

- [13] MAKAROVIC, B.: Progressive Sampling for Digital Terrain Models: ITC Journal 1973, S. 397–416
- [14] REINHARDT, W.: Optical Superimposition as Tool for DEM Quality Control. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 26, Part 4, S. 207–215, Edinburgh, 1986
- [15] RÜDENAUER, H.: Analytische Plotterprogramme zur objektiven on-line Punktdichtenbestimmung in digitalen Höhenmodellen. – International Archives of Photogrammetry, Volume 22, Part 11, S. 74–83, Hamburg, 1980
- [16] STEIDLER, F., BÜHLER, W., DUPONT, C., LADSTÄTTER, P., WYATT, A.: Interactive DTM Updating of a Digital Terrain Model. – Proceedings of the ISPRS WG III/3 on 'Progress in terrain modelling', Lyngby, 1987, (in Druck)
- [17] TEMPFLI, K.: Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. – Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der Technischen Universität Wien, Heft 22
- [18] TORLEGARD, K., ÖSTMAN, A., LINDGREN, R.: A Comparative Test of Photogrammetrically Sampled Digital Elevation Models. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 25, Part A3b, pp. 74–83, Rio de Janeiro, 1984
- [19] UFFENKAMP, D.: Improvement of Digital Mapping with Graphics Image Superimposition. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 26, Part 3.2, pp. 1065–1082. Rovaniemi, 1986.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. GABRIELE DÜSEDAU, Dipl.-Ing. WOLFGANG REINHARDT: Lehrstuhl für Photogrammetrie, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 8000 München 2

Dr.-Ing. RAINER HÖSSLER: Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. H. EBNER, Dr.-Ing. R. HÖSSLER, Türkenstr. 11, 8000 München 2

Dipl.-Math. ROLF THIEMANN: Industriebauanlagen-Betriebsgesellschaft, Einsteinstr. 20, 8012 Ottobrunn

Eingang des Manuskripts: 4. 7. 1987

Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie

VON HEINRICH EBNER und DIETER FRITSCH, München, WOLFHART GILLESSEN, Ottobrunn, CHRISTIAN HEIPKE, München und Ottobrunn

Zusammenfassung

Für die Objektrekonstruktion aus digitalen Meßbildern wird ein neues Verfahren vorgestellt. Basierend auf der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden die vorliegenden Informationen (die Grauwerte der Bildelemente und die Koordinaten der Paßpunkte) direkt mit den gesuchten Größen (den geometrischen und radiometrischen Parametern zur Objektrekonstruktion und den Orientierungsparametern der Meßbilder) verbunden. Dabei können beliebig viele und in mehreren Spektralbereichen abgetastete digitale Bilder simultan verarbeitet werden. Anhand eines ersten Beispiels werden die Möglichkeiten des Ansatzes aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit Bemerkungen zum möglichen praktischen Einsatz und mit einer Zusammenfassung der Eigenschaften der Methode.

Integration of Image Matching and Object Reconstruction within Digital Photogrammetry

For the object reconstruction from digital images a new approach is presented. Based on the least squares image matching the given information (the pixel greyvalues and the coordinates of the control points) are directly connected to the unknown quantities (the geometric and radiometric parameters for the object reconstruction and the orientation parameters of the images). Any desired number of images, scanned in various spectral canals, can be processed simultaneously. A first example demonstrates the possibilities of this method. The article closes with some remarks on possible practical applications and a summary of the properties of the method.

Intégration de la Corrélation numérique et la Reconstruction des Objets dans la Photogrammétrie Digitale

Pour la reconstruction des objets des images digitales une méthode nouvelle est présentée. Basé sur la corrélation numérique selon la méthode des moindres carrés les informations données (les densités optiques des éléments des images et les coordonnées des points de contrôle) sont combinées directement avec les quantités inconnues (les paramètres géométriques et radiométriques pour la reconstruction des objets et les paramètres de l'orientation des images). Tout nombre désiré des images balayées dans des canaux divers peut être utilisé simultanément. Un premier exemple montre les possibilités de cette méthode. L'article se termine avec quelques remarques sur des applications possibles en pratique et un résumé des qualités de la méthode.

Vorbemerkung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen der vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie durchgeführt. Die Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Photogrammetrie der Technischen Universität München und der Abteilung für Geländedatenverarbeitung der Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) zum Thema „Digitale Photogrammetrie“ kam zustande, da folgende Voraussetzungen erfüllt waren:

aus Sicht der Universität

- langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der analytischen Photogrammetrie,
- vorhandene Programmsysteme für Punktbestimmung und digitale Geländemodelle,
- Interesse an der konsequenten Entwicklung der digitalen Photogrammetrie,
- Bereitschaft zur praxisorientierten Forschung;

aus Sicht der Industrie

- Bedarf nach modernen, nicht personalintensiven Höhenerfassungsmethoden aus aktuellen Bilddaten,
- vorhandene Superrechnerkapazität (Vektorrechner mit 64-MB-Hauptspeicher und bis zu 540 Millionen Operationen pro Sekunde) für FORTRAN-Programmierung,
- vorhandene Programme zur Bearbeitung großer Rasterdatenbestände,
- zwölf Jahre Bildverarbeitungserfahrung aus Projekten.

1. Einleitung

Die digitale Verarbeitung von Meßbildern ist mittlerweile in der Photogrammetrie eine interessante Alternative, die es weiter auszubauen gilt. Zwei Teilgebiete beschäftigen sich mit der Ableitung von Oberflächenmodellen aus digitalen Bilddaten oder digitalisierten Meßbildern und mit digitaler Punktbestimmung. Voraussetzung dafür ist die „digitale Bildzuordnung“, d. h. die Identifizierung identischer Punkte in verschiedenen Bildern und die Koordinatenmessung in Bildelement- oder Pixeleinheiten.

Als Zielfunktion für die digitale Bildzuordnung wurden bisher vor allem untersucht:

- die Maximierung des Korrelationskoeffizienten und
- die Minimierung der Quadratsumme von Grauwertdifferenzen.

Bei der ersten Möglichkeit wird eine Mustermatrix aus Bildelementen des ersten Bildes Pixel für Pixel über eine größere Suchmatrix aus Bildelementen des zweiten Bildes geschoben. In jeder Position wird der Korrelationskoeffizient über alle gemeinsamen Bildelemente beider Matrizen berechnet. Der maximale Wert entspricht der besten Lageübereinstimmung zwischen Muster- und Suchmatrix. Diese Methode wurde u. a. in [2] für die Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen eingesetzt und wird heute z. B. in [10] benutzt.

EHLERS [4] stellt weitere Untersuchungen an, vergleicht die Methode mit früheren Arbeiten (z. B. mit [7]) und stellt den Zusammenhang zur zweiten Methode her.

Diese wurde von ACKERMANN, FÖRSTNER und PERTL ([1], [5], [6], [11]) in die Photogrammetrie eingeführt. Dabei wird eine (einige $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ große) Mustermatrix z. B. affin auf die Suchmatrix abgebildet. Die unbekanntenen Transformationsparameter werden bestimmt, indem die

Quadratsumme der Differenzen der Grauwerte aller zugeordneten Pixel in einer Ausgleichung minimiert wird. Insofern ist der öfter benutzte Begriff „Bildkorrelation“ hier irreführend, besser sind die Bezeichnungen „digitale Bildzuordnung“ bzw. „digitale Bildkorrespondenz“.

GRÜN [8] und GRÜN/BALTSAVIAS [9] erweitern den Ansatz durch die Einbeziehung von geometrischen Bedingungen. Z. B. kann die Schnittbedingung der homologen Strahlen zu einem Objektpunkt mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen berücksichtigt werden. Ebenso wird ein Konzept zur gemeinsamen Verarbeitung mehrerer Bilder vorgestellt und die simultane Bestimmung vieler Objektpunkte angesprochen.

ROSENHOLM [12] erweitert das Zuordnungsgebiet, indem er mehrere Muster- und Suchmatrizen zu einem Raster zusammenfaßt. Statt einer Affintransformation setzt er in den Rasterpunkten des Suchbildes unbekannte Verschiebungen (Parallaxen) an, die simultan bestimmt werden. Er verbleibt bei seiner Variante zwar im Bildraum, führt die Schnittbedingungen der homologen Strahlen jedoch durch den Übergang in die Epipolareometrie ein.

Der vorliegende Beitrag basiert ebenfalls auf der zweiten Methode. Er verknüpft die vorliegenden Informationen (die Grauwerte der Bildelemente und die Koordinaten der Paßpunkte) direkt mit den gesuchten Größen (den geometrischen und radiometrischen Parametern zur Objektrekonstruktion und den Orientierungsparametern der Meßbilder). Dabei können beliebig viele und in mehreren Spektralbereichen abgetastete digitale Meßbilder simultan verarbeitet werden.

Eine ähnliche Verallgemeinerung der bisherigen Bildzuordnungsansätze wurde von WROBEL kürzlich in dieser Zeitschrift publiziert, [13], [14]. Beide Methoden sind unabhängig voneinander entwickelt worden.

2. Beschreibung des Ansatzes

Dem vorgestellten Ansatz liegen die folgenden Überlegungen zugrunde:

- Die Oberfläche eines Objektes soll durch ein geometrisches Modell $z(x,y)$ und ein radiometrisches oder Grauwert-Modell $g(x,y)$ beschrieben werden. Die geometrische Modellierung erfolgt durch einfache, untereinander verknüpfte Flächenelemente. Für die radiometrische Beschreibung werden Oberflächenelemente definiert, die in x,y ein Quadratraster bilden und in der Größe etwa den Bildelementen entsprechen. Geometrisch werden die Oberflächen- und die Bildelemente durch ihre jeweiligen Mittelpunkte beschrieben. Jedem dieser Oberflächenelemente wird ein Grauwert zugewiesen.
- Die Parameter des geometrischen Modells, die Grauwerte der Oberflächenelemente und die Orientierungsparameter der Meßbilder werden als Unbekannte angesetzt und aus den Grauwerten der Bildelemente sowie vorliegender Paßinformation bestimmt.
- Viele Bilder und mehrere Spektralbereiche (Kanäle) pro Bild werden simultan verarbeitet, wobei jedes Oberflächenelement einen Grauwert pro Spektralbereich zugewiesen erhält.

Bei der folgenden Beschreibung des Ansatzes wird der Einfachheit halber von einem geometrischen Oberflächenmodell aus bilinearen, in x,y quadratischen Flächenelementen ausgegangen, wie es z. B. bei der Höheninterpolation mit finiten Elementen in [3] Verwendung findet. Jede so gebildete Rastermasche soll aus $n \times n$ Oberflächenelementen bestehen (s. Abbildung 1), deren Höhen als lineare Funktionen der z -Koordinaten der vier benachbarten Rasterpunkte dargestellt werden können.

Aus den Koordinaten x,y,z der Mittelpunkte der Oberflächenelemente und den Orientierungsparametern des betreffenden Bildes ergeben sich die Bildkoordinaten x_B, y_B und über eine ebene Transformation schließlich die Koordinaten x_A, y_A im Bildabtastsystem (s. Abbildungen 2 und 3).

Zur Vereinfachung wird vorerst nur von einer Rastermasche ausgegangen. Die vier Rasterhöhen sowie die Orientierungsparameter werden zunächst als bekannt vorausgesetzt. Grauwerte sollen einstweilen nur für einen Spektralbereich vorliegen.

Für die Mittelpunkte aller $n \times n$ Oberflächenelemente der gesamten Masche können nun

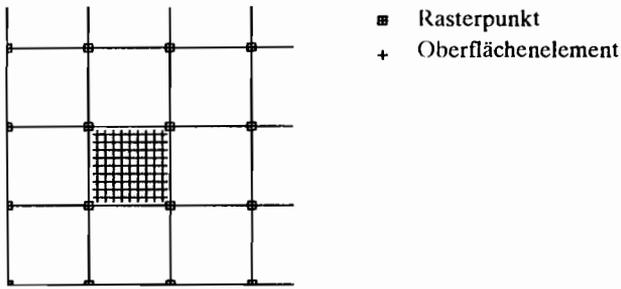


Abb. 1 Rasterpunkte des geometrischen Modells und Oberflächenelemente des Grauwert-Modells

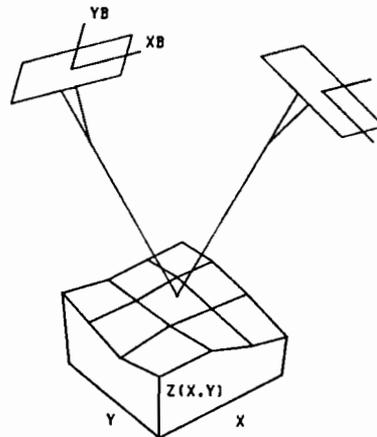


Abb. 2 Zusammenhang zwischen Objekt- und Bildkoordinatensystem

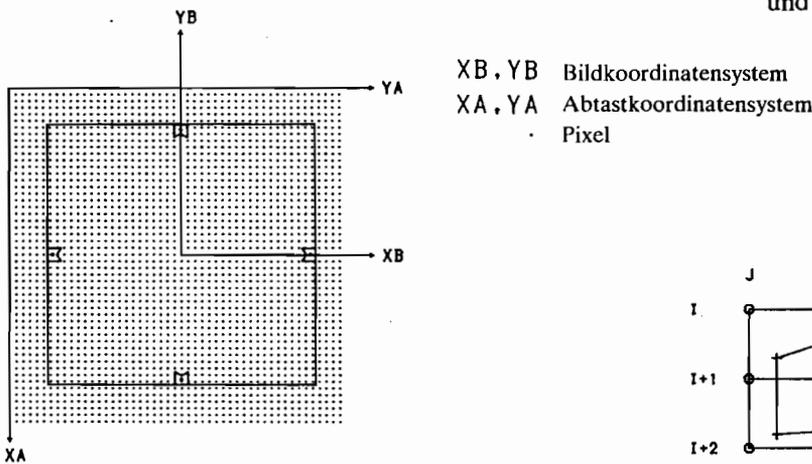


Abb. 4 Zuweisung der Grauwerte an die Bilder der Oberflächenelemente

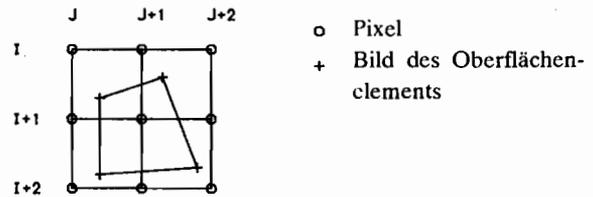


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Bild- und Abtastkoordinatensystem

Koordinaten x_A, y_A berechnet werden. Die zugehörigen Grauwerte ergeben sich jeweils durch bilineare Interpolation aus den vier benachbarten Bildgrauwerten (s. Abbildung 4). Sie werden in der folgenden Ausgleichung als Beobachtungen behandelt. Im Idealfall sind die einem Oberflächenelement entsprechenden Grauwert-Beobachtungen in verschiedenen Bildern gleich groß.

Die Annahme, die vier Rasterhöhen seien bekannt, wird jetzt fallengelassen. Dies entspricht den tatsächlichen Gegebenheiten, denn sie beschreiben die Objektoberfläche und sollen bestimmt werden. Statt dessen stehen Näherungswerte $z_0(x,y)$ in den Rasterpunkten zur Verfügung. Die einander entsprechenden Grauwert-Beobachtungen sind dann nicht mehr gleich groß. Ändert man die Näherungswerte $z_0(x,y)$, so ändern sich die Koordinaten x_A, y_A der Oberflächenelemente im Abtastsystem und damit die Beobachtungen. Die Abweichungen zwischen den entsprechenden Beobachtungen und dem unbekanntem Objektgrauwert $\hat{g}(x,y)$ werden als Verbesserungen betrachtet. Sie sind um so kleiner, je weniger sich die $z_0(x,y)$ von den $z(x,y)$ unterscheiden. Die Quadratsumme der Verbesserungen wird in einer Ausgleichung, in der die vier Rasterhöhen und die Objektgrauwerte als Unbekannte auftreten, minimiert.

In analoger Weise können auch die Orientierungsparameter der betreffenden Bilder als Unbekannte behandelt sowie mehrere Kanäle und mehrere Maschen gleichzeitig verarbeitet werden. Pro Oberflächenelement und pro Kanal fällt ein unbekannter Grauwert, $\hat{g}(x,y)$ pro Objektrasterpunkt ein unbekannter Wert $\hat{z}(x,y)$ an. Da von vornherein keine Beschränkung in der Anzahl der

Bilder besteht, können beliebig viele Bilder, auch ein ganzer Blockverband simultan bearbeitet werden. Durch die Einbeziehung der Objektgeometrie und die Einführung der Objektgrauwerte entfällt die Notwendigkeit, zwischen Muster- und Suchmatrix zu unterscheiden. Vielmehr werden alle Bilder gleichberechtigt behandelt.

Die Aufgabe der digitalen Punktbestimmung kann gelöst werden, indem für jeden Objektpunkt nur eine Rastermasche angemessener Größe mit vier Werten $\hat{z}(x,y)$ definiert wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Oberfläche in der Umgebung des Punktes nur durch drei Parameter zu beschreiben, d. h. anstelle der Bilinearmasche eine Ebene einzuführen. Diese drei Parameter können z. B. der Wert $\hat{z}(x,y)$ sowie die beiden Neigungen $\delta\hat{z}/\delta x$ und $\delta\hat{z}/\delta y$ an einer fest vorgegebenen Position x,y sein. Als Unbekannte treten dann jeweils die drei bzw. vier geometrischen Parameter zur lokalen Beschreibung der Oberfläche, die Objektgrauwerte und die Orientierungsparameter der beteiligten Bilder auf. Nach der Ausgleichung legen x,y und $\hat{z}(x,y)$ die Lage eines Verknüpfungspunktes fest. Die Koordinaten eines signalisierten Punktes ergeben sich aus der Lage des Signals im ausgeglichenen radiometrischen Oberflächenmodell, die durch eine Analyse der Objektgrauwerte bestimmt werden kann.

Radiometrische Unterschiede zwischen den Bildern werden i. a. durch zwei Korrekturen (Additionskonstante und Maßstab) berücksichtigt. Sie können vor der eigentlichen Ausgleichung oder simultan mit den anderen Unbekannten bestimmt werden. Im ersten Bild sind sie frei wählbar, in allen anderen unbekannt. Der Gültigkeitsbereich dieser beiden Korrekturen erstreckt sich über eine bestimmte Anzahl von Pixeln.

3. Funktionales und stochastisches Modell

Für jeden einem bestimmten Kanal und Oberflächenelement zugeordneten und auf das Abtastsystem bezogenen Grauwert g_A jedes Bildes wird eine Verbesserungsgleichung formuliert:

$$\hat{v}_A = \hat{g} - g_A(\hat{z}, \hat{r}, \hat{p}) \quad (1)$$

\hat{v}_A	Verbesserung
\hat{g}	Grauwert des Oberflächenelements, unbekannt
$g_A(\hat{z}, \hat{r}, \hat{p})$	Beobachtung
\hat{z}	Vektor der Rasterhöhen, unbekannt
\hat{r}	Vektor der radiometrischen Korrekturen, unbekannt
\hat{p}	Parametervektor der Bildorientierungen, unbekannt

Zur Bestimmung der radiometrischen Korrekturen und der Orientierungsparameter gibt es grundsätzlich 2 Möglichkeiten: sie können entweder vorher ermittelt und dann festgehalten oder simultan mit den anderen Unbekannten berechnet werden. Um die Ableitungen auf das Wesentliche zu beschränken, werden hier nur die Grauwerte der Oberflächenelemente und die Rasterhöhen als Unbekannte angesetzt.

Damit vereinfacht sich Gleichung (1) zu

$$\hat{v}_A = \hat{g} - g_A(\hat{z}) \quad (2)$$

Die unbekanntenen Grauwerte \hat{g} treten nur linear auf. Näherungen g_0 sind deshalb nicht erforderlich. Gleichung (2) ist aber nichtlinear in den Rasterhöhen \hat{z} . Mit den Näherungswerten z_0 und den Zuschlägen $d\hat{z}$ ergibt sich die folgende linearisierte Verbesserungsgleichung

$$\hat{v}_A = \hat{g} - (\delta g_A / \delta z)_0 d\hat{z} - g_A(z_0) \quad (3)$$

Gleichung (3) besagt, daß nicht die originalen Grauwerte, sondern die aus ihnen abgeleiteten Größen $g_A(z_0)$ als Beobachtungen behandelt werden.

Für den Differentialquotienten $(\delta g_A / \delta z)_o$ gilt nach der Kettenregel

$$(\delta g_A / \delta z)_o = (\delta g_A / \delta x_A)_o (\delta x_A / \delta z)_o + (\delta g_A / \delta y_A)_o (\delta y_A / \delta z)_o \quad (4)$$

$(\delta g_A / \delta x_A)_o$ und $(\delta g_A / \delta y_A)_o$ stellen die Grauwertgradienten des Bildes an der Stelle der Näherungswerte $x_A(z_o)$, $y_A(z_o)$ dar. Da $g_A(z_o)$ durch eine bilineare Interpolation aus den umliegenden 4 Grauwerten gewonnen wurde, sind die Gradienten der entsprechenden Bilinearfläche die gesuchten Grauwertgradienten.

Damit liegt das Funktionalmodell komplett vor. Das stochastische Modell geht im einfachsten Fall von gleich genauen und unkorrelierten Beobachtungen mit der Einheitsmatrix als Gewichtsmatrix aus:

$$P = I \quad (5)$$

Die Lösung ergibt sich iterativ nach den Algorithmen der vermittelnden Ausgleichung. Die Strukturen der Koeffizientenmatrix der Verbesserungsgleichungen und der Normalgleichungsmatrix für ein kleines Beispiel sind aus den Abbildungen 5a und 5b ersichtlich. Aus 5b erkennt man auch die Möglichkeit, die unbekanntes Grauwerte der Oberflächenelemente wegen der Diagonalstruktur der entsprechenden Submatrix vorweg aus dem Gleichungssystem zu eliminieren.

Zu den Begriffen „Beobachtungen“ und „Iteration“ ist eine Bemerkung angebracht. Erstere ergeben sich aus den Näherungswerten z_o . Diese ändern sich von Iteration zu Iteration. Damit ändern sich aber auch die Beobachtungen selbst! Deshalb handelt es sich hier nicht um Iterationen im klassischen Sinne der Ausgleichung. Vielmehr stellt jede Iteration streng genommen eine eigene, unabhängige Ausgleichung dar.

4. Ein Beispiel

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens soll an einem ersten Beispiel aufgezeigt werden. Es handelt sich dabei um ein Farbinfrarot-Doppelmodell aus der Umgebung von Bad Tölz, etwa 60 km südwestlich von München. Die drei Aufnahmen wurden mit einer Weitwinkelkamera mit 80 % Längsüberdeckung aufgenommen. Der Bildmaßstab beträgt ca. 1:40 000. Die Bilder wurden an dem Hell-Raster Scanner CTX 330 des Landesvermessungsamtes München in den drei Druckfarben Cyan, Gelb, Magenta und einer Tiefe von 7 Bit pro Farbauszug mit einer Rasterweite von 50 μm abgetastet. Die Orientierung der Modelle wurde am Planicom C 100 des Lehrstuhls für Photogrammetrie der TU München bestimmt. Da keine Paßpunkte vorlagen, wurden die Modelle nur relativ orientiert, allerdings unter Berücksichtigung des genäherten Bildmaßstabes. Ein Pixel entspricht somit etwa $2 \times 2 \text{ m}^2$ im Gelände.

Für das Beispiel wurde aus den drei Bildern ein Gebiet, eine Straßenkreuzung, ausgewählt. Um die Kreuzung herum wurde eine Masche mit 20 m Rasterweite definiert. In der Masche wurden 11×11 Oberflächenelemente angeordnet. Die notwendigen Näherungshöhen z_o wurden im Planicom ermittelt.

Eine Vorverarbeitung der Bildgrauwerte (z. B. Tiefpaßfilterung) fand nicht statt, vielmehr wurden die Meßergebnisse des Abtastprozesses direkt für die Bildzuordnung benutzt.

Da der Magentakanal den größten Kontrastumfang besitzt, wurde er für die Bildzuordnung ausgewählt.

Für die Berechnungen wurde der folgende Weg beschritten:

- die vorher bestimmten Orientierungsparameter wurden als konstant angesehen,
- für die Abbildung der Bildkoordinaten ins Abtastsystem wurde eine Affintransformation mit den Rahmenmarken als identischen Punkten angesetzt.

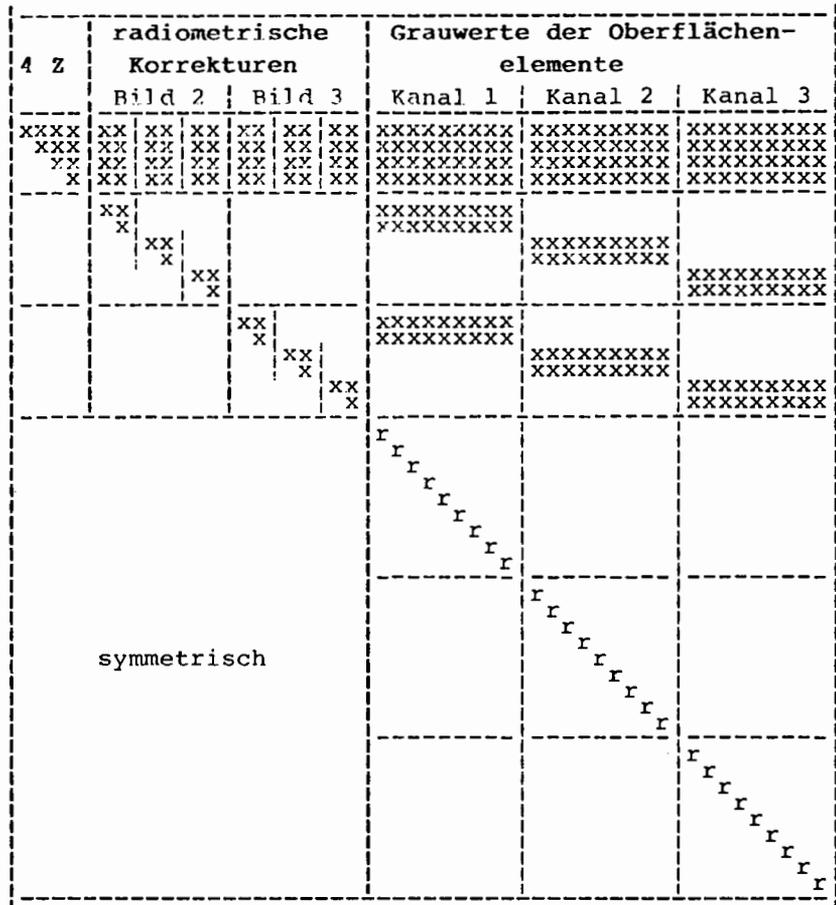
Die Ergebnisse der Berechnungen können der Tabelle 1 entnommen werden.

4 Z	radiometrische Korrekturen		Grauwerte der Oberflächenelemente		
	Bild 2	Bild 3	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx			1 1 1 1 1 1 1		
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx				1 1 1 1 1 1 1	
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx					1 1 1 1 1 1 1
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx	xx xx xx xx xx xx xx		1 1 1 1 1 1 1		
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx	xx xx xx xx xx xx xx			1 1 1 1 1 1 1	
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx		xx xx xx xx xx xx xx			1 1 1 1 1 1 1
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx			xx xx xx xx xx xx xx		
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx				xx xx xx xx xx xx xx	
xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx					xx xx xx xx xx xx xx

x = Element ungleich Null

Abb. 5a Struktur der Koeffizientenmatrix der Verbesserungsgleichungen für eine Rastermasche mit 3 Bildern, 3 Kanälen und 3*3 Oberflächenelementen

Abb. 5b Struktur der Normalgleichungsmatrix für eine Rastermaschine mit 3 Bildern, 3 Kanälen und 3*3 Oberflächenelementen



x = Element ungleich Null

r = Anzahl Bilder

Tabelle 1:

Ergebnisse der Ausgleichung der drei Bilder „Kreuzung“

Unbekannte	Näherungswert	Ausgeglichener Wert
z ₁	613,9 m	613,5 ± 1,1 m
z ₂	613,0 m	612,3 ± 1,1 m
z ₃	612,8 m	612,5 ± 0,5 m
z ₄	612,7 m	611,6 ± 0,9 m
r ₁ (2. Bild)	0,0	18,9 ± 3,4
r ₂ (2. Bild)	1,0	0,88 ± 0,05
r ₁ (3. Bild)	0,0	17,4 ± 3,3
r ₂ (3. Bild)	1,0	0,76 ± 0,04

Dieses erste praktische Beispiel zeigt die Eignung der vorgestellten Methode für die Objektrekonstruktion auf. Die aus den Näherungshöhen berechneten Grauwert-Beobachtungen und das ausgeglichene radiometrische Oberflächenmodell sind der Abbildung 6 zu entnehmen. Die Kreuzung ist jeweils deutlich zu erkennen. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Rasterhöhen sind noch näher zu analysieren. Verbesserungen der Ausgleichungsergebnisse sind sicherlich von den folgenden Maßnahmen zu erwarten:

- Bildabtastung mit einer geringeren Rasterweite (20-25 µm),
- angemessene Vorverarbeitung der Grauwertinformation,
- genauere Definition der Rahmenmarken im Abtastsystem,

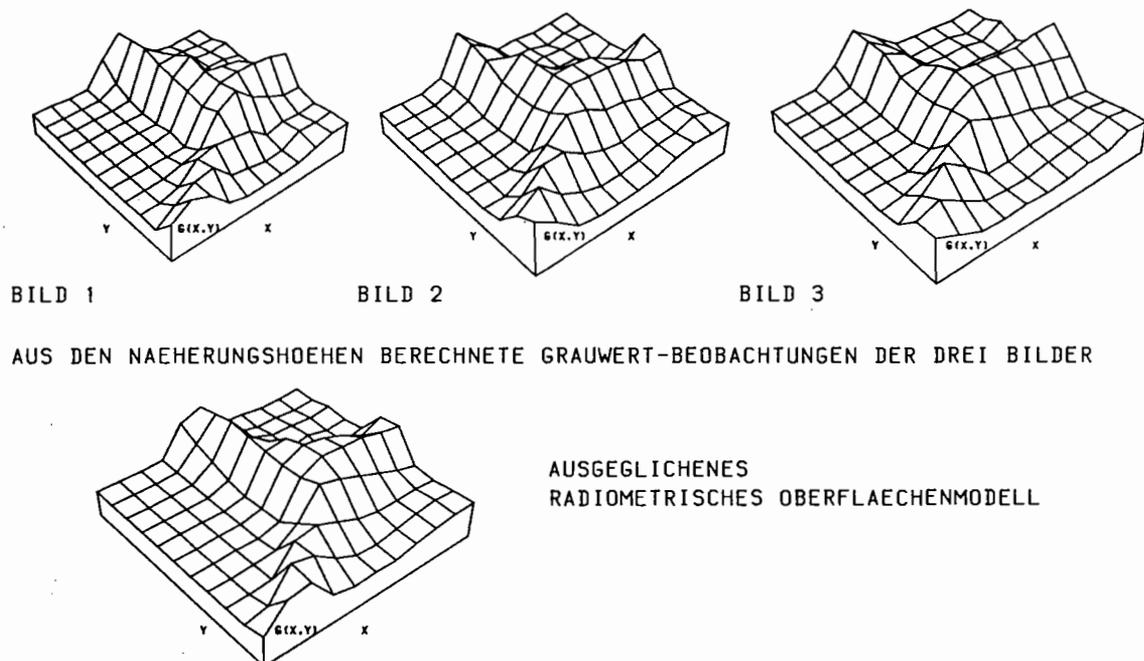


Abb. 6 Grauwert-Beobachtungen und ausgeglichenes radiometrisches Oberflächenmodell

- Bestimmung der Orientierungsparameter simultan mit den anderen Unbekannten,
- simultane Verarbeitung mehrerer Maschen.

5. Schluß

Bei vielen Planungsaufgaben (UKW-Senderstandortoptimierung, ökologische Trassenplanung, visuelle Beeinträchtigung von Großbauten, Schadstoffausbreitung) werden aktuelle Höhendaten benötigt. Die Abteilung Geländedatenverarbeitung der IABG bringt z. B. pro Jahr etwa 12 000 Personalstunden nur mit Datenerfassung zu. Es ist daher folgerichtig, die Aufgabe der aktuellen, genauen und fein gerasterten Höhendatenbeschaffung mittelfristig mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie zu lösen.

Die Kosten für Rechnerleistung und Speicherplatz halbieren sich alle zwei bis drei Jahre, so daß die rechenzeit- und speicherintensive digitale Photogrammetrie in Zukunft wirtschaftlich betrieben werden kann.

Insofern ist diese Methode zur Objektrekonstruktion nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern auch für die Praxis relevant. Ihre Eigenschaften können wie folgt zusammengefaßt werden:

- das Objekt wird durch ein geometrisches und ein radiometrisches Modell beschrieben,
- die Anzahl der Oberflächenelemente für die Beschreibung des radiometrischen Modells kann bis zur Anzahl der Bildelemente des entsprechenden Ausschnitts beliebig groß gewählt werden,
- die Bildzuordnung und die Objektrekonstruktion werden in einem Schritt durchgeführt,
- mit der Objektrekonstruktion sind die Punktbestimmung und die Ableitung digitaler Oberflächenmodelle möglich,
- die Parameter der Bildorientierungen können als Unbekannte mitbestimmt werden,
- es können beliebig viele Bilder simultan benutzt werden,
- es lassen sich beliebig viele Kanäle, d. h. insbesondere auch Farbbilder verarbeiten,
- eine Unterscheidung in Muster- und Suchmatrix ist nicht notwendig,
- schlecht oder gar nicht zu korrelierende Gebiete (z. B. Wald, Seeoberflächen) können überbrückt werden,

- beliebige Paß- und Objektinformation (Kantenlinien, Formbedingungen der Oberfläche etc.) kann direkt berücksichtigt werden,
 - auch digitale Daten anderer Sensoren können verarbeitet werden.
- Insgesamt stellt die hier beschriebene Methode eine Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung und Ableitung von Oberflächenmodellen innerhalb der digitalen Photogrammetrie dar.

6. Dank

Die Autoren bedanken sich beim Landesvermessungsamt München, insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. DRESSE und seinen Mitarbeitern für die Abtastung der Bilder, bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) EDER, TU München, für die Arbeiten am PLANICOMP, bei Herrn Dipl.-Math. THIEMANN und Herrn Dipl.-Inf. (FH) HASCHEK, IABG, für die Hilfestellung beim Einsatz des Bildverarbeitungssystems der IABG sowie bei FrI. JAURIS für die Anfertigung der Zeichnungen.

Literatur

- [1] ACKERMANN, F.: High Precision Image Correlation. Proceedings 39th Photogram. Week, Inst. f. Photogr., Heft 9, Stuttgart, 1984
- [2] BOOCHS, F.: Ein Verfahren zur Herstellung digitaler Höhenmodelle aus photogrammetrischen Stereoaufnahmen mit Hilfe der flächenhaften Korrelation in digitalen Bildern. Deutsche Geod. Komm., Reihe C. Nr. 299, München, 1984
- [3] EBNER, H., HOFMANN-WELLENHOF, B., REIß, P., STEIDLER, F.: HIFI - A Minicomputer Program Package for Height Interpolation by Finite Elements. Int. Arch. Phot., 23, Part B4, S. 202-215, Hamburg 1980
- [4] EHLERS, M.: Untersuchungen von digitalen Korrelationsverfahren zur Entzerrung von Fernerkundungsaufnahmen. Wissenschaftl. Arbeiten der Universität Hannover, Nr. 121, Hannover 1983
- [5] FÖRSTNER, W.: On the Geometric Precision of Digital Correlation. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 24, part 3, Comm. III, S. 176-189, Helsinki 1982
- [6] FÖRSTNER, W.: Quality Assessment of Object Location and Point Transfer using Digital Image Correlation Techniques. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 25, Part A3a, Comm. III, S. 197-219, Rio de Janeiro 1984
- [7] GÖPFERT, W.: Digital Cross-Correlation of Complex Exponentiated Inputs. Proceedings „Image Processing - Interactions with Photogrammetry and Remote Sensing“, Mitteilungen der Geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 29, 1977, S. 63-66
- [8] GRÜN, A. W.: Adaptive Least Squares Correlation - A Powerful Image Matching Technique. South Afr. Journ. Phot. Rem. Sens. Cart., 14 (1985), S. 175-187
- [9] Grün, A. W., BALTSAVIAS, E. P.: High Precision Image Matching for Digital Terrain Model Generation. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 26, Part 3/1, Comm. III, S. 284-296, Rovaniemi 1986
- [10] LEHNER, M.: Triple Stereoscopic Imagery Simulation and Digital Image Correlation for MEOS Project. Int. Symp. „Progress in Imaging Sensors“, ESA/ISPRS, Comm. I, S. 477-484, Stuttgart 1986
- [11] Pertl, A.: Digital Image Correlation with the Analytical Plotter Planicomp C 100. Int. Arch. Phot. Rem. Sens., 25, Part A3b, Comm. III, S. 874-882, Rio de Janeiro 1984
- [12] ROSENHOLM, D.: Accuracy Improvement in Digital Matching. Report No. 2: 52, Dep. of Photogr., The Royal Institute of Technology, Stockholm 1986
- [13] WROBEL, B.: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen, BuL 55 (1987), S. 93-101
- [14] WROBEL, B.: Einige Überlegungen über die theoretischen Grundlagen der digitalen Photogrammetrie. BuL 55 (1987), S. 129-140

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. HEINRICH EBNER, Dr.-Ing. DIETER FRITSCH, Lehrstuhl für Photogrammetrie, TU München, Arcisstraße 21, 8000 München 2
Dipl.-Math. WOLFHART GILLESSEN, Dipl.-Ing. CHRISTIAN HEIPKE, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG), Einsteinstraße 20, 8012 Ottobrunn

Eingang des Manuskriptes: 4. 7. 1987