

Automatische Aerotriangulation

V. Tsingas, Stuttgart

1. Einführung

Mit der Einführung analytischer Methoden [SCHMID 1958/1959] und der schrittweisen Verfeinerung des mathematischen Modells wurde die Bildtriangulation als ein leistungsfähiges geodätisches Verfahren hoher Genauigkeit etabliert und fand in der Praxis eine breite Anwendung (großräumige Kartierung, Kataster, Netzverdichtung usw.). Die Entwicklung hat sich dabei hauptsächlich auf die Blockausgleichung konzentriert, während die übrigen Phasen - Planung, Vorbereitung, Messung - relativ wenig beeinflußt wurden. Somit bezeichnet heute der Begriff der Aerotriangulation im wesentlichen die numerisch arbeitenden Verfahren der Blocktriangulation, die sich aber auf stets manuell gemessene Bild- oder Modellkoordinaten stützen. Inzwischen hat sich das Interesse der photogrammetrischen Forschung mehr der automatischen Lösung der Aufgaben der Identifizierung und der koordinatenmässigen Erfassung des Bildinhalts zugewandt. Für die Aerotriangulation bestehen diese Aufgaben in der Identifizierung, Übertragung und Messung der Verknüpfungs- und Paßpunkte. Die unter dem Sammelbegriff der Punktübertragung und Punktmessung zusammengefaßten Operationen der Auswahl, Identifizierung, Übertragung, Markierung und Messung der Bildverknüpfungspunkte bilden nicht nur eine ganz entscheidende Voraussetzung für die Zuverlässigkeit und Genauigkeit einer Blocktriangulation [SCHWIDEFSKY/ACKERMANN 1976]. Diese Operationen sind bisher auch der manuellen Bearbeitung durch den Menschen überlassen und somit arbeitsintensiv, langsam und teuer. Aus dieser Sicht besteht eine hohe Notwendigkeit wie auch eine günstige Voraussetzung zur Automatisierung in diesem Bereich. Die technischen Voraussetzungen dazu sind durch die gewaltige Entwicklung der Computertechnologie bezüglich Rechenleistung und Speicherkapazität der Rechenanlagen geschaffen worden. Die Automatisierung der Punktübertragung und -messung wird eine Leistungssteigerung der Aerotriangulation mit sich bringen und den automatischen Ablauf der Aerotriangulation (im engeren Sinne die Phasen nach der Befliegung) als einen geschlossenen Prozeß ermöglichen.

Hier wird ein Verfahren für die Automatisierung der Punktübertragung und der Messung der Verknüpfungspunkte auf der Basis digitaler oder digitalisierter Bilder vorgestellt. Der theoretische Kern des Verfahrens ist eine Methode für die mehrfache Merkmalszuordnung, die hier kurz behandelt wird. Anschließend werden die Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens auf einen Block, der aus digitalen Aufnahmen eines Geländemodells entstand, dargestellt und besprochen. Die Anwendung des Verfahrens auf einen Block von Luftbildern ist derzeit in Bearbeitung. Die Ergebnisse sollen bei der Photogrammetrischen Woche 1991 vorgelegt werden.

2. Stand der konventionellen Aerotriangulation und angestrebte Leistungssteigerung

Die Aerotriangulation ist ein systematischer und klar gegliederter Arbeitsprozeß. Man kann im erweiterten Sinne vier Phasen unterscheiden: die Planung und Vorbereitung, die Befliegung, die Messung und die Berechnung. Im engeren Sinne aber, aus der Sicht des Operators, umfaßt der Begriff der Aerotriangulation die Phasen nach dem Flug und der Entwicklung des Filmmaterials, nämlich die Messung einschließlich der Bildvorbereitung und Punktübertragung und die Berechnung. Die photogrammetrische Entwicklung im Bereich der Aerotriangulation hat sich in den letzten 3 Jahrzehnten auf die Ausgleichung konzentriert, die derzeit durch die Einbeziehung von GPS-Daten erweitert wird. Obwohl in diesem Bereich noch nicht alle Wünsche erfüllt sind (z.B. bez. Datenbereinigung, Fehlerbehandlung, Qualitätskontrolle), ist die Ausgleichung weitgehend ausgereizt, und es gibt keinen dringenden Handlungsbedarf. Dagegen blieb die Vorbereitung und Messung von dieser Entwicklung ausgeklammert bzw. wurde sie bezüglich der Anforderungen an die Punktübertragung eher noch erschwert. Die Vorbereitung des Bildmaterials und die Datenerfassung (Beobachtungen) werden immer noch manuell abgewickelt und man benutzt noch stets die nicht-digitalen photographischen Bilder. Damit ist die Vorbereitung und Messung heute die arbeitsintensivste und zeitraubendste Phase der Aerotriangulation. Darüber hinaus beeinflussen die Verfahren und die Geräte, die für die Lösung der einzelnen Teilaufgaben dieser Phase verwendet werden, erheblich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Endergebnisse.

2.1 Punktübertragung und Genauigkeitsniveau der Aerotriangulation

Vor der Messung findet die sog. Vorbereitung der Bilder statt, die die Auswahl und Identifizierung der Verknüpfungs- und Paßpunkte und die Punktübertragung umfaßt. Die Verknüpfung der Bilder im Block erfolgt durch homologe Bildpunkte in den Überlappungsgebieten. Ihre Anzahl wächst proportional mit der Blockgröße und kann bei großen Blöcken viele tausend Punkte erreichen. Damit ist die manuelle Punktübertragung und Messung der Verknüpfungspunkte der zeitaufwendigste Teil der Aerotriangulation (2 bis 5 Minuten pro Verknüpfungspunkt) und stellt einen erheblichen Teil des Gesamtaufwands dar. Weiterhin sind bei manuellen Verfahren grobe Fehler (z.B. Zielidentifizierung, Punktnumerierung) unvermeidbar. Bei umfangreichen Datenmengen, wie sie in der Aerotriangulation üblich sind, sind die Daten nicht mehr unmittelbar kontrollierbar. Die schrittweise Lokalisierung und Eliminierung grober Fehler während der Blockausgleichung ist zwar möglich, belastet aber die Aerotriangulation mit zusätzlichem Rechenaufwand. Außerdem sind Genauigkeit und Zeitaufwand stark von der Erfahrung des Operateurs abhängig. So liefern zwei Ausgleichungen des gleichen Blocks deutlich verschiedene Ergebnisse, wenn die Punktübertragung und -messung von zwei Operateuren, oder auch von demselben Operateur zweimal, durchgeführt wird. Ein weiteres charakteristisches Merkmal der manuellen Verfahren ist, daß die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild aus Kostengründen auf das Minimum (4 bis 15 Punkte bzw. Doppelpunkte) und die Anzahl der gleichzeitig bearbeiteten Bilder auf zwei (wegen stereoskopischer Übertragung und Messung) beschränkt werden.

Theoretische und empirische Untersuchungen haben die Abhängigkeit der Genauigkeit der Aerotriangulation von den Projektparametern gezeigt. Somit es ist schon während der Planung möglich, durch die optimale Wahl der Projektparameter die Genauigkeit der Ergebnisse zu beeinflussen, um die vorgegebenen Spezifikationen zu erfüllen. Bei gegebener Kamera und gegebenem Bildmaßstab hängt die Genauigkeit grundsätzlich von zwei Faktoren ab, nämlich von der Blockgeometrie (Überdeckung, Verknüpfung, Paßpunkte) und der "Meßgenauigkeit", die sich in dem σ_0 der Ausgleichung ausdrückt. Neben den Geräte- und Meßfehlern schlägt sich im wesentlichen die Genauigkeit der Punktidentifizierung und Übertragung in dem σ_0 -Wert der Blockausgleichung nieder. Sie bestimmt das Genauigkeitsniveau der Aerotriangulation. Das ist besonders bei der Bündeltriangulation kritisch, wo alle Verknüpfungspunkte übertragen und markiert werden müssen. Die "Meßgenauigkeit" hängt grundsätzlich von der Art der verwendeten Verknüpfungspunkte ab. Somit bestimmen die Genauigkeitsanforderungen die Art und die Anzahl der gemessenen Verknüpfungspunkte sowie das Verfahren der Punktübertragung. Es gibt mehrere Verfahren für die Auswahl und Messung der Verknüpfungspunkte, die sich durch die Art der Punkte (natürliche, signalisierte oder künstlich markierte) und die verwendeten Geräte voneinander unterscheiden. In der Praxis werden am häufigsten, je nach Genauigkeitsforderung, zwei Methoden für die manuelle Auswahl und Übertragung der Verknüpfungspunkte angewendet :

- Signalisierte Verknüpfungspunkte: Geländepunkte in den Überlappungsgebieten werden vor dem Flug signalisiert. Die signalisierten Punkte müssen vom Operateur identifiziert und gemessen werden. Bei dieser Methode entfällt die Punktübertragung und somit treten keine Übertragungsfehler auf. Die erreichbare Genauigkeit der Bildkoordinaten liegt unter $3\mu\text{m}$ (σ_0). Dieser Fall repräsentiert die *Präzisionsaerotriangulation* und wird dort angewendet, wo hohe Genauigkeitsforderungen gestellt sind (Kataster, Nahbereich).
- Künstlich markierte Verknüpfungspunkte: Die in einem Bild ausgewählten und markierten Punkte werden mit geeigneten Punktübertragungsgeräten in die benachbarten Bilder übertragen und für die spätere Messung im Monokomparator markiert. Diese Methode führt wegen der Übertragungsfehler zu einer erheblichen Verminderung der Genauigkeit gegenüber der vorherigen Methode. Die Werte von σ_0 liegen in der Praxis zwischen 7 und 20 μm .
Hauptanwendung ist die sog. *topographische Aerotriangulation* (Aerotriangulation für Kartierungen).

Da sowohl die Signalisierung der Verknüpfungspunkte im Gelände als auch ihre Wartung sehr kostenaufwendig ist, stellt die topographische Aerotriangulation mit Punktübertragung den Standardfall der photogrammetrischen Punktbestimmung dar. Die Punktübertragung kann zwar heute sehr genau sein ($< 10\mu\text{m}$), sie ist aber immer noch der begrenzende Faktor für die erreichbare Genauigkeit und stellt somit den wichtigsten Engpaß der konventionellen Aerotriangulation dar.

2.2 Leistungssteigerung der Aerotriangulation durch Automation

Die Aerotriangulation ist ein zusammengesetzter photogrammetrischer Arbeitsprozeß. Mehrere verschiedenartige Aufgaben müssen erledigt werden bis die Endergebnisse vorliegen. Viele davon, wie Planung, Auswahl der Verknüpfungspunkte oder

auch Fehlerbehandlung bei der Blockausgleichung, lassen sich nicht durch ein mathematisches Modell beschreiben und können somit algorithmisch nicht gelöst werden. Bei solchen Aufgaben muß der Operateur anhand seines Wissens und seiner Erfahrung die Entscheidung treffen. Damit ist die Vollautomatisierung der Aerotriangulation eng mit der Entwicklung der Künstlichen Intelligenz verbunden und führt langfristig zu der Entwicklung eines *Wissensbasierten Systems*. Während die Wissensbasierten Systeme erst seit einigen Jahren die photogrammetrische Forschung beschäftigen [SARJAKOSKI 1988, FÖRSTNER 1989], existieren unterhalb dieser Ebene schon heute ausgereifte elementare Methoden und leistungsfähige Rechenanlagen, die die Automatisierung der zeit- und arbeitsintensiven Operationen der Aerotriangulation ermöglichen. Solche Operationen sind, wie schon erwähnt, die Auswahl, Identifizierung, Übertragung und Messung der Verknüpfung- und Paßpunkte. Die automatische Identifizierung und Messung der Paßpunkte ist prinzipiell möglich (z.B. durch Mustererkennung oder Flächenkorrelation) und kann unter gewissen Voraussetzungen (z.B. gute Näherungswerte) realisiert werden. Da aber die Anzahl der erforderlichen Paßpunkte durch die günstigen Genauigkeitseigenschaften der großen Blöcke und die Benutzung von Hilfsdaten relativ gering ist, ist die manuelle Identifizierung und Messung der Paßpunkte auf einem analytischen photogrammetrischen Gerät oder bei digitalen Bildern interaktiv an einem Bildschirm keine zu große Belastung für den Operateur, so daß eine Automatisierung nicht unmittelbar dringend ist. Es bleibt somit die Auswahl, Übertragung und Messung der Verknüpfungspunkte, deren Automatisierung zu einer erheblichen Leistungssteigerung der Aerotriangulation führen würde, sowohl hinsichtlich des Zeit- und Kostenaufwandes als auch der Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Verfahrens. Die Folge wäre, daß die ganze Aerotriangulation (nach der Befliegung und Digitalisierung der Bilder) als ein automatischer Prozeß (batch oder interaktiv) auf einem Gerät (digitaler Rechner) ablaufen könnte. Die jüngste Entwicklung im Bereich der photogrammetrischen Geräte (Scanner und digitale photogrammetrische Stationen) zeigt, daß ein solches Ziel nicht mehr weit von der Realität entfernt ist. Es würde zu einer hochinteraktiven und benutzerfreundlichen Umgebung für die Durchführung der Aerotriangulation und zur Entlastung des Operateurs von den arbeitsintensiven und Erfahrung voraussetzenden Funktionen führen.

3. Automatisierung der Punktübertragung und der Punktmessung

Das Hauptproblem bei der Punktübertragung ist, homologe Bildpunkte in Überlappungsgebieten zu finden, koordinatenmässig zu erfassen und für die Ausgleichung entsprechend zu numerieren. Der automatische Ablauf dieses Prozesses ist im Gegensatz zu der automatischen Identifizierung der Paßpunkte ohne größeren Aufwand operationell machbar. Ein automatisches Verfahren für die Übertragung und Messung der Verknüpfungspunkte muß deutliche Vorteile hinsichtlich Genauigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ablauf gegenüber den konventionellen manuellen Verfahren aufweisen. Die Aerotriangulation mit signalisierten Verknüpfungspunkten stellt hinsichtlich der Genauigkeit den idealen Fall dar. Die Messung der Bildkoordinaten ist sehr genau ($< 1 \mu\text{m}$), und da keine Punktübertragung stattfindet, entfallen die Übertragungsfehler. Man braucht deshalb für die automatische Aerotriangulation ein Verfahren der internen Punktidentifizierung, dessen Genauigkeit äquivalent zur bisherigen Verwendung signalisierter Punkte ist. Dabei ist weniger der Bildpunkt selber das Problem als vielmehr die Identifizierung homologer Bildpunkte, was der Punktübertragung der Verknüpfungspunkte entspricht. Benötigt wird also ein Verfahren für die Operationen der Punktidentifizierung, -übertragung und -messung, das eine dem Fall signalisierter Punkte äquivalente Genauigkeitsleistung bringt ($\sigma_0 \rightarrow 3\mu\text{m}$) und gleichzeitig schnell genug, d.h. wirtschaftlich, ist. Damit könnte die Präzisionsaerotriangulation der Standard-Fall der photogrammetrischen Punktbestimmung werden.

Die Vollautomatisierung der Punktübertragung setzt digitale Bilder und digitale Verfahren voraus. Das Problem der Identifizierung und Messung homologer Bildpunkte kann durch *digitale Zuordnungs- oder Korrelationsverfahren* gelöst werden. Für die Photogrammetrie sind diejenigen Verfahren von Interesse, die eine Punktbestimmung mit Subpixelgenauigkeit erlauben. Das sind die Kleinste-Quadrate-Zuordnung (LSM) und das "Feature Based Matching" (FBM). Die Genauigkeit des LSM liegt etwa bei 1/10 Pixel. Die Anwendung des LSM für die Punktübertragung und Punktmessung war schon Gegenstand empirischer Untersuchungen. Die Ergebnisse im Testblock *Schnürpflingen* und *Appenweier* zeigen, daß das Genauigkeitspotential des Verfahrens mindestens genauso gut oder besser als beim konventionellen Verfahren ist ($\sigma_{\text{zuord}} < 3\mu\text{m}$) [PERTL 1985, ACKERMANN/SCHNEIDER 1986]. Ein Nachteil des LSM-Verfahrens ist, daß die Näherungswerte sehr genau sein müssen (< 3 Pixel). Das FBM dagegen ist ein robustes Merkmalszuordnungsverfahren, das nur grobe Näherungswerte für die Überdeckung benötigt. Die zugeordneten Merkmale sind markante Punkte, die mit

Hilfe des Förstner-Interestoperators extrahiert werden. Der Förstner-Interestoperator ist auf der Basis der theoretisch erreichbaren Genauigkeit des LSM konzipiert und kann Punkte mit einer Genauigkeit von etwa 1/4 Pixel extrahieren.

Bei den manuellen Verfahren der Punktübertragung wird ein ausgewählter Bildpunkt in die unmittelbar benachbarten Bilder übertragen (Pfeile in Abb. 1) und es wird ohne weitere Überprüfung vorausgesetzt, daß auch die durch die Übertragung in die anderen Bilder markierten Punkte untereinander homolog sind (Bogen in Abb. 1). Eine Zuordnung (Übertragung) dieser Bildpunkte würde aber zu der Feststellung führen, daß teilweise Abweichungen (Zuordnungsfehler) vorhanden sind. Ein automatisches Verfahren sollte deshalb alle gegenseitigen Zuordnungen

zwischen n homologen Bildpunkten berücksichtigen. Somit muß der Kern eines Verfahrens für die automatische Punktübertragung eine Methode für die mehrfache Bildzuordnung sein, die ohne Einschränkung auf alle Blockgebiete mit variablen Überlappungen angewendet werden kann. Bei der Auswahl der Zuordnungsmethode (Flächenzuordnung oder Merkmalszuordnung) muß grundsätzlich die Genauigkeit der Methode und die für den automatischen Ablauf wichtige Beschaffung der Näherungswerte berücksichtigt werden. Die Kleinste-Quadrate-Zuordnung ist zwar wegen ihrer Genauigkeitsleistung ideal für die Punktübertragung, aber sie ist gleichzeitig auf andere robuste Verfahren für die Näherungswerte angewiesen. Wenn wir nun annehmen, daß sich das σ_0 der Blockausgleichung aus dem Zuordnungsfehler σ_{zuord} (Zuordnung=Übertragung+Messung) und den sonstigen Bildfehlern σ_{rest} zusammensetzt, kann man, wenn man von der Präzisionsaerotriangulation mit signalisierten Punkten ($\sigma_0 \approx 3\mu\text{m}, \sigma_{zuord} \approx 1$) ausgehend den Restfehler mit $\sigma_{rest} \approx 2.8\mu\text{m}$ angeben. Wenn man nun die Genauigkeit der Präzisionsaerotriangulation mit einem automatischen Verfahren erreichen will, muß der Zuordnungsfehler jedenfalls kleiner als $2\mu\text{m}$ sein ($\sigma_{zuord} = 2\mu\text{m} \rightarrow \sigma_0 \approx 3.5\mu\text{m}$). Andererseits liegt aber die Genauigkeit bei der Standardaerotriangulation bestenfalls bei $7\mu\text{m}$, in der Regel bei deutlich größeren Werten ($\sigma_{zuord} \geq 6.5\mu\text{m}$). Wenn es nun ein automatisches Verfahren für die Punktübertragung gäbe, das einerseits aus sich selbst heraus die Näherungswerte beschaffen und andererseits eine Zuordnungsgenauigkeit von z.B. $4\mu\text{m}$ ($\rightarrow \sigma_0 < 5\mu\text{m}$) erreichen könnte, würde der Standardfall der Aerotriangulation schon an den Bereich der Präzisionsaerotriangulation heranrücken, und es wäre damit ein großes, praktisches Ziel erreicht. Diese Genauigkeit kann bereits durch ein robustes Merkmalszuordnungsverfahren erreicht werden, das sich auf den Förstner-Interestoperator stützt und z.B. auf mit $15\mu\text{m}$ Pixelgröße digitalisierte Bilder angewendet wird ($\sigma_{zuord} \approx 1/4 \cdot 15\mu\text{m} \approx 4\mu\text{m}$). Außerdem kann ein automatisches Verfahren leicht mit einer größeren Anzahl von Punkten arbeiten, so daß im Endeffekt eine noch genauere Bildverknüpfung erreicht wird. Die Übertragung vieler Punkte mit mäßiger Genauigkeit ist bei gleichem Endergebnis strategisch höher zu bewerten als die Übertragung weniger Punkte mit hoher Genauigkeit. Im folgenden wird über die Entwicklung einer elementaren Methode für die mehrfache Merkmalszuordnung zur automatischen Punktübertragung berichtet, die sich auf den Förstner-Interestoperator stützt und als eine Verallgemeinerung des Feature Based Matching von mehreren beliebig überlappenden Bildern oder Bildausschnitten betrachtet werden kann. Die benötigten Näherungswerte werden nach Abb. 2 hierarchisch (von grob zu fein) über Bildpyramiden beschafft. Theoretisch könnte das FBM die Näherungswerte für ein anschließendes LSM liefern, was aber vorläufig nicht vorgesehen ist.

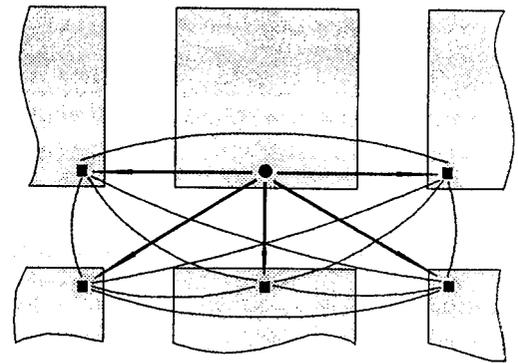


Abb. 1 : Punktübertragung nach Van den Hout und fehlende Zuordnungen

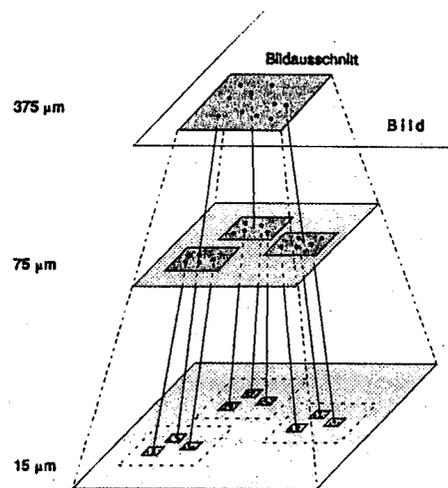


Abb. 2 : Hierarchische Beschaffung von Näherungswerten mit Hilfe von Bildpyramiden

Wegen der fortlaufenden Überlappung kann man einen photogrammetrischen Block nicht in Gruppen von sich überlappenden Bildern unterteilen, ohne dabei manche Bildpaare überhaupt nicht zu berücksichtigen oder Bildpaare mehrmals in ver-

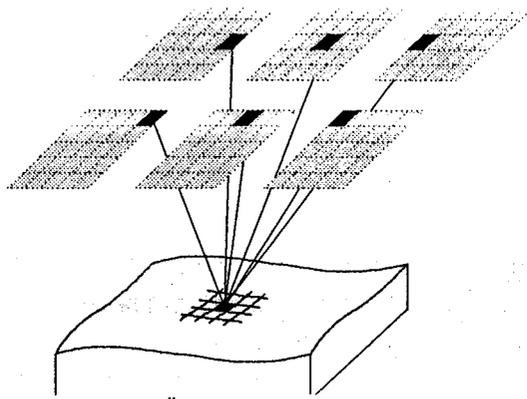


Abb. 3 : Überlappungsgebiet in Bilder und Gelände

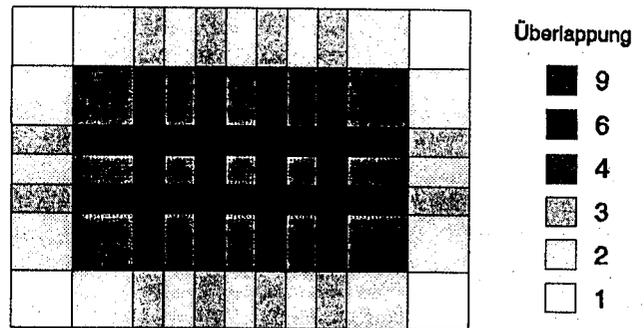


Abb. 4 : Unterteilung des Blocks in Überlappungsgebiete

schiedene Gruppen einzubringen. Es muß deshalb eine Strategie für die Anwendung der mehrfachen Merkmalszuordnung entwickelt werden, die den Prozeß sowohl durch die vertikale Bildstruktur der Bildpyramiden als auch durch die horizontale Bildstruktur des Blocks steuert. Wenn man von $15\mu\text{m}$ Pixelgröße der digitalisierten Bilder ausgeht und jeweils 5×5 Pixel gemittelt werden, wird eine Bildpyramide aufgebaut, die aus drei Ebenen mit $15\mu\text{m}$, $75\mu\text{m}$ und $375\mu\text{m}$ Pixelgröße besteht. Nach der Anwendung des Verfahrens in der obersten Ebene werden die genauesten mehrfachen Zuordnungen ausgewählt und die entsprechenden homologen Bildpunkte auf die nächstniedere Ebene übertragen. Um diese Bildpunkte herum werden neue homologe Bildausschnitte definiert (etwa 256×256 Pixel), auf die das Verfahren erneut angewendet wird (Abb. 2). In der obersten Ebene werden die Bilder anhand der Längs- und Querüberdeckung in Bildausschnitte unterteilt, die den verschiedenen Gebieten im Gelände mit der jeweiligen Überlappung entsprechen (Abb. 3). Die Abb. 4 zeigt die Unterteilung eines regulären Blockes mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung (4 Streifen mit 6 Bildern) in Überlappungsgebieten (im Objektraum). Die homologen Bildausschnitte, auf die das Verfahren angewendet wird, werden in der obersten Ebene der Bildpyramide ermittelt, wo nur die Überlappingsbeziehungen und die Längs- und Querüberdeckung bekannt sind.

4. Mehrfache Merkmalszuordnung

Bei der Konzeption des Verfahrens wurde versucht, nur die minimal notwendigen äußeren Informationen vorauszusetzen und das Verfahren möglichst allgemein zu gestalten. So erlaubt die allgemeine Formulierung der mehrfachen Merkmalszuordnung, das Verfahren auf Blöcke mit beliebiger Überlappung anzuwenden. Die Überlappingsbeziehungen der Bilder bzw. Bildausschnitte werden als bekannt vorausgesetzt. Ebenso wird vorausgesetzt, daß die Bilder genügend Textur haben, damit der Interestoperator die notwendige Mindestanzahl an markanten Punkten extrahieren kann. Das Verfahren ist modular aufgebaut und läßt sich in drei Teilprozesse unterteilen:

- Merkmalsextraktion und vorläufige paarweise Zuordnung
- Robuste Ausgleichung zur Eliminierung der grob falschen Zuordnungen (paarweise)
- Bestimmung der mehrfachen Zuordnungen (Tupel von homologen Bildpunkten)

Mit der Bestimmung der mehrfachen Zuordnungen findet auch die für die Ausgleichung wichtige Kennzeichnung der homologen Bildpunkte mit der Nummer des entsprechenden Geländepunktes statt. In der Bündelblockausgleichung werden die ursprünglich durch den Interestoperator aus der Grauwertmatrix extrahierten Pixelkoordinaten nach ihrer Transformation (und Korrektur) auf das Bildkoordinatensystem als beobachtete Bildkoordinaten verwendet.

4.1 Merkmalsextraktion und vorläufige paarweise Zuordnung

Für die Extraktion der markanten Punkte wird der Förstner-Interestoperator auf jedem Bild oder Bildausschnitt unabhängig angewendet. Das Ergebnis ist für jedes Bild eine Liste von markanten Punkten mit ihren Pixelkoordinaten und Gewichten. Danach werden alle möglichen Gebietszuordnungen zwischen den überlappenden Bildern gebildet (bei n gemeinsamen Bildern sind das $n(n-1)/2$ Bildpaare). Für jedes Bildpaar wird jeder Punkt des ersten Bildes mit allen Punkten des zweiten Bildes auf Ähnlichkeit verglichen und das Ähnlichkeitsmaß als Gewicht für die entsprechende paarweise Zuordnung ver-

wendet [FÖRSTNER 1985]. Somit werden $n(n-1)/2$ Listen von vorläufigen paarweisen Zuordnungen gebildet. Diese Listen enthalten noch grob falsche Zuordnungen (über 50%), die anschließend mit Hilfe einer robusten Ausgleichung lokalisiert und eliminiert werden müssen.

4.2 Robuste Ausgleichung

Ziel der zweiten Phase des Verfahrens ist es, die in der Liste der vorläufigen Zuordnungen noch enthaltenen grob falschen Zuordnungen schrittweise durch eine robuste Ausgleichung zu eliminieren. Als Kriterium dafür wird die Anpassung der Zuordnungen auf ein geometrisches Modell benutzt, das den geometrische Zusammenhang der überlappenden Bilder beschreibt. Der direkte geometrische Zusammenhang zwischen zwei überlappenden perspektiven Abbildungen ist wegen der 3-Dimensionalität des Objekts (Gelände) äußerst komplex und ohne Kenntnis der Geländeoberfläche nicht nachvollziehbar. Er kann aber für kleine Bildausschnitte (etwa $5\text{mm} \times 5\text{mm}$) in guter Näherung durch eine affine Transformation beschrieben werden. Da bei digitalisierten Bildern die Pixelgröße das Parallaxenmaß ist, hängt die Größe der mit der Affintransformation beschreibbaren Bildausschnitte von der Bildauflösung und der Geländeform ab. Bei größerer Auflösung werden unter sonst gleichen Bedingungen die Parallaxen in Pixeleinheiten kleiner. Damit können bei genügend großen Pixeln auch größere Bildausschnitte durch eine affine Abbildung für die Beschaffung von Näherungswerten verknüpft werden. Wegen der variablen Überlappung in photogrammetrischen Blöcken ist für die Darstellung der geometrischen Zusammenhänge eine Erweiterung der Affintransformation für eine beliebige Anzahl von überlappenden Bildern oder Bildausschnitten notwendig. Für jedes Punktpaar (k,m) aus der Liste der vorläufigen Zuordnungen des Bildpaares (i,j) sind zwei Gleichungen (für die x- und y-Bildkoordinaten) aufzustellen:

$$x_k^i = T_j^i \cdot x_m^j \quad (1)$$

wobei T_j^i die Transformationmatrix von Bild j zum Bild i ist, und $x_k^i = [x_k^i, y_k^i]^T$ bzw. $x_m^j = [x_m^j, y_m^j]^T$. Damit auch aus Gl. (1) die inverse Transformation $T_i^j = (T_j^i)^{-1}$ abgeleitet werden kann, wird die 2×3 Transformationsmatrix T_j^i auf die Dimension 3×3 erweitert. Man kann nun in der Gl. (1) die Transformation T_j^i vom Bild j zum Bild i über die Transformation T_i^r und T_j^r der Bilder i und j zu einem jeweils gemeinsamen Referenzbild r darstellen :

$$T_j^i = (T_i^r)^{-1} \cdot T_j^r \quad (2)$$

Die allgemeine Formel für die Affintransformation lautet nun :

$$x_k^i = (T_i^r)^{-1} \cdot T_j^r \cdot x_m^j \Rightarrow \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \\ d_i & e_i & f_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} a_j & b_j & c_j \\ d_j & e_j & f_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix}_j \quad (3)$$

wobei a_i, \dots, f_i und a_j, \dots, f_j die Transformationsparameter für die Affintransformation der Bilder i und j zum Referenzbild r bedeuten. Dadurch wird die Anzahl der unabhängigen Transformationen auf $n-1$ beschränkt, und die Anzahl der unbekanntenen Transformationsparameter, die durch eine simultane Ausgleichung zu bestimmen sind, ist $n_i = 6(n-1)$. Die inverse Matrix $(T_i^r)^{-1}$ kann durch die Determinante $\det(T_i^r)$ und die zu jedem Element von T_i^r gehörige Adjunkte ersetzt werden.

Damit bekommt man aus Gl. (3) für jedes Punktpaar (k,m) zwischen zwei Bildern i und j die folgenden Beziehungen als Funktion der Parameter der Transformationen der beiden Bilder zu dem Referenzbild r :

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix}_i = \frac{1}{a_i e_i - b_i d_i} \cdot \begin{bmatrix} e_i & -b_i & b f_i - c_i e_i \\ -d_i & a_i & c_i d_i - a f_i \\ 0 & 0 & a_i e_i - b_i d_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_j & b_j & c_j \\ d_j & e_j & f_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix}_j \quad (4)$$

Der Einfachheit halber werden die Gl. (4) wie üblich als Fehlergleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen verwendet. Die Gleichungen (4) sind bezüglich der unbekanntenen Transformationsparameter nicht linear und müssen nach Taylor linearisiert werden (Gl. (5)), was neben den groben Fehlern der zweite Grund für einen iterativen Prozeß ist. Als Anfangsnäherung für die Linearisierung dienen die Werte 1 für den Maßstab (a_i, e_i, a_j, e_j), 0 für die

Scherung und Rotation (b_i, d_i, b_j, d_j) und die näherungsweise bekannte Überlappungsbeziehungen für die Verschiebung (c_i, f_i, c_j, f_j).

$$x_k^i + v_{km} = \frac{\partial \phi}{\partial a_i^0} \cdot da_i + \dots + \frac{\partial \phi}{\partial f_i^0} \cdot df_i + \frac{\partial \phi}{\partial a_j^0} \cdot da_j + \dots + \frac{\partial \phi}{\partial f_j^0} \cdot df_j + \phi_0(a_i^0, \dots, f_i^0, a_j^0, \dots, f_j^0, x_m^i) \quad (5)$$

In Gl. (5) lassen sich die partiellen Ableitungen in zwei Gruppen einteilen, nämlich bezüglich der Transformationsparameter des Bildes i nach r und des Bildes j nach r . Bei $i=r$ ist $(T_i^r)^{-1}$ gleich der Einheitsmatrix, und damit entfallen die entsprechenden Ableitungen. Die Struktur der Fehlergleichungsmatrix (Abb. 5) zeigt, daß nur ein Teil von ihr und zwar bestimmte Submatrizen besetzt sind. Diese Struktur ergibt sich, wenn bei n Bildern alle Bildpaare ij in der aufsteigenden Reihenfolge von $i=1$ bis $n-1$ und $j=i+1$ bis n gebildet werden. Jede Submatrix hat die Dimension $2s_{ij} \times 6$, wobei s_{ij} die Anzahl der Zuordnungen zwischen Bild i und Bild j ist. In Gl. (5) sind 12 verschiedene partielle Ableitungen zu berechnen. Damit wir zu einer einheitlichen Formulierung für die Berechnung der partiellen Ableitungen kommen, werden die Transformationsparameter wie in der Fehlergleichungsmatrix einheitlich nummeriert. Dafür werden die Hilfsparameter ii und jj benutzt, die die Stelle des ersten Elements jeder Submatrix ($ii+1$ bzw. $jj+1$) innerhalb einer Zeile der Fehlergleichungsmatrix angeben. Mit $ii=(i-2)*6$ (für $i > 1$) und $jj=(j-2)*6$ bekommen wir für die Transformationsparameter die Notationen

$$a_{ii,1} = a_i, \quad a_{ii,2} = b_i, \quad \dots, \quad a_{ii,6} = f_i$$

$$a_{jj,1} = a_j, \quad a_{jj,2} = b_j, \quad \dots, \quad a_{jj,6} = f_j$$

Mit zwei zusätzlichen Hilfsgrößen ik und jk wird die Vektordarstellung der Variablen (1 bis 6) innerhalb einer Submatrix auf eine 3×3 Matrix übertragen (Zeilenindex: $ik=k-\text{int}(k/4)*3$, Spaltenindex: $jk=\text{int}(k/4)+1$ für $k=1, \dots, 6$). Dann werden die partiellen Ableitungen $f = \frac{\partial \phi}{\partial a_i}$ und $g = \frac{\partial \phi}{\partial a_j}$ für die ganze Fehlergleichungsmatrix mit Hilfe der Gleichungen (6) und (7) berechnet. Für k von 1 bis 6 und mit den Hilfsvariablen ii, jj, ik, jk ergeben sich die folgenden Formeln für die Koeffizienten jeder Zeile der Submatrix ij :

$$f_{ii,k} = \frac{\partial \phi}{\partial a_{ii,k}} = - \frac{1}{\det(T_i^r)^2} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,jk} \\ q_{2,jk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{ik,1} \\ q_{ik,2} \\ q_{ik,3} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} a_{jj,1} & a_{jj,2} & a_{jj,3} \\ a_{jj,4} & a_{jj,5} & a_{jj,6} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_j \quad (6)$$

$$g_{jj,k} = \frac{\partial \phi}{\partial a_{jj,k}} = \frac{1}{\det(T_j^r)} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,jk} \\ q_{2,jk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{ik,1} \\ e_{ik,2} \\ e_{ik,3} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(T_j^r)} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,jk} \cdot x_{ik} \\ q_{2,jk} \cdot x_{ik} \end{bmatrix} \quad (7)$$

wobei q die Elemente der Adjunktenmatrix Q_i^r zu T_i^r sind. Die Gl. (6) gilt nur für $i > 1$. In Gl. (7) sind e_{ij} die Elemente einer 3×3 Einheitsmatrix und x_{ik} die Elemente des Vektors $x_j^T = [x \ y \ 1]_j$. Damit der Rechenaufwand der robusten Ausgleichung reduziert wird, kann die spezielle Struktur der Fehlergleichungsmatrix ausgenutzt werden, um Formeln für die direkte Berechnung der Normalgleichungskoeffizienten abzuleiten. Durch die Lösung des Gleichungssystems (4) werden die Transformationsparameter bestimmt und gleichzeitig die grob falschen Zuordnungen lokalisiert und aus der Liste der vorläufigen Zuordnungen eliminiert.

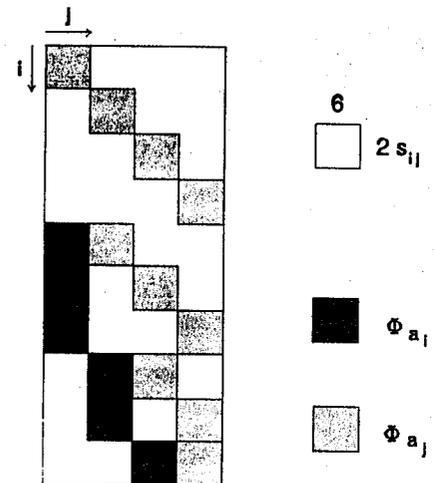


Abb. 5 : Struktur der Fehlergleichungsmatrix

4.3 Bestimmung der mehrfachen Zuordnungen

Nach der robusten Ausgleichung sind immer noch kleine Zuordnungsfehler (doppeldeutige Zuordnungen) vorhanden. Die Eliminierung der doppeldeutigen Zuordnungen und die Bestimmung der mehrfachen Zuordnungen (Tupel von homologen Bildpunkten) aus den paarweisen Zuordnungen ist das Ziel der nächsten Phase der Methode. Das Problem der paarweisen Zuordnung von Objekten wird in der Graphentheorie behandelt und ist als 'Matching-' oder 'Heiratsproblem' bekannt. Ein Sonderfall stellt das maximale Matching mit minimalen Kosten in einem bipartiten Graphen G dar. Ähnlich kann man die Merkmalszuordnung innerhalb von zwei Bildern betrachten,

wenn die markanten Punkte die Knoten und die Zuordnungen die Kanten eines bipartiten Graphen $G(X,R)$, mit $X=X_1 \cup X_2$, $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ und $R \subseteq (X_1 \times X_2)$ darstellen (Abb. 6). X_1 enthält die Punkte des ersten, X_2 die des zweiten Bildes und R die Zuordnungen. Als Bewertung der Kanten (Kosten) können die Quadratsummen der x- und y-Verbesserungen jeder Zuordnung nach der letzten Iteration der robusten Ausgleichung verwendet werden. Das Problem besteht darin, die richtigen Paare herauszufinden, so daß ein Punkt im ersten Bild nur einem Punkt im zweiten Bild zugeordnet ist und umgekehrt (keine doppeldeutigen Zuordnungen). In der Graphentheorie hat das Matching die Aufgabe, eine disjunkte Teilmenge M der Kanten ($M \subseteq R$) zu finden. Falls keine andere disjunkte Menge existiert, die M echt umfaßt, ist M das maximale Matching in G . Damit in M die besten Zuordnungen enthalten sind, wird gleichzeitig die Summe der Kosten der Kanten minimiert (maximales Matching mit minimalen Kosten). Da in der Photogrammetrie mit großer Redundanz gerechnet wird, ist es wichtiger, anstelle der maximalen Anzahl der Zuordnungen (mit insgesamt minimalen Kosten) die genauesten Zuordnungen herauszufinden. Deshalb wird die genaueste Zuordnung (mit dem kleinsten Punktfehler) gesucht. Eventuell vorhandene Zuordnungen, die mit dieser Zuordnung adjazent sind, werden als falsch eliminiert. Der Vorgang wird wiederholt, bis alle Zuordnungen als richtig oder falsch charakterisiert sind. Die so entstehende Kantenmenge (Zuordnungen) ist allgemein nicht mit dem maximalen Matching mit minimalen Kosten identisch, hat aber den Vorteil der Genauigkeit und Sicherheit.

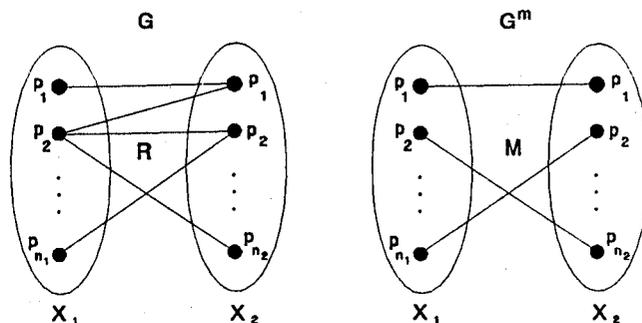


Abb. 6 : Zuordnung innerhalb von 2 Bildern

Während bei zwei überlappenden Bildern zwei zugeordnete Punkte ein Punktepaar bilden, muß bei n überlappenden Bildern definiert werden, was eine n -fache Zuordnung ist. Bei der manuellen Punktübertragung wird ein Punkt den übrigen $n-1$ Punkten durch die Übertragung zugeordnet. Ein Objektpunkt wird somit aus n homologen Bildpunkten und $n-1$ Zuordnungen definiert. Eine solche Betrachtung der mehrfachen Zuordnung ist unvollständig, weil bei n homologen Bildpunkten alle $n(n-1)/2$ paarweisen Zuordnungen vorhanden sein müssen. Unter diesem Gesichtspunkt wurden sowohl bei den vorläufigen Zuordnungen als auch bei dem geometrischen Modell der robusten Ausgleichung alle möglichen Bildpaarkombinationen berücksichtigt. Wenn man nun das Problem der Merkmalszuordnung innerhalb von n überlappenden Bildern auf die Graphentheorie übertragen will, erhält man einen n -partiten Graphen $G(X,R)$, der aus den markanten Bildpunkten der n Bilder mit allen entsprechenden Zuordnungen besteht (Abb. 7). Für den Graphen G gelten folgende Beziehungen:

$$(a) \quad X = \bigcup_{i=1}^n X_i \quad \text{mit} \quad X_i \cap X_j = \emptyset \quad \forall i \neq j \quad \text{und} \quad X_i = \{p_1^i, p_2^i, \dots, p_{s_i}^i\}$$

$$(b) \quad R = \bigcup R_{ij} \quad \text{mit} \quad R_{ij} \subseteq (X_i \times X_j) \quad \text{für} \quad i=1, \dots, n-1 \quad \text{und} \quad j=i+1, \dots, n$$

wobei

X_i : Menge der selektierten markanten Bildpunkte im Bild i

R_{ij} : Menge der nach der robusten Ausgleichung verbliebenden Zuordnungen zwischen den Bildern i und j

Da im Graphen G die sog. Cliquenzahl gleich der Anzahl der überlappenden Bilder ist, bilden n homologe Bildpunkte mit den zugehörigen Zuordnungen unter der oben gegebenen Definition für die mehrfache Merkmalszuordnung eine maximale

n-Clique (maximaler vollständiger Teilgraph mit *n* Knoten) $G^n(X^n, R^n)$. In Abb. 7 z.B. bilden die homologen Bildpunkte eines in 5 Bildern (1, 2, i, j, n) abgebildeten Objektpunktes eine 5-Clique, deren Kanten stark hervorgehoben sind. Die Aufgabe besteht nun darin, alle *n*-Tupel von Bildpunkten, die in *G* eine *n*-Clique bilden, zu finden und entsprechend zu numerieren. Da in *G* aber auch Kanten enthalten sind, die Fehlzuordnungen bedeuten, müssen wir diejenige *n*-Clique herausfinden, die das beste Zuordnungsergebnis liefert. Dafür muß die Summe der Kosten aller Kanten in G^n minimiert werden. Damit ist die Aufgabe, die genaueste mehrfache Zuordnung zu finden, identisch mit der Aufgabe, die maximale Clique mit den minimalen Kantenkosten zu finden. Die Knoten und Kanten von G^n müssen somit die Bedingungen des folgenden Optimierungsproblems erfüllen :

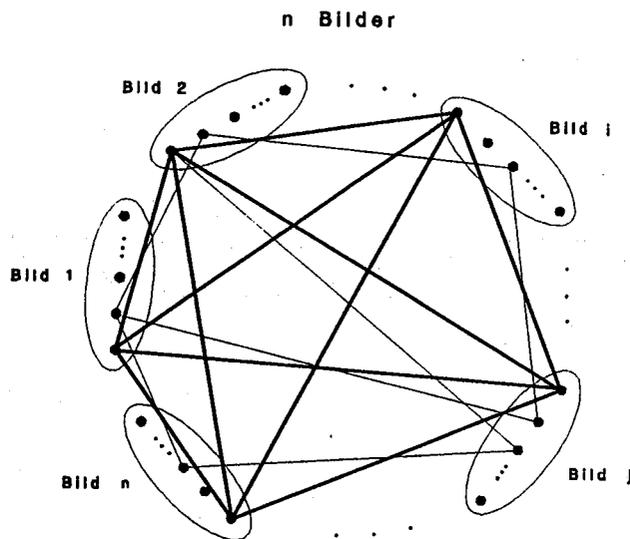


Abb. 7 : Zuordnung innerhalb von *n* Bildern

G^n enthält die beste mehrfache Zuordnung in *G*, wenn :

- (a) $|X^n| = n$ mit $|X^n \cap X_i| = 1$
- (b) $|R^n| = n(n-1)/2$ mit $|R^n \cap R_{ij}| = 1$
- (c) $\delta(p_i) = n-1 \quad \forall p_i \in X^n$ ($\delta(p_i)$: Grad von Knoten p_i)
- (d) $\sum_{r \in R^n} c_r \rightarrow \min$

Wenn eine *n*-Clique aufgefunden ist, die die Bedingungen der Gl. (8) erfüllt, werden die entsprechenden Knoten und Kanten sowie die Kanten, die den jeweiligen Knoten inzident sind, markiert und vom weiteren Suchen ausgeschlossen. Das Verfahren wird wiederholt, bis alle *n*-Cliquen in *G* aufgefunden sind. In der Praxis überlappen sich aber die Bilder oder die Bildausschnitte nicht vollständig, so daß es Gebiete mit niedriger Überlappung gibt, wo die Methode ebenfalls mehrfache Zuordnungen (Cliquen niedriger Ordnung) finden soll. Außerdem kann es vorkommen, daß ein Objektpunkt nicht in allen überlappenden Bildern abgebildet ist oder nicht als markanter Punkt extrahiert wurde, oder daß manche Zuordnungen mit den übrigen homologen Bildpunkten fehlen. Aus diesem Grund muß der Algorithmus ohne Neuformulierung des Problems iterativ auch alle Cliquen niedriger Ordnung, nämlich [*n*-1]- bis 2-Cliquen (Punktpaare), finden.

Das Problem der maximalen Clique mit minimalen Kantenkosten in einem *n*-partiten Graphen (Gl. (8)) kann zwar direkt als Optimierungsproblem in Sinne der linearen Programmierung formuliert werden, führt aber zu Restriktionen, die keine regelmäßige Struktur aufweisen. Dies bedeutet einerseits hohen Rechenaufwand für die Aufstellung der Restriktionen und läßt andererseits wenig Spielraum für eine optimale Anpassung des verwendeten Algorithmus. Im Gegensatz dazu ist es leicht und übersichtlich, das Problem der maximalen Clique mit den minimalen *Knoten*kosten zu formulieren [NOLTEMEIER 1975]. Eine Clique im Graphen *G* entspricht einer Menge von unabhängigen Knoten \bar{X}^0 ($\bar{G}^0(\bar{X}^0, \emptyset)$) im komplementären Graphen $\bar{G}(\bar{X}, \bar{R})$, der die gleichen Knoten wie *G* und diejenigen Kanten hat, die in *G* fehlen ($\bar{X} = X$. $\bar{R} = (X \& X) - R$). Wenn nun *q* die Anzahl der Knoten von *G* bzw. von \bar{G} und *m* die Anzahl der Kanten von *G* ist, dann ist in \bar{G} die Anzahl der Kanten $\bar{m} = |\bar{R}| = |X \& X| - |R| = q(q-1)/2 - m$. Damit ist das Problem, eine maximale *n*-Clique im Graphen *G* aufzufinden, äquivalent mit dem Auffinden einer maximalen Menge von unabhängigen Knoten in \bar{G} . Wenn jedem Knoten p_i mit den Kosten c_i eine binäre Variable x_i zugeordnet wird, bekommen wir das folgende

Optimierungsproblem für das Auffinden der *maximalen n-Clique mit minimalen Knotenkosten* in einem n-partiten Graphen :

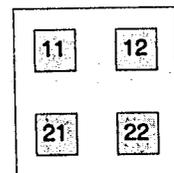
$$\begin{aligned}
 \text{Zielfunktion} &: \sum_{i=1}^q c_i \cdot x_i \Rightarrow \min \quad (x_i \in \{0,1\}) \\
 \text{Restriktionen} &: (a) \sum_{i=1}^q \bar{h}_{ij} \cdot x_i \leq 1 \quad \text{für } j=1, \dots, \bar{m} \\
 & (b) \sum_{i=1}^q x_i = n
 \end{aligned} \tag{9}$$

Die Restriktionen (a) in Gl. (9) gewährleisten, daß je zwei Knoten in \bar{G}^0 nicht adjazent sind. Dafür muß die Produktsumme der Variablen x_i mit den entsprechenden Elementen jeder Spalte der Inzidenzmatrix \bar{H} von \bar{G} kleiner oder gleich 1 sein. Somit besteht die Restriktionsmatrix des Optimierungsproblems aus der Transponierten der Inzidenzmatrix plus den zwei Restriktionen (b), die die Auswahl der maximalen unabhängigen Knotenmenge bzw. Clique gewährleisten. Für die mehrfache Zuordnung kann aber die Kantenbewertung (Genauigkeit der Zuordnungen) nicht ohne Informationsverlust auf die Knoten (Bildpunkte) übertragen werden und somit diese Methode nicht direkt angewendet werden. Aus diesem Grund wird ein neuer Graph $G'(X',R')$ mit den Kanten von G als Knoten konstruiert ($X'=R$). Damit entspricht die Minimierung der Kosten der Knoten in G' der Minimierung der Kosten der Kanten in G . Falls nun die in G' ausgewählten Knoten Kanten in G entsprechen, die eine maximale Clique bilden, dann hat diese Clique Kanten mit minimalen Kosten. Es müssen nun die Kanten des Graphen G' so definiert werden, daß eine u-Clique mit minimalen Knotenkosten in G' ($u=n(n-1)/2$) eine n-Clique mit minimalen Kantenkosten in G bestimmt. Dabei lassen sich zwei Kanten von G nur dann in G' durch eine Kante verbinden, wenn beide zu ein und derselben minimalen Lösung (3- oder 4-Clique) gehören. Dann kann das Optimierungsproblem der Gl. (9) auf dem komplementären Graphen \bar{G}' formuliert werden und mit jedem Algorithmus der binären Optimierung gelöst werden.

Als Basis für die Lösung des Optimierungsproblems wurde der Additive Algorithmus von Balas verwendet [BALAS 1965, NEUMANN 1975]. Da aber binäre Optimierungsprobleme von kombinatorischer Natur sind und damit der Rechenaufwand exponentiell mit der Anzahl der Variablen (Zuordnungen) steigt, wurde der Algorithmus auf die spezifischen Merkmale des Problems angepaßt, so daß der Rechenaufwand nur exponentiell mit der Anzahl der Bildpaare steigt. Eine deutliche zusätzliche Reduzierung des Rechenaufwands wird durch Unterteilung des Problems in kleinere Bereiche erreicht. Da durch die robuste Ausgleichung die grob falschen Zuordnungen (Kanten) eliminiert wurden, ist der Graph G nicht zusammenhängend, sondern besteht aus mehreren wiederum zusammenhängenden Komponenten. Man kann somit, ohne Einschränkung der Allgemeinheit der Methode, das Optimierungsproblem getrennt auf jeder Komponente formulieren und lösen. Dadurch bleibt der Rechenaufwand für eine mehrfache Zuordnung (Übertragung und Messung von n homologen Bildpunkten) bei gegebener Überlappung konstant und liegt nach rechnerischen Simulationen unter 1 sec bei bis zu 9-facher Überlappung (VAX 3500).

4.4 Beispiel

Die Methode der mehrfachen Merkmalszuordnung wird hier an einem Beispiel mit 4 überlappenden Bildausschnitten demonstriert (Abb. 8 bis 11). Die Markierung der mehrfachen Zuordnungen erfolgt in Abb. 10 nach der Matrix-Anordnung der Bildausschnitte (siehe Schema rechts) und zeigt, in welchen Bildausschnitten derselbe Objektpunkt 'gemessen' wurde (z.B. ist der Objektpunkt 12 im Bildausschnitt 11 und im Bildausschnitt 22 gemessen). In Abb. 11 ist die Liste der mehrfachen Zuordnungen (Verknüpfungen) zusammengestellt. In der zweiten Spalte steht die Punktnumerierung für die Bündelausgleichung. In der Spalte (VV) steht der mittlere Punktfehler in Pixel nach der letzten Iteration der robusten Ausgleichung. Unter (N) ist die Anzahl der Bilder, in denen der entsprechende Objektpunkt gemessen wurde, aufgeführt und unter (KOM) die Nummer der Komponente des Graphen, zu der die Bildpunkte gehören, angegeben.



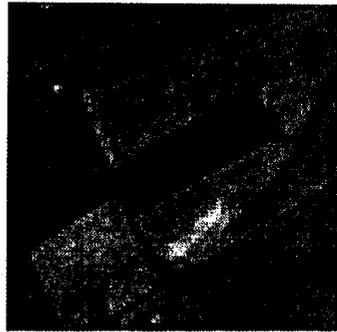


Bild 11



Bild 12

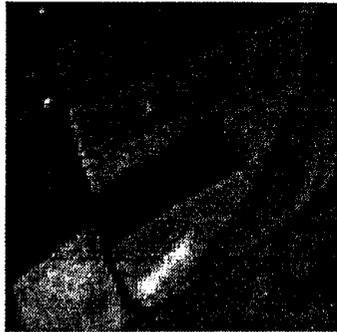


Bild 21



Bild 22

Abb. 8 : Homologe Bildausschnitte

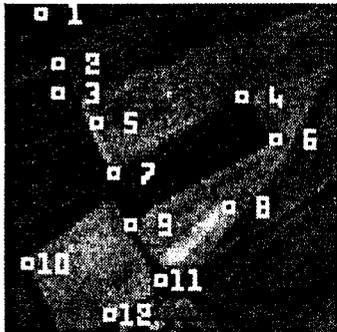


Bild 11

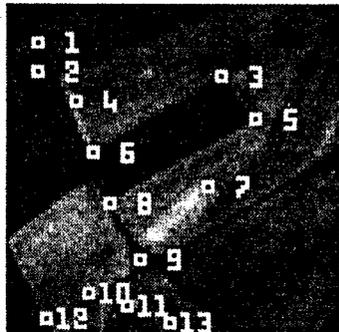


Bild 12

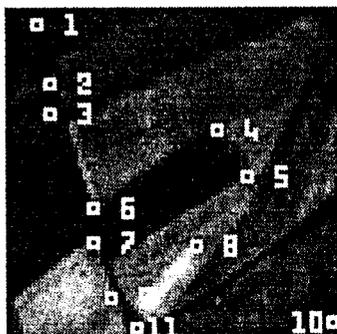


Bild 21

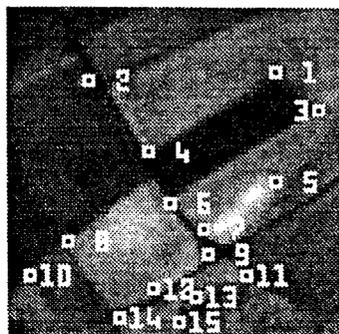


Bild 22

Abb. 9 : Durch den Interestoperator ausgewählte Bildpunkte

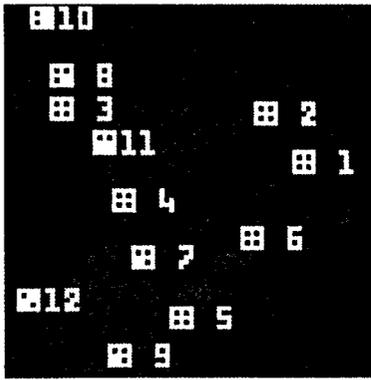


Bild 11

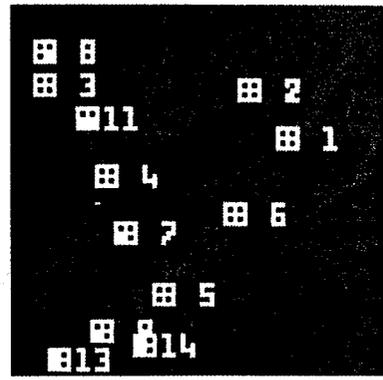


Bild 12

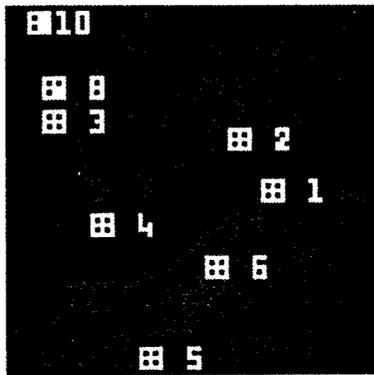


Bild 21

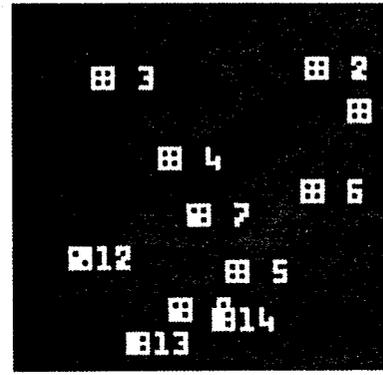


Bild 22

Abb. 10 : Überlappende Bildausschnitte mit mehrfachen Zuordnungen

UEBERLAPPENDE BILDER : 11 12 21 22

ZUGEORDNETE OBJEKTPUNKTE : 14
 GEMESSENE BILDPUNKTE : 43

i	NUMMER IM OBJEKTRAUM	NUMMER IM BILD				VV	N	KOM
		11	12	21	22			
1	10001	6	5	5	3	0.0	4	6
2	10002	4	3	4	1	0.1	4	4
3	10003	3	2	3	2	0.1	4	3
4	10004	7	6	6	4	0.2	4	7
5	10005	11	9	11	9	0.3	4	11
6	10006	8	7	8	5	1.2	4	8
7	10007	9	8	-	6	0.1	3	9
8	10008	2	1	2	-	0.1	3	2
9	10009	12	10	-	12	0.4	3	7
10	10010	1	-	1	-	0.0	2	1
11	10011	5	4	-	-	0.0	2	5
12	10012	10	-	-	8	0.2	2	10
13	10013	-	12	-	14	0.9	2	13
14	10014	-	11	-	13	1.0	2	12
Punkte/Bild :		12	12	8	11			

Abb. 11 : Liste der mehrfachen Zuordnungen

5. Ergebnisse einer experimentellen Anwendung des Verfahrens

Das geschilderte Verfahren der automatischen Punktübertragung und Punktmessung wurde anhand eines Testgebiets empirisch überprüft. Da zunächst kein Block aus digitalen Luftbildern zur Verfügung stand, wurde ein künstliches Geländemodell von etwa 70cm x 70cm Ausdehnung als Objekt verwendet, von dem digitale Bilder aufgenommen wurden. Mit der Kamera wurde ein 'Flug' über das Modell simuliert, so daß die Bilder einen regelmäßigen Block mit 5 Streifen zu je 5 Bildern mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung bilden. Die Kamera war mit einem CCD-Matrixsensor mit 512x512 Pixel ausgerüstet. Als Objektiv wurde ein Weitwinkel-Objektiv (Nikkor f=28mm) benutzt. Da die Oberfläche des Modells aus Naturholz war und keine besondere Textur hatte, wurden kleine Linien eingezeichnet und signalisierte Punkte aufgeklebt. Die signalisierten Punkte waren schwarze Scheiben mit einem Durchmesser von 1mm auf weißem Hintergrund. Die Objektkoordinaten der für die Bündelausgleichung erforderlichen Paßpunkte sowie der für die Untersuchungen benötigten Kontrollpunkte wurden unabhängig mittels Nahbereichsphotogrammetrie bestimmt. Dafür wurde eine Mittelformat (6cm x 6cm) Rolleimetrik-Kamera verwendet. Im Endergebnis wurden die Objektkoordinaten der Paß- und Kontrollpunkte mit einer Lagegenauigkeit von 0.1 mm und einer Höhegenauigkeit von 0.2 mm bestimmt. Aus dem oben genannten Block mit 60% Querüberdeckung wurde durch Weglassen der Streifen 2 und 4 ein zweiter Block mit 20% Querüberdeckung gebildet (3 Streifen x 5 Bilder). Für beide Blöcke wurde nach der automatischen Punktübertragung und -messung mit dem Programm PAT-B die Bündelblockausgleichung durchgeführt.

Die signalisierten Kontrollpunkte wurden anhand von Papier-Bildern oder am Bildschirm manuell identifiziert. Obwohl der Förstner-Interestoperator nicht für die Punktidentifizierung konzipiert ist, wurden die signalisierten Punkte fast ohne Ausnahme als markante Punkte automatisch extrahiert. Die subpixelgenauen Koordinaten wurden als Näherungswerte für eine Kleinste-Quadrate-Korrelation mit einem Musterbild verwendet, um die Paßpunktmessung in den Bildern möglichst genau zu erhalten. Die Ergebnisse der zwei Verfahren sind in der Abb. 12 dargestellt. Die weißen Kreuze stellen die vom Interestoperator ermittelte Position des markanten Punktes dar, und die Kreuze mit der schwarzen Mitte bezeichnen die durch die Kleinste-Quadrate-Korrelation berechnete genauere Position. Unten und rechts von jedem Bildausschnitt sind die von Interestoperator ermittelten Koordinaten des markanten Punktes sowie die Differenzen zu der mit der Kleinsten-Quadrate-Korrelation berechneten Position angegeben (Angaben in Pixel). Von den mit der Nahbereichsphotogrammetrie bestimmten signalisierten Objektpunkten wurden 9 als Lage- und 14 als Höhenpaßpunkte benutzt. Die übrigen signalisierten Punkte (23 Lage- und 14 Höhenkontrollpunkte) dienen als Kontrollpunkte (Gewicht=0) für die Genauigkeitsuntersuchungen. Da die Bilder mit einem gewöhnlichen Objektiv für Spiegelreflexkameras aufgenommen wurden und keine Kalibrierung stattgefunden hat, wurde zur Erfassung der systematischen Fehler vorab eine Bündelausgleichung mit zusätzlichen Parametern durchgeführt. Dadurch konnte der systematische Teil der Bildkoordinatenfehler ermittelt und von den Beobachtungen abgezogen werden. Mit den so für systematische Fehler korrigierten Bildkoordinaten wurde die eigentliche Bündelausgleichung durchgeführt. Die Daten beider Blöcke sind in der Tabelle (Abb. 13) zusammengefaßt. Eine graphische Darstellung

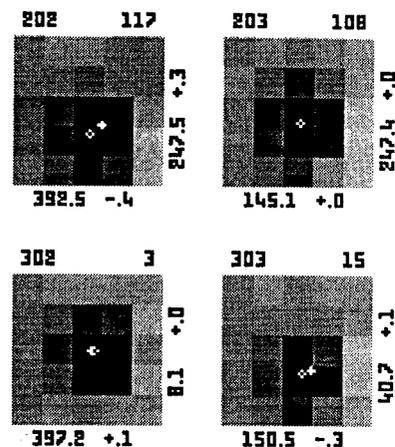


Abb. 12 : Punktidentifizierung mit dem Interestoperator und der LSM

	BLOCK mit q=60%	BLOCK mit q=20%
Streifen	5	3
Bilder	25	15
Lagepaßpunkte	9	9
Höhenpaßpunkte	14	14
Verknüpfungspunkte		
im Bild	2949	1495
im Gelände	1060	615
σ_0 (in Pixel)	0.294	0.279

Abb. 13 : Blockdaten

m6sb 60 %
 13. 5. 1991 10:38:30

$\pi = 1:3500$

$\begin{matrix} y \\ L \\ x \end{matrix}$

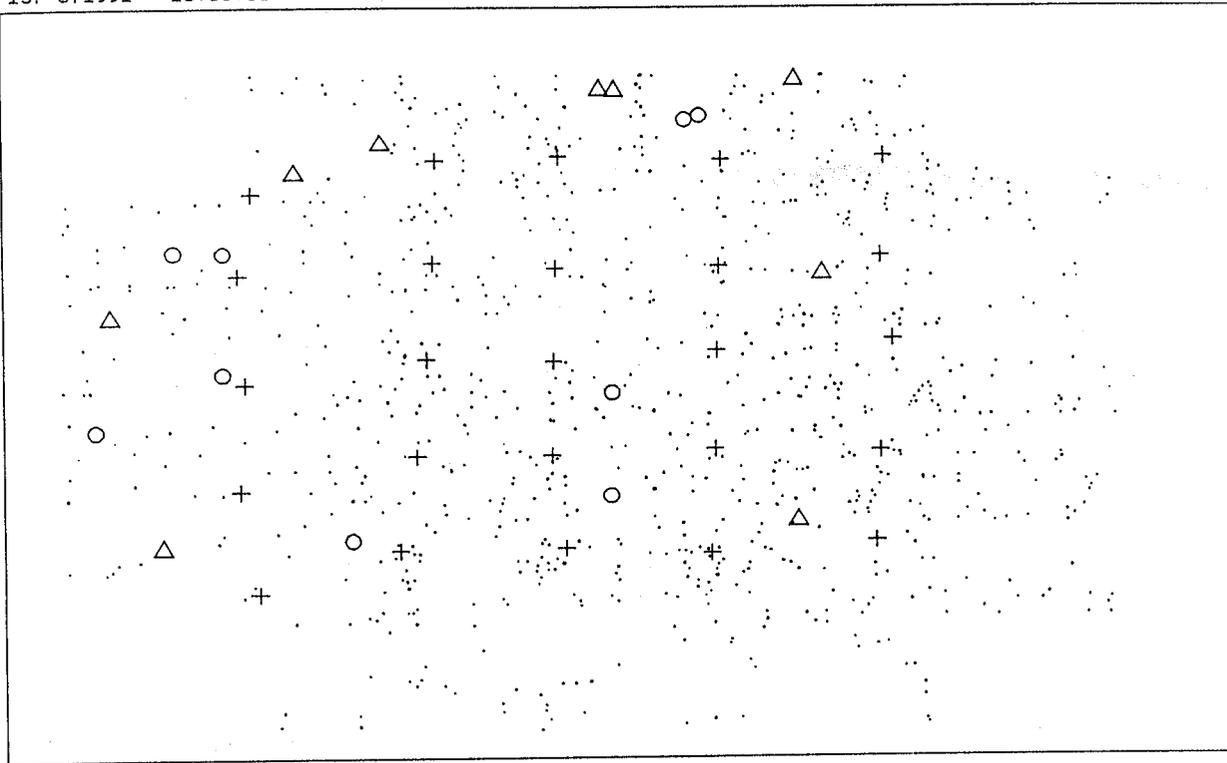


Abb. 14 : Projektionszentren (+), Vollpaßpunkte (Δ), Höhenpaßpunkte (○) und Verknüpfungspunkte (·) des Bildverbandes (q=60%)

der Projektionszentren (+), der Vollpaßpunkte (Δ), der Höhenpaßpunkte (○) und der Verknüpfungspunkte (·) zeigt die Abb. 14 für den Block mit 60% Querüberdeckung. Wie man sieht, sind die Verknüpfungspunkte zufällig über den ganzen Block verteilt. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte wurde durch einen Schwellwert von 1 Pixel für den quadratischen Mittelwert des Zuordnungsfehlers begrenzt.

Die Genauigkeit der automatischen Punktübertragung und -messung wird hauptsächlich durch das σ_0 der Bündelausgleichung ausgedrückt. Die absolute Genauigkeit des berechneten Blocks wird durch die Differenzen zwischen den in der Ausgleichung berechneten und den bekannten Geländekoordinaten der Kontrollpunkte, die als wahre Fehler betrachtet werden, und durch den quadratischen Mittelwert μ dieser Differenzen beschrieben. Die Genauigkeitsergebnisse der Bündelausgleichung sind in Abb. 15 dargestellt. Die Lagegenauigkeit ($\mu_{x,y} \approx 0.1 \text{ mm} \approx 0.2 \text{ Pixel}$) entspricht etwa der Erwartung bei einem derartigen Block ($\mu_{x,y} < \sigma_0$). Der Grund für die niedrige Höhengenaugigkeit liegt an dem Basis/Höhen-Verhältnis. Das Bildformat von 512 Pixel und die Kammerkonstante von 1223 Pixel ergibt ein Basis/Höhen-Verhältnis von 0.17. Eine solcher Wert wird in der Praxis mit echten Luftbildern nur bei Aufnahmen mit Teleobjektiven (60cm) erreicht. Die übliche Basis/Höhen-Verhältnis liegt dagegen üblicherweise für Weitwinkel-Aufnahmen bei 0.6 und für Normalwinkel- Aufnahmen bei 0.3. Bei Anwendung des Verfahrens auf echte Luftbilder wäre somit eine deutliche Steigerung der Höhengenaugigkeit zu erwarten.

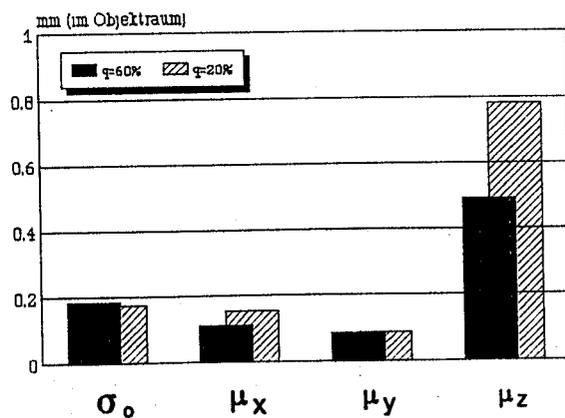


Abb. 15 : Genauigkeitsangaben für die ausgeglichenen Blöcke

Der Wert von σ_0 liegt nach Abb. 13 in beiden Fällen unter 0.3 Pixel. Bei $15 \mu\text{m}$ Pixelgröße würde das im Falle von Luftbildern $\sigma_0 < 5 \mu\text{m}$ bedeuten. Damit würde die Genauigkeit der Zuordnung bei $\sigma_{\text{zuord}} \approx 3.5 \mu\text{m}$ bzw. 0.23 Pixel liegen. Diesem Wert entspricht die theoretische Genauigkeit des Interestsoperators (1/4 Pixel) und damit die für das Verfahren der mehrfachen Zuordnung zu erwartende Genauigkeit. Das vorgestellte Verfahren ist also auch ohne eine nachträgliche Kleinste-Quadrate-Korrelation in der Lage, genauere Ergebnisse als der Standardfall der konventionellen Aerotriangulation mit manueller Punktübertragung zu liefern. Weiterhin ist zu erwarten, daß die Genauigkeit des Verfahrens mit echten digitalisierten Luftbildern noch höher sein wird. Sowohl die Qualität der Luftbilder als auch die genauere Kalibrierung der Kammer sprechen dafür.

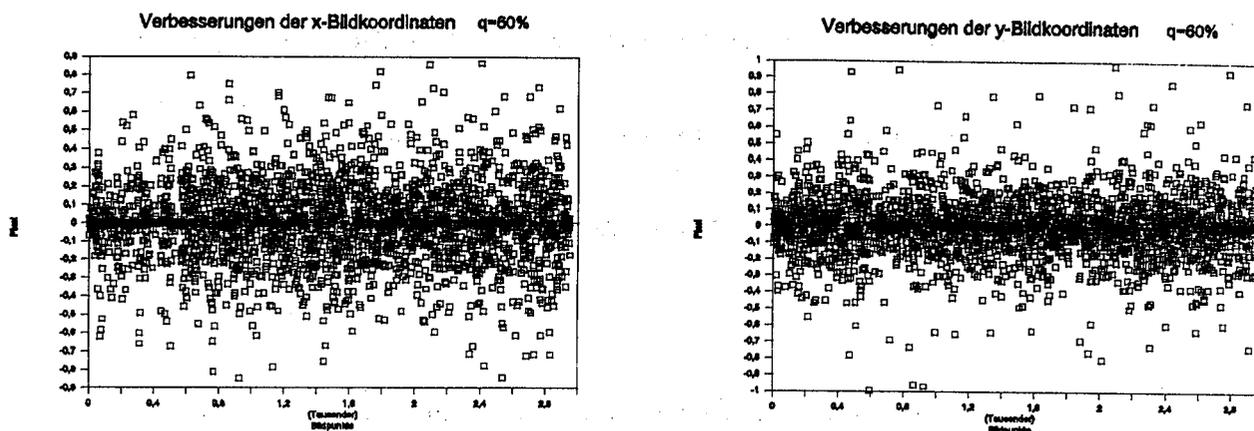


Abb. 16 : Verbesserungen der Bildkoordinaten bei 60% Querüberdeckung

Als weiteres Ergebnis ist die empirisch festgestellte Zuverlässigkeit des Verfahrens von Interesse. Von den 2949 gemessenen Bildpunkten des Blocks mit 60% Querüberdeckung wurde kein einziger bei der Blockausgleichung als grob falsch identifiziert. Die Verbesserungen der Bildkoordinaten lagen alle, wie Abb. 16 zeigt, unter 1 Pixel, was mit dem eingeführten Schwellwert für den Zuordnungsfehler übereinstimmt. Man kann jedoch, wenn eine große Anzahl von Zuordnungen vorhanden ist, durch niedrigere Schwellwerte nur die sehr genauen Zuordnungen als Verknüpfungspunkte benutzen und damit genauere Ergebnisse erzielen.

Die gesamte Rechenzeit für den 5x5 Block (q=60%) belief sich auf etwa 6 Stunden (VAX 3500). Der Rechenaufwand betrug etwa 15 sec pro gemessenem Bildpunkt. Das vorgestellte Beispiel entspricht der Anwendung des Verfahrens auf der obersten Ebene der Bildpyramide bei der Aerotriangulation mit echten Luftbildern. Somit läßt sich der gesamte Rechenaufwand auf den Fall von Luftbildern hochrechnen. Wenn man von der minimalen Anzahl der von Ebene zu Ebene übertragenen Punkte ausgeht, nämlich 9 Punkte pro Bild an den Standardstellen, würden für den Prozeß der automatischen Punktübertragung und -messung um die 15 Stunden Rechenzeit benötigt. Dabei ist festzuhalten, daß das Rechenprogramm noch nicht sonderlich optimiert ist und sich die Angaben auf die VAX 3500 beziehen. Man kann somit anhand der bei dem Experiment erreichten Genauigkeit und des benötigten Rechenaufwands als vorläufiges Ergebnis feststellen, daß das vorgestellte Verfahren eine aussichtsreiche Lösung für die Automatisierung der Punktübertragung und der Aerotriangulation darstellt.

Literaturverzeichnis

Ackermann F., Schneider W. : "High Precision Aerial Triangulation with Point Transfer by Digital Image Correlation". Int. Arch. of Photogrammetry, Vol. 26-3, Rovaniemi 1986

Balas E. : "An Additive Algorithm for Solving Linear Programs with Zero-One Variables". Oper. Research, Vol. 13, 1965

- Förstner W. : "A Feature based Correspondence Algorithm for Image Matching". Int. Arch. of Photogrammetry, Vol. 26-3, Rovaniemi 1986
- Förstner W. : "Wissensgestützte Aerotriangulation". Festschrift Friedrich Ackermann, IPS, Heft 14, Stuttgart 1989
- Neumann K. : "Operations Research Verfahren". Hanser Verlag, 1975
- Noltemeier H. : "Graphentheorie mit Algorithmen und Anwendungen". Walter de Gruyter Verlag, 1976
- Pertl A. : "Empirical Results of Automatic Parallax Measurement". 40. Photogrammetrische Woche, Stuttgart 1985
- Sarjakoski T. : "Potential of Expert-System Technology for Aerial Triangulation". Int. Arch. of Photogrammetry, Vol. 26-3, Rovaniemi 1986
- Schmid H. : " Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie".
BUL Nr. 4 (1958), BUL Nr.1 (1959)
- Schwidefsky K., Ackermann F. : "Photogrammetrie". Teubner Verlag, 1976

Zusammenfassung

Die Punktübertragung und -messung ist die arbeitsintensivste und zeitraubendste Phase der Aerotriangulation und beeinflusst erheblich die Genauigkeit der Endergebnisse. Hier wird ein Verfahren für die Automatisierung dieses Prozesses vorgestellt. Dabei wurde ein Algorithmus für die mehrfache Bildzuordnung entwickelt, der sich auf etablierte Methoden der digitalen Bildverarbeitung, der Graphentheorie und der ganzzahligen Programmierung stützt. Damit werden homologe Bildpunkte in mehreren überlappenden Bildern einander zugeordnet, die als Verknüpfungspunkte in der Aerotriangulation verwendet werden. Erste Ergebnisse einer experimentellen Anwendung des Verfahrens werden vorgestellt.

Abstract

Automatic Aerial Triangulation

The point transfer and point measurement of points are the most cumbersome tasks of aerial triangulation and limit the precision of final results. This paper gives a short review of a method for automation of this process. Based on well-established techniques of image processing a multiple matching algorithm was developed, which employs methods of Graph Theory and Integer Programming. With it homologous points in several overlapping photographs are determined. These points can be used as tie points for the aerial triangulation. First performance results of the method are presented.

Dipl.-Ing. V. Tsingas
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
D-7000 Stuttgart 1