

Ein universeller Ansatz für die geometrische Auswertung von CCD-Zeilenabtasteraufnahmen

Von GOTTFRIED KONECNY, ERWIN KRUCK und PETER LOHMANN, Hannover

Zusammenfassung

Es wird ein neuer mathematischer Ansatz für die Auswertung von CCD-Zeilenabtasteraufnahmen vorgestellt. Dieser Ansatz berücksichtigt die Zentralperspektive innerhalb einer oder mehrerer Zeilen und vermeidet hohe Korrelationen zwischen den Unbekannten, welche zum Teil als zusätzliche Parameter bestimmt werden.

A new mathematical model for the evaluation of CCD-Line-Scanner-Images

A new mathematical model is presented for the evaluation of CCD-Line-Scanner Images. This model accounts for the central perspective along one or more lines and avoids high correlations between the unknown, which are partly formulated as additional parameters.

Un modèle nouveau pour la restitution des images par détecteurs en ligne

On présente un nouveau modèle mathématique pour la restitution des images par détecteurs en ligne. Ce modèle contient la perspective-centrale pour une ou plusieurs lignes et n'a pas des corrélations significatives entre les inconnues qui sont formulées en part comme paramètres additionnels.

1. Einleitung

Für die Auswertung von Zeilenabtasteraufnahmen wurden bereits in den sechziger Jahren die ersten einfachen geometrischen Modelle entwickelt [2]. Eine die Geländehöhen mitberücksichtigende Lösung mit Kollinearitätsgleichungen wurde schon 1971 vorgestellt [5]. Die photogrammetrische Aufgabe führte zu einer hochkorrelierten Lösung zwischen den photogrammetrischen Parametern, welche durch Einführung fiktiver Beobachtungen zur Konvergenz gebracht wurde ([3], [9], [11]).

Eine andere Lösung, bei welcher nicht die Beobachtungen von (unkorrelierten) Bildkoordinaten, sondern die von Paßpunktkoordinaten ausgeglichen wurden, wurde schon in den siebziger Jahren auf LANDSAT-Aufnahmen angewandt [1]. Ein ähnlicher Ansatz mit sehr schwach korrelierten Orbitalparametern wurde beim IGN Paris für SPOT-Aufnahmen entwickelt [10].

Beide Lösungswege haben Mängel. In der ersten Gruppe stören die hohen Korrelationen, welche durch die Wahl der fiktiven Parameter gezielt vermieden werden müssen. Dadurch ist die Lösung mit Hypothesen behaftet. Der zweite Weg vermeidet es, die Beobachtungen auf Bildkoordinaten zu beziehen und stellt somit ein genähertes funktionales Modell dar.

Mit diesem Aufsatz wird eine dritte Möglichkeit aufgezeigt, welche einen Bildkoordinatenansatz erlaubt und die hohen Korrelationen vermeidet. Die Orientierungsunbekannten werden dabei teilweise als zusätzliche Parameter formuliert. Das Verfahren ist im allgemeinen für die Auswertung von Satellitenabtasteraufnahmen vom Typ SPOT, MOMS, Stereo-MOMS und HRIR von Interesse.

2. Geometrie von CCD-Zeilenabtasteraufnahmen

Ein Luftbild ist eine zentralperspektive Abbildung eines Teils der Erdoberfläche, z. B. im Format $23 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$. Innerhalb eines Flugstreifens werden mehrere Bilder in regelmäßigen Abständen mit starker gegenseitiger Überdeckung aufgenommen. Die Orientierung eines Bildes im Raum (Abb. 1) ist dabei durch die Lage des Projektionszentrums während der Aufnahme und durch die üblichen drei Drehwinkel vollständig beschrieben ($X_0, Y_0, Z_0, \phi, \omega, \kappa$).

Bei einem CCD-Zeilenabtaster ist in der Bildebene des Objektivs ein CCD-Zeilensensor montiert. Durch die Bewegung der Aufnahmeplattform wird das Gelände wie bei einer Streifenbildkamera kontinuierlich auf den Sensor abgebildet. In festen Zeitintervallen (Takt) lassen sich die

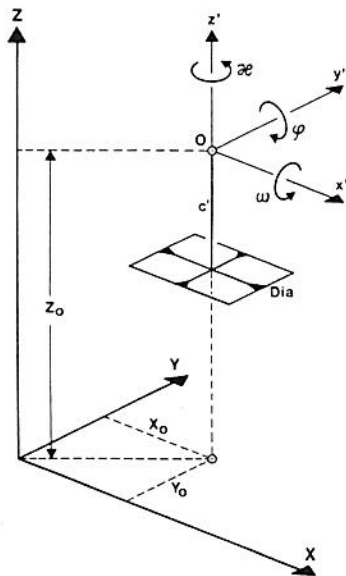


Abb. 1 Koordinatensystem eines Luftbildes

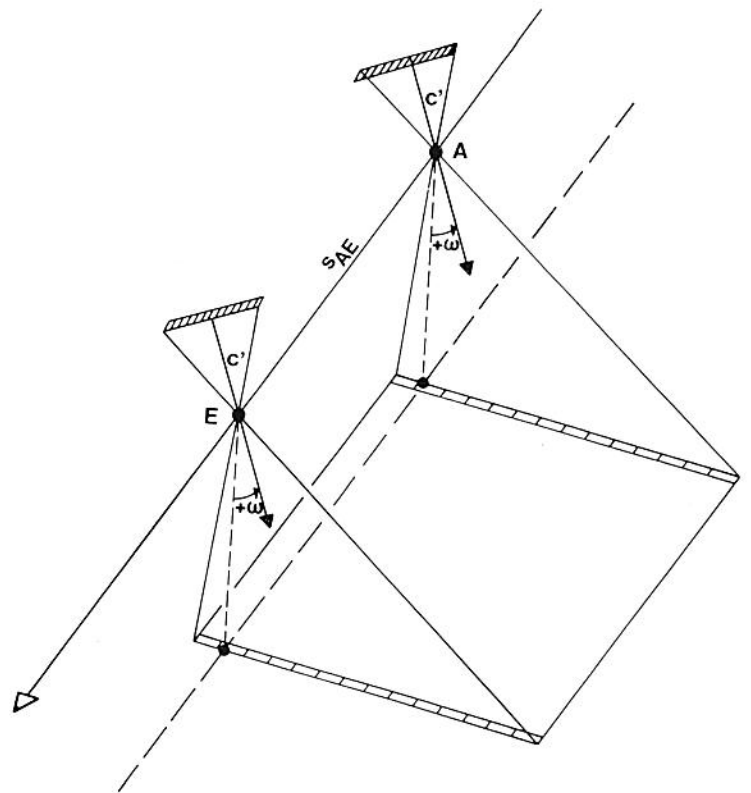


Abb. 2 Aufnahmeconfiguration eines CCD-Zeilenabsters bei unbeschleunigter gleichförmiger Bewegung

empfangenen Lichtsignale aus den einzelnen Sensorelementen der Zeile herauslesen. Werden zu jedem Zeitpunkt i alle Elemente des Sensors gleichzeitig ausgelesen, so ist die Abbildung einer jeden Zeile eine Zentralperspektive. Für die Weiterverarbeitung wird jeweils eine größere Anzahl von Zeilen zu einer Einheit zusammengefaßt und meistens auch als Bild auf Film ausgegeben.

Die Orientierung einer jeden Zeile dieses Bildes kann einzeln, wie beim Luftbild, durch die sechs Parameter der äußeren Orientierung beschrieben werden. Die Orientierungsparameter benachbarter Bildzeilen sind jedoch sehr hoch miteinander korreliert. Dies gilt insbesondere, wenn als Plattform für den Abtaster ein hochfliegender Satellit auf einer geozentrischen Umlaufbahn benutzt wird. In diesem Falle kann als erste Näherung ein sehr einfaches mathematisches Modell aufgestellt werden:

Der Sensor bewegt sich während der Aufnahme des Bildes unbeschleunigt, also gleichförmig, von A nach E (Abb. 2). Führt man die Berechnung der Orientierungsparameter in einem verebneten Koordinatensystem, wie z. B. GAUSS-KRÜGER oder UTM, durch, so kann auch der Flugweg von A nach E als gerade angenommen werden. Das Projektionszentrum gleitet also während der Aufnahme von A nach E. Es gilt daher:

$$\mathbf{X}_{0,i} = \mathbf{X}_{0,A} + \frac{S_i}{S_{AE}} (\mathbf{X}_{0,E} - \mathbf{X}_{0,A}) \quad (1)$$

mit

$\mathbf{X}_{0,i}$: Ortsvektor des Projektionszentrums zum Zeitpunkt der Aufnahme der Zeile i

$\mathbf{X}_{0,A}$: wie vor, jedoch für die erste Bildzeile

$\mathbf{X}_{0,E}$: wie vor, jedoch für die letzte Bildzeile

S_i : Strecke von $\mathbf{X}_{0,A}$ nach $\mathbf{X}_{0,i}$

S_{AE} : Strecke von $\mathbf{X}_{0,A}$ nach $\mathbf{X}_{0,E}$

Das Streckenverhältnis in Formel (1) kann auch ausgedrückt werden durch:

$$i/n = S_i/S_{AE} \quad (2)$$

mit

i: Nummer der Zeile (Aufnahmezeit)

n: Gesamtzahl der Zeilen.

Die Winkel ϕ , ω und κ sind in dieser ersten Näherung für alle Zeilen konstant.

Erfolgt die Berechnung nicht in einem verebneten, sondern z. B. in einem geozentrischen Koordinatensystem, so ist die Interpolation in Formel (1) durch eine Kreisbahn oder eine Ellipse zu ersetzen. Der Nick-Winkel ϕ ist dann nicht mehr konstant, sondern wird in gleicher Weise interpoliert.

Für einen Bildpunkt kann somit innerhalb der Zeile die Kollinearitätsgleichung angesetzt werden:

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \lambda \mathbf{R} \mathbf{x}' \quad (3)$$

mit

$$\mathbf{x}' = (0, y', -c) \quad (4)$$

y' entspricht der Pixelnummer j innerhalb der Zeile und ist auf die Zeilenmitte bezogen.

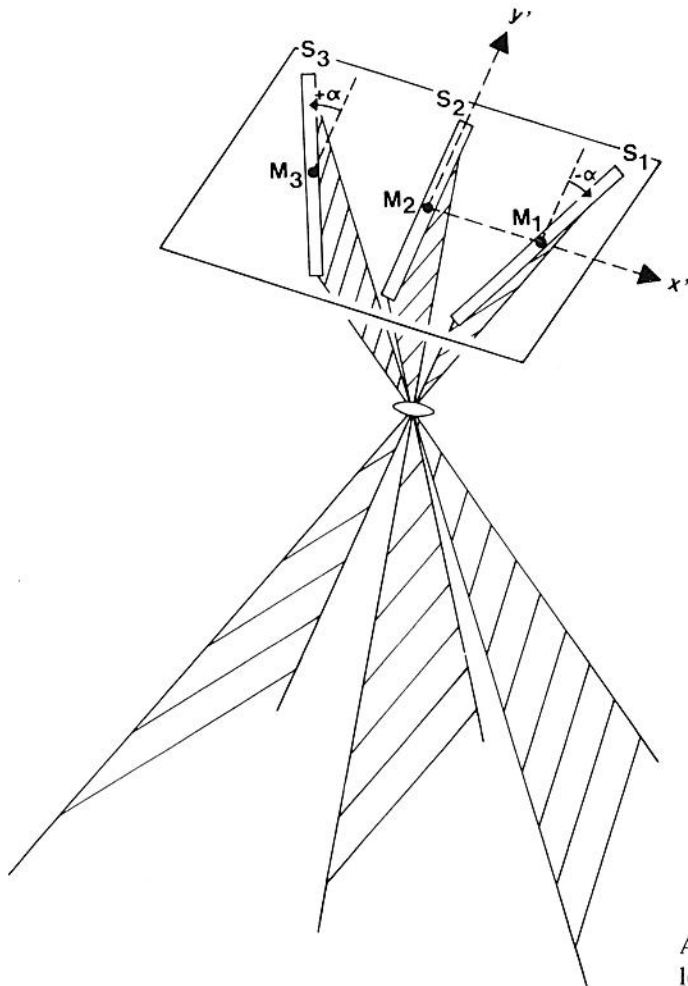


Abb. 3 Schematische Darstellung eines Dreizeilen-CCD-Abtasters

Die hier unterstellte unbeschleunigte Bewegung der Plattform entspricht jedoch nicht der Realität. Tatsächlich treten Beschleunigungen, z. B. durch Steuerbewegungen oder das unregelmäßige Schwerfeld der Erde, auf. Die Plattform bewegt sich daher nicht auf einer mathematisch definierten Bahn und die Winkel ϕ , ω und κ sind nicht konstant. Alle 6 Orientierungsparameter sind eine Funktion der Zeit. Leider ist die Funktion selbst nicht bekannt und wird bisher z. B. durch Polynome oder Zeitreihen angenähert [11].

Der bisher dargestellte Ansatz geht davon aus, daß der Sensor nur eine CCD-Zeile enthält, und daß die Mitte dieser Zeile im Hauptpunkt des optischen Systems liegt. Trägt ein Sensor mehr als eine CCD-Zeile, so können diese Voraussetzungen nicht mehr zutreffen. In Abb. 3 ist als Beispiel ein Dreizeilen-Abtaster gezeigt. Die Lage der Sensoren S_1 , S_2 und S_3 ist im Bildkoordinatensystem (x', y') definiert. Die Mittelpunkte M liegen auf der x' -Achse, die Winkel α geben die Neigung gegen die y' -Achse. Der Bildvektor in Formel (4) geht über in

$$\mathbf{x}' = (x', y', -c) \tag{5}$$

mit

$$\begin{aligned} x' &= x'_M - j \cdot \sin \alpha \\ y' &= \quad j \cdot \cos \alpha \end{aligned} \tag{6}$$

Darin ist j die auf M bezogene Pixelnummer innerhalb der Zeile. Die Formeln (1) bis (3) gelten nach dieser Änderung des Bildvektors für jeden CCD-Sensor mit beliebig vielen Zeilen, solange alle Zeilen in einer Ebene liegen. Es ist jedoch zu beachten, daß in Formel (1) bzw. (2) die Zeilennummer i für die Interpolation benutzt werden muß, da die Zeilennummer gleichzeitig den Aufnahmezeitpunkt darstellt.

3. Lösungsansatz

Wie bereits ausgeführt, sind die Formeln in Kapitel 2 noch nicht hinreichend an die Wirklichkeit angepaßt. Für einen satellitengestützten CCD-Sensor läßt sich jedoch eine sehr einfache Lösung zur Verfeinerung des Ansatzes angeben. Ein Satellit fliegt im Verhältnis zu einem Flugzeug sehr ruhig in seiner Bahn. Außerdem sind die Geländehöhen im Verhältnis zur Flughöhe sehr klein. Unter diesen Voraussetzungen sind die 6 Orientierungsparameter einer perspektivischen Abbildung untereinander stark korreliert, nämlich ϕ mit X_0 und ω mit Y_0 , wenn man einen Flug in

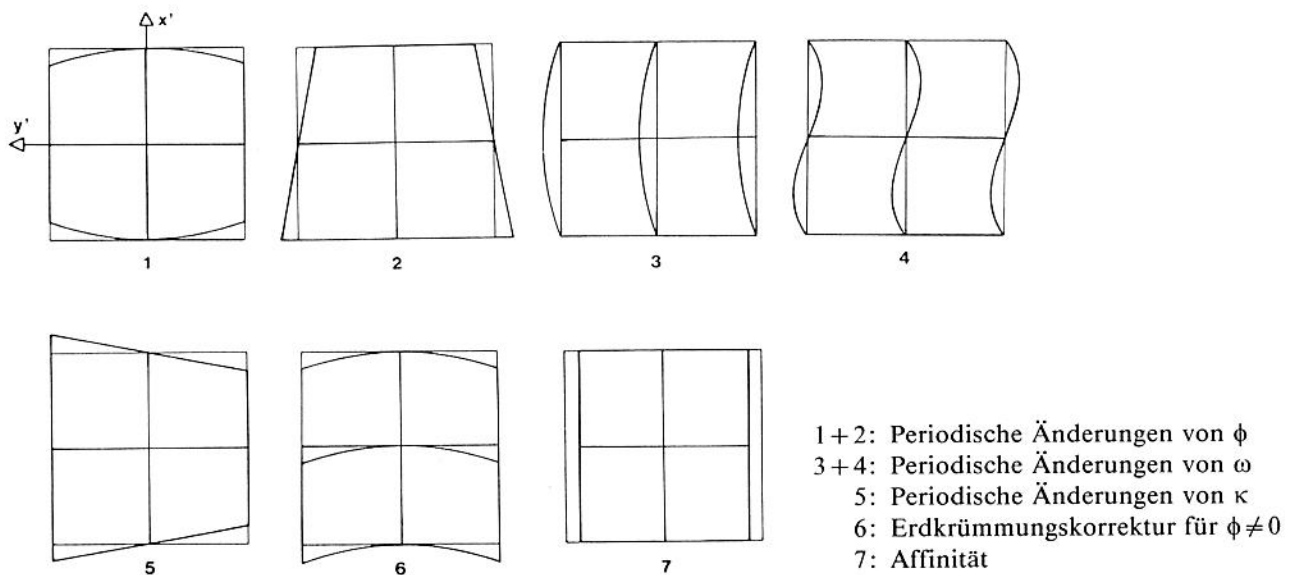


Abb. 4 Zusätzliche Parameter zur Beschreibung der ungleichförmigen Plattformbewegung

X-Richtung unterstellt. Es ist daher für die Koordinaten am Boden unerheblich, ob ϕ oder X_0 verändert wird. Daher kann die Flugbahn auch für einen verfeinerten Ansatz als geradlinig bzw. regelmäßig gekrümmt angenommen werden, wenn man Änderungen der Winkel ϕ , ω und κ zulässt.

Diese Winkeländerungen sind eine Funktion der Zeit i . Mathematisch lassen sie sich formulieren als zusätzliche Parameter, die die Bildgeometrie verändern. Die Frage, welche Einflüsse auf die Bildgeometrie durch eine ungleichförmige Plattformbewegung am ehesten zu erwarten sind, führt auf einen Satz von 7 Parametern, die in Abb. 4 gezeigt sind. Dieser Satz von Parametern lässt sich bei Bedarf beliebig erweitern. Die Winkel können nun für ein Bild als zeitinvariant angenommen werden.

4. Parameter und Ergebnisse der Ausgleichung

Bei dem hier vorgestellten Ansatz treten für ein Bild die Koordinaten der Punkte A und E, die Winkel ϕ , ω und κ sowie die zusätzlichen Parameter als Unbekannte auf. Aus den Bahndaten eines Satelliten lassen sich Informationen über diese Unbekannten gewinnen. Abb. 5 zeigt schematisch den von einem Bild erfaßten Geländeausschnitt. Wegen der Erddrehung während der Aufnahme ist die Flugrichtung h (*Heading*) nicht identisch mit der Richtung t der Spur des Flugzeuges am Boden (*Real Track Heading*). Der Differenzwinkel r (*Rotation*) ist eine Funktion der Winkelgeschwindigkeit der Erde, der geographischen Breite, der Inklination und der Umlaufzeit des Satelliten. Es gilt:

$$h + r = t \quad (7)$$

sowie

$$\kappa \approx h \quad (8)$$

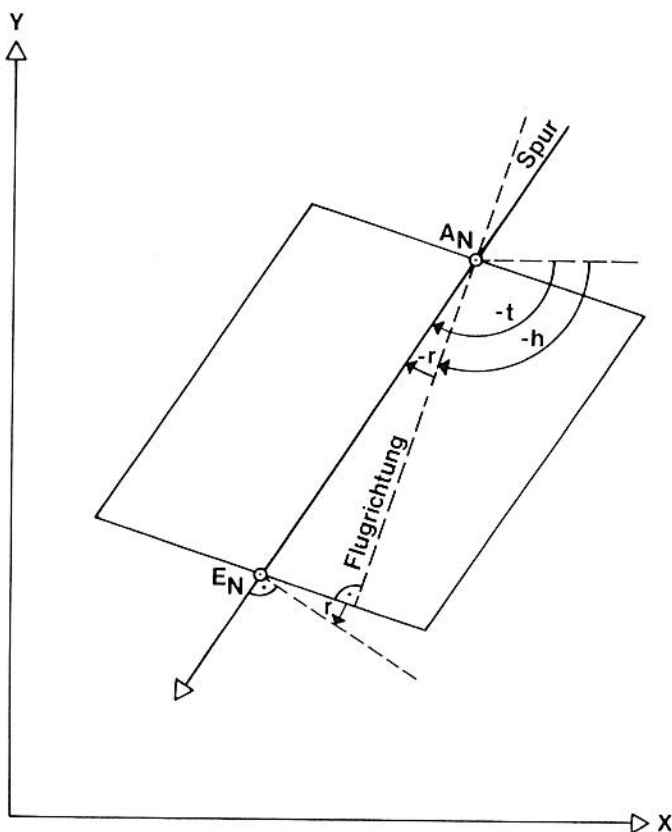


Abb. 5 Von einem Bild erfaßter Geländeausschnitt zur Ableitung der tatsächlichen Flugrichtung h (*Heading*), der Spur des Flugzeuges am Boden t (*Real track heading*) und der Verzerrung r durch Erddrehung

Ebenso können aus den Bahndaten die Richtung t der Spur, die Länge der Strecke S_{AE} sowie der Höhenunterschied zwischen A und E ermittelt werden. Falls Bahndaten nicht vorliegen, sind diese Informationen z. B. aus vorhandenen Karten oder Messungsdaten abzuleiten. Des weiteren sind die Winkel ϕ und ω als Sollwinkel vorgegeben. Alle diese Größen werden dann aufgrund der a priori Genauigkeit mit einem Gewicht versehen und als Beobachtungen zur Stabilisierung des Blocks in die Ausgleichung eingeführt.

Des weiteren können als Beobachtung Bildpunkte einbezogen werden von Details, die sich auch in benachbarten Bildern wiederfinden lassen. Solche Punkte kommen z. B. in Betracht, wenn der gleiche Geländeausschnitt zusätzlich mit anderer Perspektive erfaßt wurde. Zur geometrischen Stabilisierung und Lagerung des Blockes ist eine größere Anzahl von Paßpunkten erforderlich.

Dieser Ansatz ist der normalen Bündelausgleichung mit zentralperspektiven Abbildungen sehr ähnlich und kann relativ einfach in bestehende Bündelprogramme integriert werden. Auf diese Art und Weise ist man in der Lage, in einem Guß zentralperspektive Bilder und CCD-Zeilenabtaufnahmen auszugleichen und alle sonstigen bestehenden Möglichkeiten eines Programms auszunutzen. Der vorgestellte Algorithmus ist als Option in das Bündelprogrammpaket BINGO ([6], [7]) integriert. Neben den oben genannten 7 zusätzlichen Parametern können pro Bild weitere 20 in BINGO enthaltene Standardparameter gewählt werden.

Die Ausgleichung liefert als Ergebnis

- die 9 Parameter der äußeren Orientierung X_A , X_E , ϕ , ω und κ ,
- die Werte der zusätzlichen Parameter, die die Abweichungen zwischen der unterstellten gleichförmigen Bewegung und der realen Aufnahmedisposition darstellen; redundante Parameter werden automatisch eliminiert,
- die Korrelation der zusätzlichen Parameter untereinander,
- dreidimensionale Koordinaten der Objektpunkte,
- Varianzen und Kovarianzen der Unbekannten,
- die Varianzkomponenten der Beobachtungen zur Überprüfung des stochastischen Modells.

5. Auswertung

Ursprünglich liegen die Aufnahmen von CCD-Zeilenabtastrern in digitaler Form vor. Daher bietet sich eine digitale Weiterverarbeitung grundsätzlich an. Der erste Schritt wird in der Messung der Bildkoordinaten an einem digitalen Bildauswertesystem bestehen. Nach der Ausgleichung kann durch digitale Korrelation ein Höhenmodell aufgebaut werden. Damit ist die Grundlage für die Erzeugung eines digitalen Orthophotos gegeben. Zur Herstellung eines solchen Photos wird z. B. ein regelmäßiges Gitter (z. B. in UTM-Koordinaten) vorgegeben und die orthometrische Höhe für jeden Punkt aus dem DHM interpoliert. Mit den Ausgleichungsergebnissen (9 Orientierungsparameter und zusätzliche Parameter) werden die Bildkoordinaten (Zeilen- und Spaltenadressen) dieser Gitterpunkte bestimmt und gespeichert (Ankerpunktfile). Dieser Ankerpunktfile dient als Eingabe für eine Routine der digitalen Bildverarbeitung [8] mit der eine Grauwertzuweisung (*Resampling*) nach verschiedenen Interpolationsmethoden erfolgen kann.

Stehen keine Hilfsmittel zur digitalen Bildverarbeitung zur Verfügung, so kann über den Umweg der Filmabspielung der digitalen Bilddaten eine Strichauswertung oder Orthophotoherstellung an analytischen Auswertegeräten vorgenommen werden. Mit der Ausgabe auf Film ist jedoch ein Informations- und Genauigkeitsverlust verbunden.

Dabei sind folgende Einzelschritte notwendig:

- Messung der Bildkoordinaten von Verknüpfungspunkten und Paßpunkten im analytischen Auswertegerät,
- Ausgleichung entsprechend Kap. 3 und 4,
- Übernahme der Orientierungsparameter und der zusätzlichen Parameter aus der Ausgleichung,

- Echtzeit-Strichauswertung oder/und Höhenmessung,
- Orthophotoherstellung.

Analytische Auswertegeräte arbeiten normalerweise mit zentralperspektiven Abbildungen. Die gesamte Software ist darauf abgestellt. Die hier vorliegende von der Zentralprojektion abweichende Geometrie muß in geeigneter Weise berücksichtigt werden [4]. Im Prinzip ist eine mathematisch eindeutige Formulierung dieser Abweichung möglich. Es muß jedoch ein Weg gesucht werden, der eine Echtzeit-Verarbeitung gestattet - also kurze Rechenzeit erfordert: Für eine Geländehöhe Z_1 kann für ein regelmäßiges Gitter im Bild die Abweichung von der echten Zentralperspektive berechnet werden. Weil diese Abweichungen eine Funktion der Geländehöhen Z sind, ist eine zweite Berechnung für eine Geländehöhe Z_2 erforderlich. Man erhält somit für jeden Gitterpunkt im Bild zwei Verzerrungsvektoren für die Geländehöhen Z_1 und Z_2 . Aus Gründen der Zweckmäßigkeit wird ein Vektor und ein Gradient (Ableitung) gespeichert. Im Real-Time-Prozess erfolgt eine Bildwagenkorrektur für jedes Bild. Die Größe der Korrektur ist eine Funktion der Bildkoordinaten x', y' der perspektiven Abbildung und der Geländehöhe Z (siehe Abb. 6) und wird durch bilineare Interpolation bestimmt.

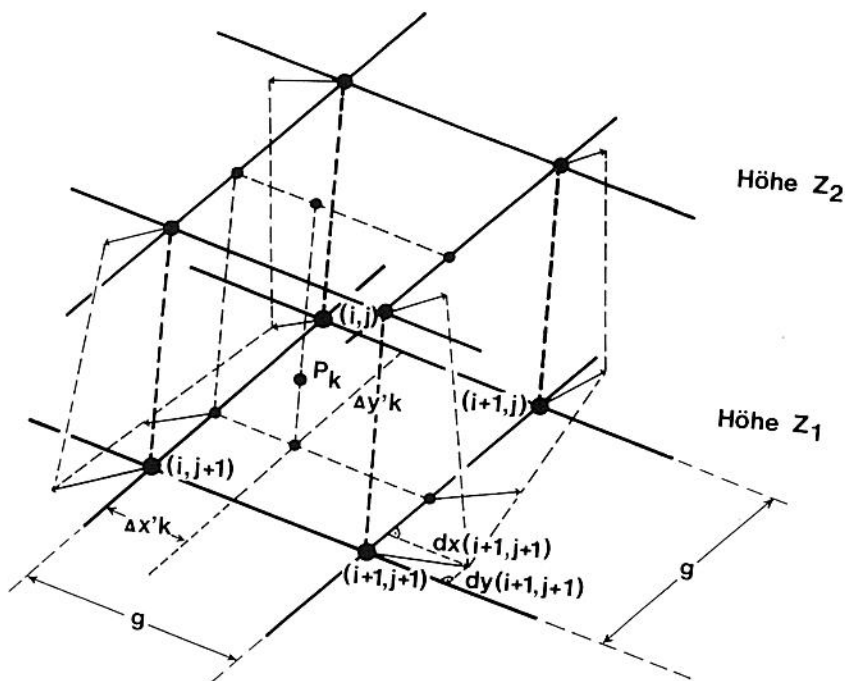


Abb. 6 Prinzip der Ermittlung von Bildwagenkorrekturen an analytischen Auswertegeräten

Mit Abb. 6 ergibt sich für einen beliebigen Punkt, P_k mit einer Höhe Z_k in der Ebene I

$$\begin{aligned} \Delta x'_k &= (x'_k - x'_{(i,j)})/g \\ \Delta y'_k &= (y'_k - y'_{(i,j)})/g \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} dx'_k &= dx'_{(i,j)} + \Delta x'_k(dx'_{(i+1,j)} - dx'_{(i,j)}) \\ &\quad + \Delta y'_k(dx'_{(i,j+1)} - dx'_{(i,j)}) \\ &\quad + \Delta x'_k \cdot \Delta y'_k(dx'_{(i,j)} - dx'_{(i+1,j)} - dx'_{(i,j+1)} + dx'_{(i+1,j+1)}) \end{aligned} \quad (10)$$

und dy'_k auf die gleiche Weise. Entsprechendes gilt für eine zweite Ebene II mit der Höhe Z_2 . Die Bildwagenkorrekturen lassen sich demnach aus (11) errechnen:

$$dx'_k = (dx'_{i1} - dx'_i) \cdot \frac{Z_k}{Z_2 - Z_1} + dx'_i$$

$$dy'_k = (dy'_{i1} - dy'_i) \cdot \frac{Z_k}{Z_2 - Z_1} + dy'_i$$
(11)

Besondere Vereinfachung ergibt sich für den Fall, daß die Differenz $Z_2 - Z_1$ zur Einheit gewählt wird.

6. Ausblick

Die hier vorgestellte Lösung eignet sich einerseits für die analoge Weiterverarbeitung an analytischen Auswertegeräten. Dabei sind die bestehenden Echtzeitprogramme mit Korrekturen zu versehen, welche vorher in der Aerotriangulation bestimmt worden sind. Dies ist sowohl für die linienweise Auswertung in analytischen Plottern als auch für die Orthophotosteuerung in analytischen Orthophotogeräten möglich.

Andererseits kann die Lösung auch in der digitalen Verarbeitung der Satellitenaufnahmen zur Ableitung digitaler Geländemodelle und für die digitale Herstellung von Orthophotos verwendet werden.

Literatur

- [1] BÄHR, H. P.: Analyse der Geometrie auf Photodetektoren abgetasteter Aufnahmen von Erderkundungssatelliten. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1976.
- [2] DERENYI, E.; KONECNY, G.: Infrared Scan Geometry. Photogrammetric Engineering 32 (1966) S. 773-778.
- [3] DOWIDEIT, G.: Eine Blockausgleichung für Abbildungen des seitwärts schauenden Radar (SLAR). Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1977.
- [4] EGELS, Y.: Amélioration des logiciels Traster: restitution d'images à géométrie non conique. - Bull. Inf. IGN 1983/2 S. 19-22.
- [5] KONECNY, G.: Metric Problems in Remote Sensing. Proc. ISP Comm IV Symp. ITC Delft, 1971, Series A, Nr. 50, S. 152-177.
- [6] KRUCK, E.: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalem Modell. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1983.
- [7] KRUCK, E.: Kombinierte Ausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung und Simultankalibrierung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 275, München 1985, Beitrag zur Arbeitstagung 'Kamerakalibrierung in der Photogrammetrischen Praxis'.
- [8] LOHMANN, P.: Digital Image Processing of Metric Camera Imagery. Proc. DFVLR-ESA Workshop, ESA-Publication SP-209, 1985.
- [9] SCHUHR, W.: Geometrische Verarbeitung multispektraler Daten von Zeilenabstastern. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1982.
- [10] TOUTIN, TH.: Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT. Thèse du doctorat, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Paris, 1985.
- [11] WU, J.: Geometrische Analyse für Bilddaten stereoskopischer Dreifach-Linearzeilenabtaster. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1986.

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr.-Ing. GOTTFRIED KONECNY, Dr.-Ing. ERWIN KRUCK und Dr.-Ing. PETER LOHMANN, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Univ. Hannover, Nienburger Straße 1, 3000 Hannover 1

Eingang des Manuskriptes: 30. 4. 1986