen digitalen Bildern konnte 1991 durchgeführt werden. Obwohl die Punktübertragung automatisch erfolgte, gab es noch kein integriertes Programm für die Steuerung von Einzelphasen und somit noch keinen automatischen Datenfluß. Das damalige Bildmaterial entstammte dem Testgebiet *Appenweier*, das vor etwa 20 Jahren zu Untersuchungen zur Blockausgleichung im Bildmaßstab 1:7800 befliegen wurde. Hiervon konnten 3 Streifen mit jeweils 7 Bildern ausgewählt und mit einer Pixelgröße von  $15 \mu\text{m}$  digitalisiert werden. Die automatische Auswertung lieferte 2236 Bildpunkte (Verknüpfungspunkte) bei einem  $\sigma_0$  von  $7,9 \mu\text{m}$  ( $= 0,53$  Pixel) sowie der Genauigkeit  $7,5 \text{ cm}$  in  $X$ ,  $10,5 \text{ cm}$  in  $Y$  und  $12,5 \text{ cm}$  in  $Z$  im Objektraum. Pro Bild betrug die Rechenzeit 50 min auf einer DEC VAX 3500 graphischen Arbeitsstation. Diese erstmals vollkommen digital durchgeführte Aerotriangulation zeigte, daß sie automatisierbar ist und bestätigte die Verfahrenskonzeption. Zusätzliche Entwicklungen haben das Verfahren nun auf ein höheres Niveau gebracht, welches in der Lage ist, alle Schritte vollautomatisch durchzuführen. Die Gesamtintegration der einzelnen Module zu einem neuen Programmsystem erlaubt den vollautomatischen Ablauf des Auswerteprozesses. Das Programmsystem verfügt über eine graphische Oberfläche für die Visualisierung der Ergebnisse, die auf dem X11- und OSF/Motif-Standard aufsetzt. In kritischen Fällen kann über die graphische Oberfläche auch interaktiv eingegriffen werden.

##### 4.1 Der OEEPE-Testblock FORSSA

Das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart nahm im Jahr 1993 am OEEPE-Test *Digital Methods in Aerial Triangulation* teil. Der Test bestand in der digitalen Auswertung des Blocks FORSSA aus Finnland. Insgesamt bildeten 28 Luftbilder im Bildmaßstab 1:4000 einen photogrammetrischen Block mit 4 Streifen zu 60% Längs- und 20%–40% Querüberdeckung, die Bilder waren am ZEISS/INTERGRAPH PS1 mit einer

Auflösung von 15  $\mu\text{m}$  digitalisiert worden. Zur Auswertung stand dem Institut eine Silicon Graphics IRIS/Indigo Workstation (R3000/33 MHz-Prozessor) zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in F. ACKERMANN/V. TSINGAS (1994) ausführlich diskutiert.

Bei der Ausführung der automatischen Aerotriangulation konnten interaktive Eingriffe auf ein Minimum reduziert werden, dieses war in nur 6% der Überlappungsgebiete erforderlich. Ferner beschränkte sie sich auf die Eingabe von Näherungswerten der homologen Bildausschnitte. Die kritischen Fälle waren Wald- und Siedlungsgebiete mit schlechter Radiometrie in Verbindung mit der an manchen Stellen zu geringen Querüberdeckung. Als Mittelwert für die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild ergab sich ein Wert von 272,

was zu einer hohen Redundanz führte. 6% der zugeordneten Bildpunkte wurden als kleine grobe Fehler während der Blockausgleichung eliminiert. Diese Quote ist für vollautomatisch ablaufende Verfahren mehr als zufriedenstellend, insbesondere weil die große Redundanz ihre sichere Lokalisierung ermöglicht. Die Gesamtrechenzeit betrug 150 min oder 5,3 min pro Bild bei 6 Überlappungsgebieten pro Standardstelle und insgesamt 7463 Verknüpfungspunkten. Eine Beschränkung der Anzahl der Überlappungsgebiete (1 pro Standardstelle) konnte die Rechenzeit auf 47 min reduzieren (1,7 min pro Bild). Das  $\sigma_0$  der Bündelausgleichung (14 Vollpaßpunkte, ohne Selbstkalibrierung) erreichte 6,2  $\mu\text{m}$  oder 0,4 Pixel. Dieses Ergebnis liegt nahe an der erwarteten theoretischen Genauigkeit der Punktextraktion (0,3

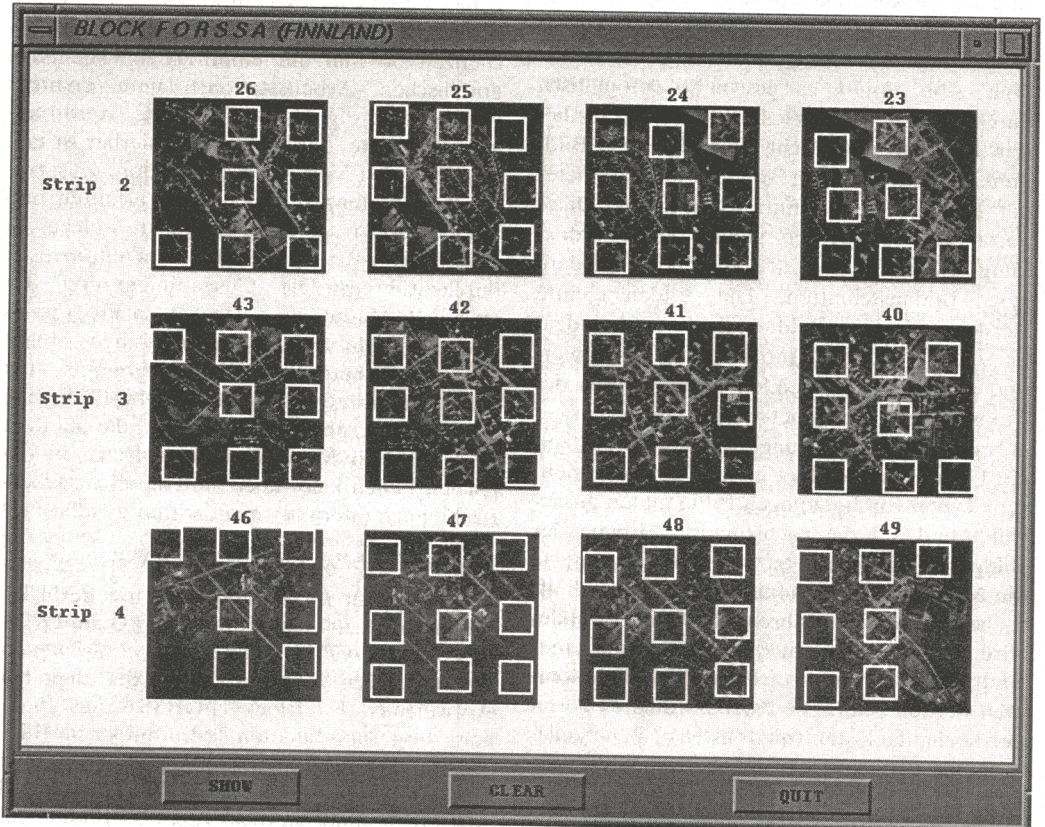


Abb. 1: Bilder des Testblocks FORSSA (die Standardpositionen zur Punktübertragung sind weiß umrandet)

Pixel). Als Genauigkeiten im Objektraum wurden erhalten  $\sigma_X = 3,6$  cm,  $\sigma_Y = 3,9$  cm und  $\sigma_Z = 5,2$  cm. Im Vergleich hierzu seien die Ergebnisse angegeben, die durch konventionelle Aerotriangulation (manuelle Messung der Bildkoordinaten am Monokomparator PK1) ermittelt wurden:  $\sigma_0 = 3,7$   $\mu\text{m}$ ,  $\mu_X = 2,4$  cm,  $\mu_Y = 2,7$  cm und  $\mu_Z = 4,9$  cm. Die theoretische Genauigkeit der Parameter der äußeren Orientierung war wegen der hohen Redundanz deutlich höher (etwa 30%) als bei der konventionellen analytischen Auswertung. Diese Genauigkeitsergebnisse sind als sehr positiv einzuschätzen und qualifizieren die automatische Aerotriangulation als ein hochpräzises Meßverfahren.

#### 4.2 MOMS02/D2-Punktübertragung

Während bei konventionellen Luftbildern mit der automatischen Punktübertragung durch digitale Punktzuordnung eine leistungsfähige Alternative zu den manuellen Verfahren gegeben ist, stellt sie bei digitalen Aufnahmen den einzig zu beschreitenden Lösungsweg dar. Aus diesem Grund ist sie eine der zu lösenden Hauptaufgaben im Deutschen Erdkundungsprogramm MOMS02/D2 (Modularer Opto-Elektronischer Multispektral/Stereo-Scanner), bei der eine von der DARA geförderte Dreizeilen-Kamera, die von der DASA, München, gebaut wurde, erstmals zum Einsatz gekommen ist. Der MOMS-Sensor in 2. Generation erlaubt die gleichzeitige Aufzeichnung von Stereo- und Multispektralaufnahmen. Er wurde vom 26. 4. bis 6. 5. 1993 innerhalb der 2. Deutschen Spacelab-Mission (D2) auf dem

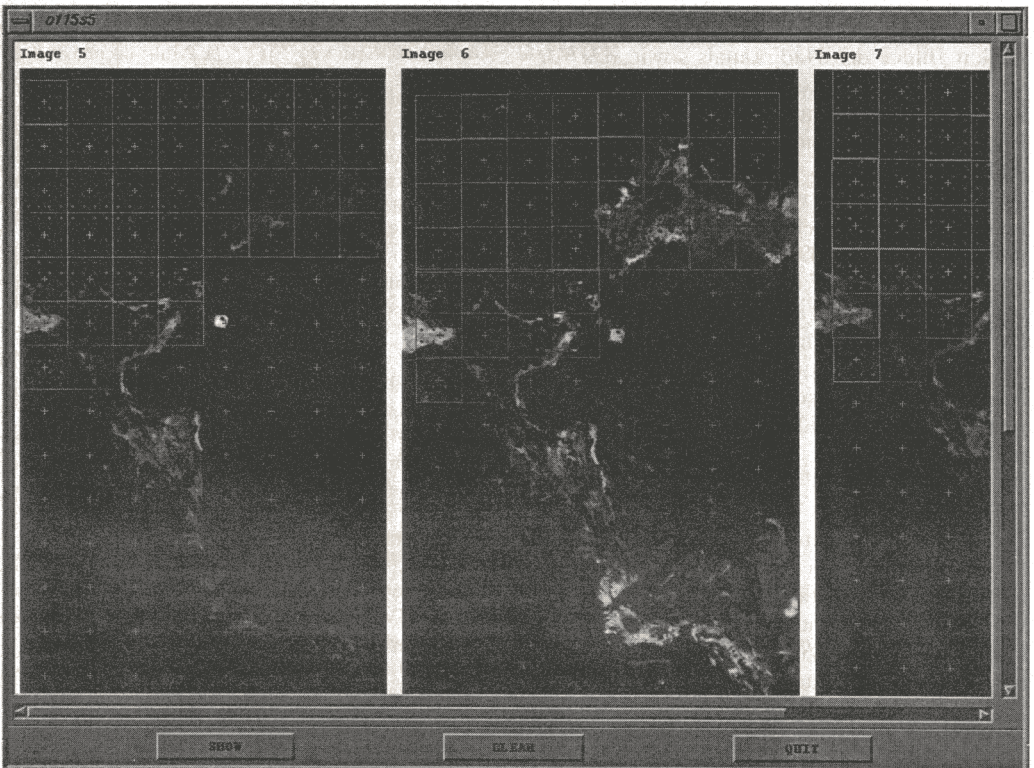


Abb. 2: Automatische Punktübertragung von MOMS02/D2-Aufnahmen (Orbit 75a)



NASA STS Space Shuttle erfolgreich eingesetzt, etwa 4 Stunden Bilddaten von nahezu 7 Mio. km<sup>2</sup> der Erdoberfläche konnten aufgezeichnet werden (D. FRITSCH, 1994). Derzeit befinden sich diese Daten in der Auswertung – am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart sind hierzu Programm-Module zur Punktübertragung und automatischen Generierung von digitalen Geländemodellen entwickelt worden.

Die Dreizeilen-Geometrie verlangt wesentlich mehr Verknüpfungspunkte, als dies bei der klassischen Perspektivgeometrie der Fall ist, da eigentlich für jedes Dreizeilenbild die Parameter der äußeren Orientierung ermittelt werden müssen. Weiterhin können die durch die Punktübertragung zugeordneten Punkte bei ausreichender Dichte nach der Acrotriangulation zur Bestimmung eines groben DGMs herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde eine Strategie entwickelt, die eine flächenhafte Anwendung der zuvor angegebenen Methode gewährleistet. Hierzu werden die digitalen Bilder des Nadirkanals sowie des vorwärts- und rückwärtsblickenden Stereokanals in *Kacheln (Tiles)* aufgeteilt, so daß für jede Bildkachel das Problem der Punktübertragung und -messung für sich zu lösen ist (siehe Abb. 2). Die ersten vorläufigen Auswertungen liefern ähnliche Ergebnisse wie bei konventionellen Luftbildern. Das modifizierte Softwaresystem benötigt für die Punktübertragung einer Szene von 8000 × 2900 Pixel (ca. 105 × 38 km<sup>2</sup>) innerhalb der drei Stereoaufnahmen etwa 1,8 Stunden Rechenzeit (SGI IRIS/Indigo, R3000/33 MHz Prozessor). Dabei werden über 200 000 Bildpunkte automatisch gemessen und zugeordnet.

## 5. Schluß

Mit den vorliegenden Entwicklungen und Untersuchungen am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart ist nachgewiesen worden, daß die vollautomatische Acrotriangulation kein Wunschtraum mehr ist, sondern als Methode zur praktischen Anwendung zur Verfügung steht. Das Verfahren ist hinsichtlich Genauigkeit, Zeitaufwand und Kosten der konventionell ausgeführten Acrotriangulation weit überlegen, sobald die Vorausset-

zungen bezüglich der Bilddigitalisierung und Bildspeicherung gegeben sind. Außerdem übertrifft der vollautomatische Ansatz die derzeit eingesetzten Verfahren der interaktiv gesteuerten digitalen Punktübertragung wesentlich, so daß eine nochmalige Effizienzsteigerung von auszuführenden photogrammetrischen Arbeiten gegeben ist. Weitere Entwicklungen zielen auf die Steigerung der Robustheit und des Automationsgrades ab, damit die Anzahl interaktiver Eingriffe sowie der groben Fehler weiter gesenkt werden kann. Ebenso ist angestrebt, kritische Gebiete und unregelmäßige Blöcke künftig effizienter mit dem vorliegenden Softwaresystem behandeln zu können.

## Literatur

- ACKERMANN, F., SCHNEIDER, W. (1986): High precision point transfer by digital image correlation. Int. arch. Photogr. & Remote Sens., Vol. 26–III, pp. 18–27. Rovaniemi.
- ACKERMANN, F., TSINGAS, V. (1994): Automatic digital aerial triangulation. Pres. Paper, ASPRS Convnt., Reno.
- AGURIS, P., SCHENK, T. (1992): Multiple image matching. Int. Arch. Photogr. & Remote Sens., Vol. 29–III, pp. Washington.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W., HEIPKE, C. (1987): Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), 55. Jhr., S. 194–203.
- FRITSCH, D. (1994): Synergy of photogrammetry, remote sensing and GIS – the MOMS example. Int. Arch. Photogr. & Remote Sens., Vol. 30–2, pp. 2–9, Ottawa.
- GRÜN, A., BALISAVIAS, E. (1988): Geometrically constrained multiphoto matching. Photogr. Engin. & Remote Sens., Vol. 54, pp. 633–641 (No. 5).
- HEIJAVA, U. V. (1988): Object-Space Least-Squares Correlation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PERS), Vol. 54, pp. 711–714, No. 6.
- McHUGH, J. (1990): Algorithmic Graph Theory. Prentice-Hall, New Jersey.
- NEUMANN, K. (1975): Operations Research Verfahren. Hanser Verlag, München.
- TSINGAS, V. (1992): Automatisierung der Punktübertragung in der Acrotriangulation durch mehrfache digitale Bildzuordnung. Deutsche Geod. Komm., Reihe C, Nr. 392, München.
- WROBEL, B. (1987): Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), 55. Jhr., S. 93–101.

Anschrift der Verfasser:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. DIETER FRITSCH, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21 33 86, Fax (07 11) 1 21 32 97.

Dr.-Ing. VASILIOS TSINGAS, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Azenbergstraße 18, 70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21 12 19, Fax (07 11) 1 21 12 13.

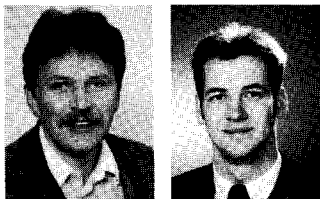
Dipl.-Ing. (FH) WERNER SCHNEIDER, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, 70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21 33 82, Fax (07 11) 1 21 32 97.

DIETER FRITSCH, geboren am 19. 5. 1950. Studium des Vermessungswesens an der Universität Bonn (1974–1977). Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn (1978–1983). Promotion 1982. Akademischer Rat und Oberrat am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Mün-

chen (1984–1992). Habilitation 1990, seit 1. Juni 1992 Professor an der Universität Stuttgart und Direktor des Instituts für Photogrammetrie.

VASILIOS TSINGAS, geboren am 26. 11. 1959. Studium des Vermessungswesens an der Technischen Universität Thessaloniki, Griechenland (1978–1984), von 1985 bis 1987 zusätzliche Studienleistungen an der Universität Stuttgart. 1987–1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie innerhalb des Sonderforschungsbereichs 228 „Hochgenaue Navigation“, 1992–1993 DFG Fördervorhaben „Automatische Acrotriangulation“, ab 1. 1. 1994 freier Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie.

WERNER SCHNEIDER, geboren am 5. 5. 1946. Studium des Vermessungswesens an der Fachhochschule Stuttgart (1967–1970), ab 1970 technischer Angestellter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, seit 1993 Leiter des Labors „Digital Photogrammetrie“ am Institut.



## Relative Orientierung durch digitale Bildzuordnung

MICHAEL HAHN und MICHAEL KIEFNER, Stuttgart

### Zusammenfassung

Seit Anfang der 80er Jahre werden am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart Verfahren zur Zuordnung digitaler Bilder erforscht und experimentell erprobt. Ziel dieser Entwicklungen ist die Automation von Meßvorgängen, wie z. B. die Übertragung von Punkten in die überlappenden Bilder eines Bildverbandes. Entsprechende Aufgaben werden in der analytischen Photogrammetrie vom Operateur wahrgenommen.

Die Algorithmen zur Bildzuordnung finden sich heute meist als Komponenten in Systemen wieder, durch die sich mehr oder minder komplexe Aufgaben der digitalen Photogrammetrie bearbeiten lassen. Eine solche Aufgabe ist die relative Orientierung. In diesem Aufsatz soll ein Verfahren zur automatischen relativen Orientierung vorgestellt werden, das in den vergangenen Jahren entwickelt und erprobt wurde. Daß das Verfahren auch für andere Aufgaben der digitalen Photogrammetrie nutzbringend eingesetzt werden kann, soll zum Schluß des Aufsatzes aufgezeigt werden.

### Relative orientation by means of digital image matching

In the early 80th image matching became one of the most important research topics at the Institut of Photogrammetry, University of Stuttgart. The aim of the developments is in the automation of measurement processes, e. g. the point transfer of natural landmarks into the overlapping images within an image block. In analytical photogrammetry this job is done by human operators.

Today algorithms for image matching are mostly components of extensive procedures, which are developed to solve more or less complex tasks of digital photogrammetry. Such a task is the relative orientation of a digital image pair. In this paper we present a procedure for automatic relative orientation which is developed and analyzed in the past two years. The usage of the procedure in supporting other tasks of digital photogrammetry is discussed at the end of this paper.