Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 83 (1985)

Heft: 9: Sonderheft zum Rücktritt und 70. Geburtstag von Prof. Dr. Dr. h. c. H. H. Schmid

Artikel: Die Entwicklung der abtastenden, digitalen Bildaufnahme für die Photogrammetrie

Autor: Hofmann, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-232614

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

superimposed on the orthophoto to edit or annotate all points on the terrain where the surface drops away at more than a selected angle (such as 89°?). Thus, people in photogrammetric process will be used only for tasks requiring judgement and knowledge and not taken up endlessly tracing out elevations and profiles.

7.2 Reconnaissance

We expect to see a variation of the editing machine suggested above for use in reconnaissance work. In such a reconnaissance machine a computer would compare highly detailed digital elevation models "before and after" to locate changes. All areas of change could be outlined on the orthophoto display for consideration by the operator. It should be practical to use uncontrolled models for both before and after and to locate all changes in 2–3 minutes per model.

7.3 Assembly Robots

The robot market seems likely to become about a hundred times the size of the photogrammetric instrument market by 1990. The market for vision systems should be about US$ 500,000,000 per year by then. We expect to see small and large robots with sophisticated stereopsis doing a multitude of industrial assembly tasks at speeds equal to or vastly exceeding human capabilities. Stereopsis would also assist and simplify the programming process in many ways.

7.4 Inspection Robotics

The detailed inspection of industrial products during the production process will be very much akin to the mapping photogrammetry of today. However the "terrain" being mapped may be only the size of a paper clip, the "camera stations" may be only a foot or two above the terrain and the system will have perhaps one tenth of a second to map the object, compare it with the standard and pronounce on its acceptability.

7.5 Navigation Robotics

At first automated factory vehicles will be able to drive about the warehouse and factory using the same visual cues as a human driver. As the technology progresses it will not be long before such vehicles are used as automatic transfer and handling devices in remote or hazardous environments. We anticipate a tremendous political furor when they are first allowed onto the public streets and highways.

7.6 Medical

In the medical field we may come the full circle and a role reversal. Industry has been using the sight of man to guide machines for many years. Could not the design of machines perhaps guide man in his understanding of human visual processes?
If blind machines can be given sight, why not use machines to give sight to blind people?
Indeed, why not?

Adresse der Verfasser:
Gilbert & Theodore Hobrough
Automatic Vision Research (Canada) Inc.
407-1625 West 13th Avenue
Vancouver, BC Canada

Die Entwicklung der abtastenden, digitalen Bildaufnahme für die Photogrammetrie

O. Hofmann

Die photogrammetrische Messtechnik beruht auf dem Prinzip der räumlich zentralperspektiven Aufnahme und Auswertung photographischer Momentaufnahmen. Das Objekt wird von einem, oder bei stereoskopischer Arbeitsweise von zwei oder mehr Standpunkten aus in einer Momentaufnahme in die Bildebene eines Objektives, das den Zentralpunkt realisiert, abgebildet und photographisch-analog registriert. Mit den bekannten Mitteln der Ein- oder Zweibild-Photogrammetrie kann die geometrische Gestalt des aufgenommenen Objektes in beliebigem Massstab rekonstruiert werden. In der Zweibild-Photogrammetrie geschieht dies durch die Wiederherstellung der äusseren Orientierung der Messaufnahmen, d. h. der Bestimmung der räumlichen Positionen und Neigungen der Aufnahmekamera im Zeitpunkt der Momentaufnahme und der Bestimmung von Objektpunkten durch räumlichen Vorwärtsschnitt homologer Strahlen. Die Photogrammetrie benützt also zur Messung räumliche, zentralperspektive Strahlenbündel. Bemerkenswert dabei ist, dass die Wiederherstellung des Modells ohne Zuhilfenahme zusätzlicher, externer Messungen der Orientierungsparameter oder von Objektpunkten in einem beliebigen Massstab bei beliebiger Modell-Orientierung gelingt. Sie geschieht allein mit Hilfe identischer Bildpunkte eines Objektes in den verschiedenen Bildern, deren homologe Strahlen zum Schnitt gebracht werden.
In einem Aufsatz ‹Über den Wandel der geometrisch-algebraischen Modellvorstellung in der Photogrammetrie unter dem Einfluss computergestützter Auswerteverfahren› [13] hat H. Schmid den historischen Entwicklungsprozess dieser Orientierungsmethoden und der damit verbundenen Modellvorstellungen in prägnanter Form aufgezeigt. Das Modell mit seinem gesamten, in den Bildern enthaltenen Informationsinhalt ist invariant und kann mit Hilfe zusätzlicher Messungen, mindestens sieben, in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden.
H. Schmid formuliert die Aufgabe so: ‹Ganz allgemein ausgedrückt geht es bei der Auswertung von photogrammetrischen Aufnahmen darum, eine bestimmte Anzahl von Punkten des zu vermessenden Objekts in einem vorgegebenen Koordinatensystem gemeinsam mit den Orten der Aufnahme und deren Orientierung zu bestimmen.› Schmid zeigt nun sehr anschaulich und klar formuliert, dass für die Problemlösung der historische Entwicklungsprozess und die zur Verfügung stehenden technischen Mittel massgebend waren. Der Umweg über die zuerst vorzunehmende Bestimmung der sog. relativen Orientierung – mathematisch durch die Koplanaritätsbedingungen ausdrückbar – und die anschliessende absolute Orientierung, d. h. die Transformation in das vorgegebene geodätische Koordinatensystem, ist durch den Einsatz optisch-mechanischer Stereo-Messgeräte bedingt. Dagegen wird die Benützung der Kollinearitätsgleichungen

$$
\begin{aligned}
x_{i,N} &= c\,\frac{a_{11}(X_i - X_N) + a_{21}(Y_i - Y_N) + a_{31}(Z_i - Z_N)}{a_{13}(X_i - X_N) + a_{23}(Y_i - Y_N) + a_{33}(Z_i - Z_N)} = F_x(p_N, k_i) \\
y_{i,N} &= c\,\frac{a_{12}(X_i - X_N) + a_{22}(Y_i - Y_N) + a_{32}(Z_i - Z_N)}{a_{13}(X_i - X_N) + a_{23}(Y_i - Y_N) + a_{33}(Z_i - Z_N)} = F_y(p_N, k_i)
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

die den Einzelstrahl repräsentieren und sämtliche gewünschten Grössen – Bildkoordinaten $x_{i,N}$, $y_{i,N}$, Orientierungsparameter p_N und Modellkoordinaten k_i (unmittelbar im vorgegebenen geodätischen Koordinatensystem) – enthalten, durch die Leistungsfähigkeit der EDV möglich. H. Schmid leitet daraus die vorausschauende Aussage ab: ‹Dadurch wird der Einzelstrahl, der elementarste Baustein des simulierten Aufnahmevorgangs, nachgebildet. Damit können offensichtlich alle überhaupt denkbaren photogrammetrischen Messanordnungen ausgewertet werden... Von fundamentaler Bedeutung ist dabei die Tatsache, dass nur die digitale Auswertung den Prozess der Verarbeitung von überschüssigen Messungen im Sinne einer Ausgleichung gestattet... Natürlich ist das Problem der Weiterentwicklung (der digitalen Photogrammetrie) eng mit dem Begriff der automatischen Bildkorrelation verbunden...› – Das Gewicht dieser Aussagen kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Mit der Einführung der abtastenden, digitalen Bildaufnahme werden die oben angesprochenen Sachverhalte und Feststellungen höchst aktuell. Das Hauptproblem abtastender Bildaufnahmen für die Photogrammetrie ist der Verlust der räumlichen, zentralperspektiven Momentaufnahme, die bisher die geometrische Grundlage nahezu sämtlicher photogrammetrischer Auswerteprozesse bildet.

Im wesentlichen sind zwei Abtastprinzipien bekannt und im Gebrauch [6]:

a) Die optisch-mechanische Abtastung bedient sich eines quer zur Flugrichtung schnell bewegten Strahlenbündels, mit dem das Objekt von einem Detektor zeilenweise abgetastet wird.
b) Die opto-elektronische Abtastung, im englischen Sprachgebrauch als Push-broom-Prinzip bezeichnet, tastet das Objekt ebenfalls in Zeilen quer zur Flugrichtung ab, wobei aber die ganze Zeile gleichzeitig mit einem linearen, viele Einzeldetektoren enthaltenden Halbleiter-Sensor erfasst wird und mechanisch bewegte Teile vermieden werden.

Im Unterschied zur Photographie, die mit einer Momentaufnahme das ganze Objekt erfasst, werden bei der Abtastung die Helligkeits- bzw. Strahlungswerte des Objektes punkt- oder zeilenweise zeitlich nacheinander gemessen und in Form eines linearen, analogen oder digitalisierten Datenstromes registriert. Für viele Zwecke hat dieses Verfahren grosse Vorteile, so z. B. für Multispektralauswertungen und Fernübertragungen. Für geometrische, besonders für dreidimensionale Auswertungen ergaben sich daraus aber zunächst schwer lösbare Probleme. Sie bestehen vornehmlich darin, dass der Abtaststrahl bzw. das ebene Abtaststrahlenbündel zu jedem Zeitpunkt des Bildfluges infolge der unkontrollierten und nicht genau bekannten Bewegungen des Kameraträgers, Flugzeug oder Raumfahrzeug, eine nicht bekannte Orientierung hat. Im Vergleich zu dieser grundsätzlichen Schwierigkeit ist das der stereoskopischen Bildaufnahme mit Abtastern relativ unproblematisch. Es besteht auch für Abtaster die Möglichkeit, das Objekt aus mehreren Richtungen von verschiedenen Standpunkten aus und mit verschiedenen Mitteln aufzunehmen. Bereits 1972 schlug der Verfasser eine Zweizeilen-Stereo-Aufnahme mit einem Vidicon-Zeilen-Abtaster vor [5].

In die gleiche Richtung gingen die Vorschläge von Colvocoresses mit dem sog. MAPSAT-Projekt [1] und von Welsh mit dem Stereosat-Projekt [15], die beide eine Push-broom-Abtastung mit mehreren rechtwinklig zur Flugrichtung angeordneten Sensorzeilen vorsahen. Auch im Rahmen des französischen Fernerkundungsprogramms SPOT ist eine stereoskopische Push-broom-Abtastung der Erdoberfläche vorgesehen, wobei mit Hilfe eines Schwenkspiegels vor der Kamera der gleiche Geländestreifen von parallel versetzten Flugbahnen aus unter verschiedenem Perspektivwinkel abgetastet wird.

Entsprechende Vorschläge für Stereoaufnahmen mit optisch-mechanischen Abtastern gibt es z. B. von Lorenz [12] und Jerie [11].

Bei allen diesen Konzeptionen ist jedoch das Problem der strengen geometrischen Auswertung mit Hilfe eines analytisch-photogrammetrischen Prozesses nicht gelöst. In den Arbeiten von Konecny, der die geometrischen Aspekte der Aufnahme und Auswertung von Abtastern eingehend untersuchte (z. B. [9]), kommt dieser Sachverhalt deutlich zum Ausdruck. Er stellt fest, dass die geometrische Auswertung von Stereo-Abtastaufnahmen nur möglich ist, wenn die Daten der äusseren Orientierung als Funktion der Zeit in den Aufnahmestandpunkten längs des Flugweges bekannt bzw. gemessen sind. Das erfordert eine entsprechend genaue Stabilisierung und/oder laufende Vermessung der äusseren Orientierungsparameter, wobei sowohl die Stabilisierung als auch die Messung in der Regel aufwendig sind, z. B. sieht das MAPSAT-Projekt hierfür u. a. Sternsensoren, Drallrad-Stabilisierung und hochgenaues Tracking vor. Im allgemeinen dürfte die Messung der Orientierungsdaten genauer und weniger aufwendig sein als die Stabilisierung.

Um die direkte Messung der äusseren Orientierungsdaten zu umgehen, schlägt Konecny u. a. die Abstützung auf Passpunkte vor, mit deren Hilfe über eine komplexe Streifentriangulation die Orientierungsparameter indirekt bestimmt werden. Damit ergibt sich allerdings wieder die Notwendigkeit, aus einer bekannten Referenzunterlage Geländepunkte mit identischen Bildpunkten der Abtastaufnahme zu identifizieren und ihre Koordinaten zu vermessen. Ebner und Hössler [3] verwenden bei der Entzerrung Kollinearitätsgleichungen für die Passpunkte, setzten die Orientierungsparameter aller Bildzeilen als Unbekannte an und verknüpfen sie durch Gauss-Markow-Prozesse. Kraus [10], Göpfert [4] und andere Autoren entwickelten und benützen rein empirische Verfahren. Danach werden aufgrund von Passpunkten die abgetasteten Bildstreifen maschenweise entzerrt, ohne dass der funktionale Zusammenhang zwischen Verzerrung und Orientierungsdaten sowie den Geländehöhen berücksichtigt wird. Über diese Vorschläge hinaus sind von anderen Autoren weitere Anregungen für die geometrische Auswertung von Abtastaufnahmen gemacht worden, die hier vorgestellten Beispiele decken nicht das breite Spektrum dieser Bemühungen ab.

Der erste Ansatz zur Lösung des vorliegenden Problems stammt von Dereny [2], der vorschlug, mit einer Triple-Strip-Line-Kamera aus homologen Punkten dreier Bildstreifen die Orientierungsparameter der Kamera zu bestimmen, also ohne Zuhilfenahme externer Daten. Allerdings sind die Möglichkeiten dieses Verfahrens stark eingeschränkt. Dereny schreibt hierzu: ‹Die einzig bedeutungsvolle Schwäche des Drei-Streifen-Verfahrens liegt in der Schwierigkeit, die gewünschte Zahl von Orientierungspunkten exakt auf einer Zeile anzuordnen.›

Es ist merkwürdig, dass dieser Ansatz offenbar weder von Dereny selbst weiterverfolgt noch von anderer Seite aufgegriffen wurde. Ohne diese Arbeit von Dereny zu kennen, machte der Verfasser, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fa. Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB), München, 1979 den Vorschlag, die Stereo-Abtastaufnahme mit drei hochauflösenden Linear-Sensoren A, B, C, die quer zur Flugrichtung angeordnet sind, durchzuführen und auf rein analytischem Wege, ohne externe Hilfsmessungen, die Orientierungsparameter längs des Flugweges und das digitale Geländemodell zu bestimmen (Abb. 1). Die ersten Überlegungen beruhten auf der Vorstellung, dass durch die drei Sensorzeilen die Bildebene partiell wieder hergestellt ist und jeder Zeilentakt als Momentaufnahme (Dreizeilenbild) verstanden werden kann. Geht man ferner davon aus, dass

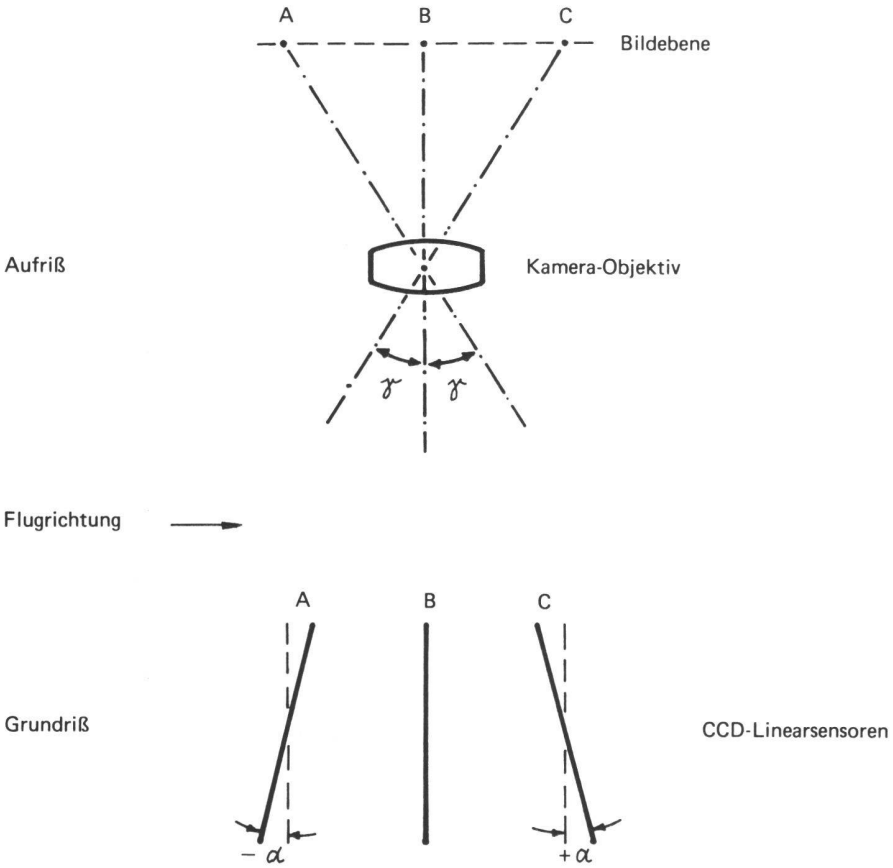

Abb. 1 Drei-Zeilen-Kamera

das zurückliegende Streifenmodell zu jedem Taktzeitpunkt oder zumindest in engen Intervallen, innerhalb deren genügend genau interpoliert werden kann, bestimmt ist, dann kann mit Hilfe des bekannten Folgebildanschlusses jedes neue ‹Zeilenbild› an die zurückliegenden Zeilenbilder hinzu orientiert werden. Dies geschieht durch den Schnitt von mindestens fünf homologen Strahlen und Massstabsanschluss. Der wesentliche Unterschied zur konventionellen Methode besteht nur darin, dass die korrespondierenden Strahlen des bereits bestimmten Modells normalerweise nicht nur einem Bild, sondern verschiedenen ‹Zeilenbildern› angehören.

Man kann nun diesen sukzessiven Prozess des Zeilenbildanschlusses durch die gleichzeitige Bestimmung sämtlicher Unbekannten in einer Streifen-Ausgleichung mit vielen überschüssigen Beobachtungen ersetzen, wobei die Bildkoordinaten der homologen Strahlen der drei Bildstreifen durch automatische Flächenkorrelation zu ermitteln sind. Auf diese Weise umgeht man auch das Problem der Streifenanfangs-Bestimmung.

Bei diesen grundsätzlichen Überlegungen entstanden aber Bedenken bezüglich der Eindeutigkeit, Stabilität und Lösbarkeit des Normalgleichungssystems. Stellt man sich nämlich über ebenem Gelände einen ungestörten Geradeausflug vor, dann entsteht die in Abb. 2 dargestellte Situation. Jedes Zeilenbild bildet mit dem jeweils in einem Basisabstand b folgenden Zeilenbild eine eindeutig bestimmte, räumliche Triangulationskette. Das gleiche gilt auch für das benachbarte Zeilenbild und seine ebenfalls im Abstand b folgenden Zeilenbilder usw. Das bedeutet, dass das Streifenmodell aus vielen gleichartigen Zeilenbildketten zusammengesetzt ist, deren Zahl der Zahl der Zeilenbilder innerhalb einer Basis b entspricht. Nun hängen zwar die Zeilenbilder einer Kette miteinander zusammen, aber die Zeilenketten untereinander haben keinen Bezug, und sie können gegeneinander verschoben werden. Die Überlegung zeigt, dass das bei unebenem Gelände nicht mehr möglich ist.

Um dieser Abhängigkeit und Schwierigkeit zu entgehen, schlug der Verfasser eine schräge Anordnung der beiden äusseren Linearsensoren A und C gegenüber dem mittleren Sensor B um den Winkel $\pm\ \alpha$ vor (Abb. 1). In der entsprechenden Patentanmeldung [7] sind auch andere Varianten der Zeilengeometrie vorgesehen. Es findet durch die sich kreuzenden Bildzeilen der drei überlagerten Bildstreifen eine enge Verbindung benachbarter Bildzeilen und zwischen den drei Bildstreifen statt, so dass eine Stabilisierung des gesamten Streifenmodells herbeigeführt wird.

Für die mathematische Formulierung der Strahlenschnitte stehen zwei Alternativen zur Verfügung: Der Verfasser benützte anfänglich für die Rekonstruktion des Streifenmodells die Koplanaritätsgleichungen. Jeder durch Bildkorrelation definierte Geländepunkt ist durch drei Bildstrahlen bestimmt, und für die drei möglichen Strahlenkombinationen sind jeweils Koplanaritätsgleichungen aufzustellen. Damit werden zuerst die Orientierungsparameter bestimmt, und anschliessend erfolgt die Berechnung der digitalen Geländepunkte durch räumlichen Vorwärtsschnitt.

H. Ebner, der im Rahmen dieser Entwicklungsarbeiten für MBB beratend tätig war, empfahl jedoch, von den Kollinearitätsgleichungen (1) auszugehen, da die entsprechenden Beobachtungsgleichungen

$$v = F(p, k) - x \qquad (2)$$

neben dem gemessenen Bildkoordinatenvektor x sämtliche gesuchten Unbekannten, nämlich den Orientierungsvek-

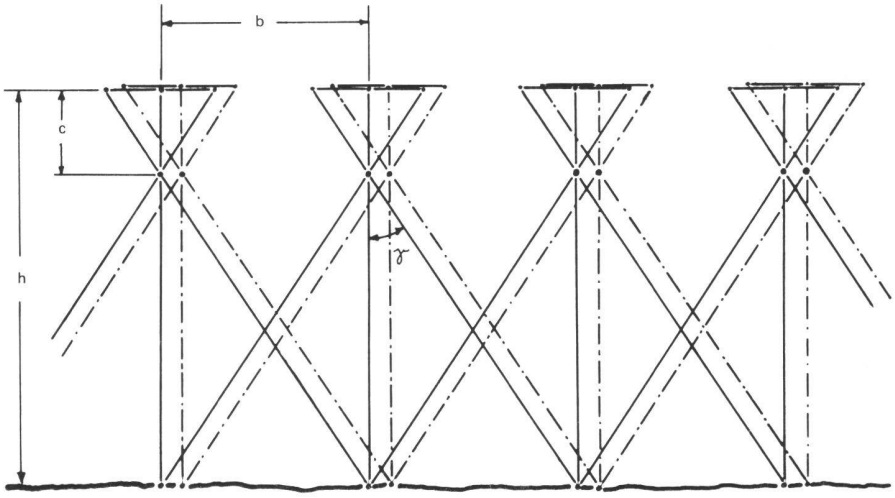

Abb. 2 Geländeaufnahme mit der Drei-Zeilen-Kamera

tor p und den Geländekoordinatenvektor k, enthalten. Die Orientierungsparameter p beziehen sich auf Aufnahmestützpunkte P_j, die in beliebigem Abstand auf der Flugbahn angeordnet sind, da nicht für jeden Zeilentakt N die Orientierungsparameter bestimmt werden können. Die individuellen, jedem Zeilentakt N bzw. Geländepunkt P_i zugeordneten Orientierungsparameter p_N sind Funktionen der Orientierungsparameter in den benachbarten Aufnahmestützpunkten P_j. Im einfachsten Fall wird linear interpoliert.

Mit diesem neuen Ansatz wurden die Beobachtungs- und Normalgleichungssysteme aufgestellt. Das Normalgleichungssystem wird so reduziert, dass es nur noch die Orientierungsparameter als Unbekannte enthält. Das reduzierte System weist Bandstruktur auf, und seine Koeffizienten lassen sich unmittelbar aus den Beobachtungen ermitteln. Die Auflösung nach einem Verfahren, das auf Cholesky zurückgeht, liefert die Orientierungsparameter p in den Aufnahmestützpunkten P_j. Durch Rückwärtseinsetzen der Parameter p erhält man die Koordinaten k der Geländepunkte P_i. Für die Genauigkeitsbestimmung wurden die Gewichtskoeffizienten Q_{xx} von p und k formuliert. Diese Methode ist aus der Bündelausgleichung photogrammetrischer Blöcke bekannt und bewährt.

Die Genauigkeit z. B. der Höhe Z_i eines Geländepunktes P_i kann durch den Ausdruck

$$\sigma_{Zi} = \sigma_0 \frac{h}{c} \sqrt{Q'_{ZiZi}} \qquad (3)$$

allgemeingültig dargestellt und für beliebige Modellkonfigurationen berechnet werden.

σ_0 ist hier der mittlere Bildkoordinatenfehler, der die Kalibrierungsfehler der Kamera, die Korrelationsfehler sowie die Interpolationsfehler zwischen den Aufnahmestützpunkten enthält; h ist die Flughöhe, c die Kammerkonstante. Der um die Bildmassstabszahl h/c reduzierte Gewichtskoeffizient Q'_{xx} bringt die Auswirkungen der anderen Aufnahmeparameter zur Geltung: Sensorgeometrie, Streifenbreite und -länge, Bild- und Konvergenzwinkel, Abstand der Aufnahmestützpunkte, die Intervallgrösse der für die Modellrekonstruktion benützten Geländepunkte und der Modellhöhenunterschiede. Der Verfasser programmierte ein Simulationsmodell und die Modellrekonstruktion nach der o. g. Methode und untersuchte mit den verschiedensten Aufnahmeparametern systematisch ihre Genauigkeitseinflüsse. Die Darstellung dieser Ergebnisse übersteigt den Rahmen dieses Aufsatzes, sie wird daher Gegenstand einer besonderen Veröffentlichung sein. Hier soll lediglich über die grundlegenden Ergebnisse bezüglich der Sensorgeometrie, d. h. der schräg angeordneten Linear-Sensoren A und C, berichtet werden, da sie von elementarer Bedeutung für das System sind.

Die Abb. 3 zeigt als Beispiel die Höhenfehler eines Modells in der Streifenachse. Wegen des symmetrischen Fehlerverlaufes sind die Fehler nur bis zur halben Streifenlänge dargestellt. Daraus ist zu ersehen, dass mit parallelen Sensoren ($\alpha = 0$) periodische Höhenfehler mit beträchtlichen Amplituden auftreten. Für die Lagefehler gilt das gleiche. Sie sind am Streifenanfang am grössten und nehmen nach der Streifenmitte hin ab. Besonders auffällig ist die Periodizität der Fehler, deren Periodenlänge einer Basislänge $b = h \cdot \tan \gamma$ entspricht, worin h die Flughöhe und γ den Konvergenzwinkel darstellt (Abb. 2). Unter bestimmten Umständen, die hier nicht näher erläutert werden, steigen die Fehleramplituden weiter an bis zur Unlösbarkeit des Normalgleichungssystems. Dagegen werden mit schräg angeordneten Sensoren A und C sowohl die Welligkeit als auch die absoluten Beträge der Fehleramplituden drastisch reduziert.

Das Modell ist in sich sehr steif und invariant und könnte in einem örtlichen System in beliebigem Massstab ganz ohne Passpunkte rekonstruiert werden. Im vorliegenden Beispiel wurde das

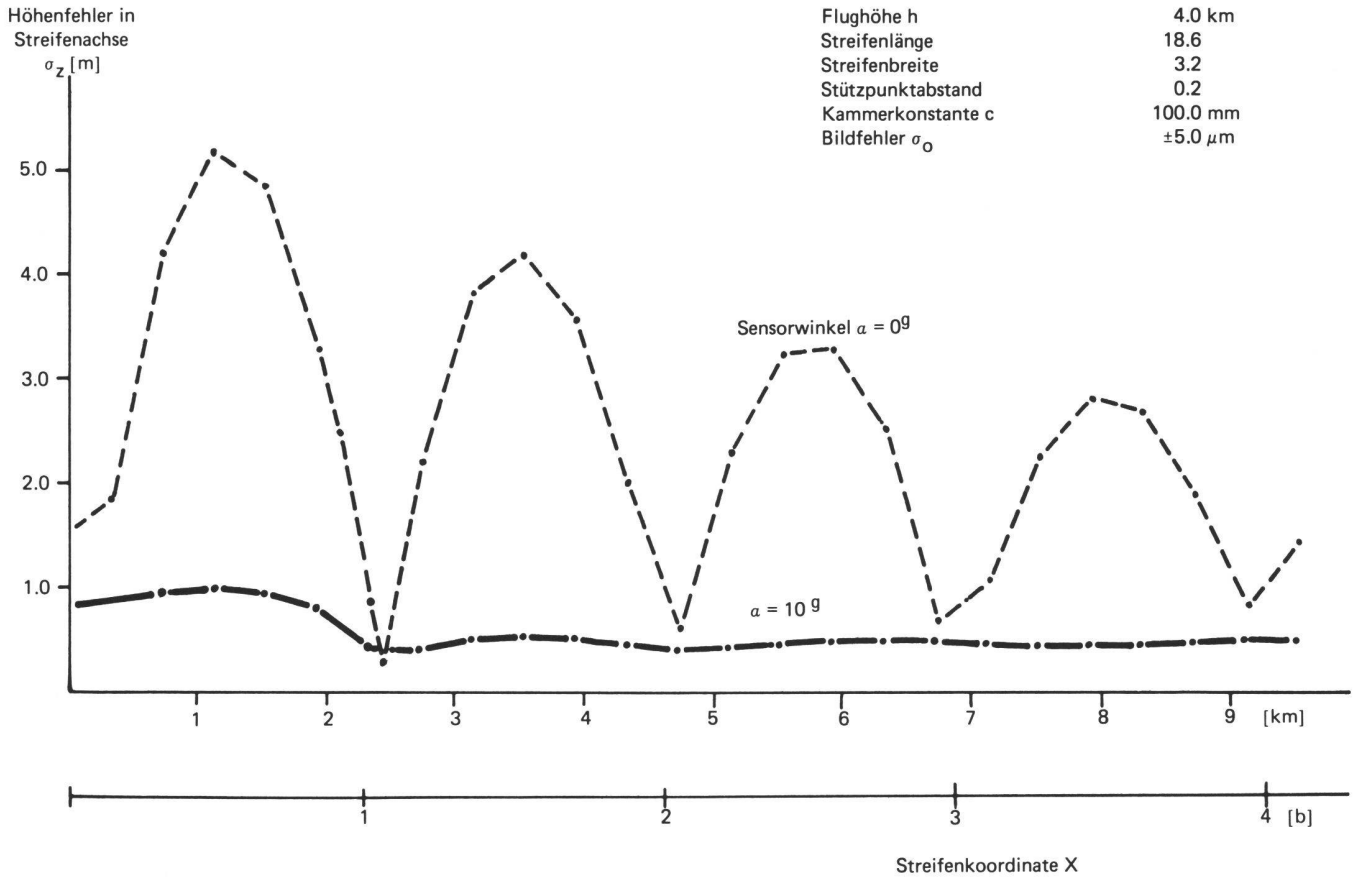

Abb. 3 Gelände-Höhenfehler in Abhängigkeit von der Sensor-Geometrie

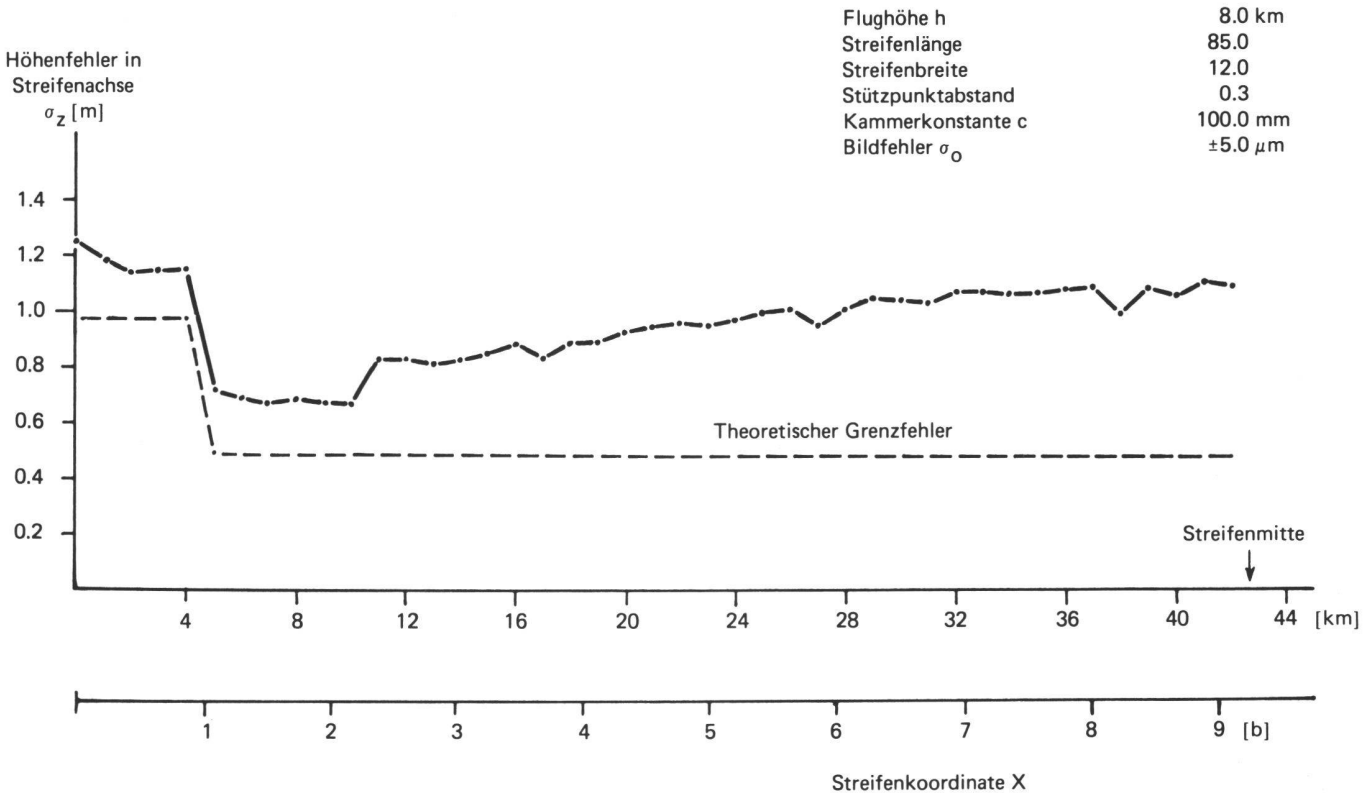

Abb. 4 Gelände-Höhenfehler eines langen Bildstreifens

Modell mit vier Passpunkten in den Modellecken absolut orientiert.
Damit ist die Gültigkeit der am Anfang stehenden, rein theoretischen Überlegungen bezüglich der Zeilengeometrie experimentell bewiesen. Es stellt sich weiter heraus, dass selbst für grosse Streifenlängen eine gleichmässige Genauigkeit der Modellkoordinaten erreicht wird, die in der Nähe der theoretischen Grenze liegt, die bei fehlerfreier Orientierung nur durch die Bildfehler gegeben ist. Die Fehler wachsen nach der Streifenmitte hin nur geringfügig an (Abb. 4) und könnten mit einem einzigen Passpunkt in Streifenmitte völlig egalisiert werden. Die Fehler an den Streifenrändern unterscheiden sich nur wenig von denen in der Streifenachse. Für die mittleren Fehler über den ganzen Streifen ohne die 0-Fehler in den Passpunkten ergeben sich folgende Werte:

X GEN = ± 0,57 m
Y GEN = ± 0,69 m
Z GEN = ± 1,00 m

Der mittlere Höhenfehler liegt daher bei etwa ± 0,12‰ der Flughöhe. Die grosse, gleichmässige Genauigkeit erklärt sich aus der grossen Zahl der korrelierten, homologen Bildstrahlen, der Überlagerung einer grossen Zahl von Triangulationsketten und dem dreifachen Strahlenschnitt für jeden Geländepunkt (mit Ausnahme von Streifenanfang und -ende).

Zunächst war dieses mit DPS = ‹Digitales Photogrammetriesystem› bezeichnete Verfahren nur für die geometrische Auswertung von Push-broom-Aufnahmen mit einer Dreizeilenkamera vorgesehen. Es lässt sich aber prinzipiell und ohne nennenswerte Änderung des Modell-Rekonstruktionsprogramms auch für die Auswertung von optisch-mechanischen oder anderen Abtastern anwenden, sofern durch geeignete Vorrichtungen die Richtungen von drei konvergierenden Abtaststrahlen zu jedem Zeitpunkt mit den entsprechenden Bildpunktsignalen und Taktzeiten des Abtasters synchronisiert sind. Das ermöglicht den Einsatz des DPS auch für Infrarot- und Mikrowellen-Abtaster.
Diese Entwicklung demonstriert, dass entsprechend den Überlegungen von H. Schmid der einzelne Messstrahl in zeitlicher Zuordnung zum elementaren Baustein einer neuen Photogrammetrie wird. Mit dem DPS gelingt es erstmalig, ohne externe Hilfsdaten, das mit einer Dreizeilenkamera aufgenommene Streifenmodell allein aus den Bilddaten exakt zu rekonstruieren. Das Verfahren wurde zuerst 1982 publiziert [8]. Die Entwicklungsarbeiten für das DPS wurden von MBB und vom Bundeswehrbeschaffungsamt der Bundesrepublik Deutschland finanziert und gefördert. In Verbindung mit der automatischen Korrelation und der EDV kann sich das DPS zu einer sehr leistungsfähigen und flexiblen Methode für weite Anwendungsbereiche entwickeln.

Der für die geometrische Auswertung besonders wichtige Vorteil ist die Tatsache, dass bereits bei der Aufnahme mit Hilfe hochauflösender linearer Silizium-Detektoren, deren Lage in der Bildebene sehr stabil ist und mit hoher Genauigkeit kalibriert werden kann, eine geometrisch genaue digitale Registrierung der Bildpunktkoordinaten für jeden einzelnen Bildpunkt stattfindet, so dass bei der weiteren Auswertung lediglich eine Bildpunkt-Identifizierung durch den Rechner (durch Korrelation) oder visuell erfolgen muss. Ein besonderes Stereo-Messgerät für die Auswertung erübrigt sich, das primäre Werkzeug für die Auswertung ist der Rechner, dem u. a. mit der automatischen Korrelation eine wesentliche Automatisierungsaufgabe für die Erstellung des digitalen Höhenmodells zufällt. Für die interaktive Korrelationsunterstützung, für Interpretationen und Lage-Auswertungen ist ein Stereo-Bildschirm praktisch unentbehrlich.

Literatur

[1] Colvocoresses, A. P.: Proposed Parameters for Mapsat, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 45, 1979, No. 4, pp. 501–506

[2] Derenyi, E. E.: Relative Orientation of Continuous Strip Imagery, Doctoral Dissertation, University of New Brunswick, 1970

[3] Ebner, H., Hössler, R.: The Use of Gauss-Markow-Processes in Digital Rectification of Remote Sensing Data, ISP-Com. III Symposium, Moscow 1978, Proceedings 258–265

[4] Göpfert, W.: High-precision Scanner Imagery Rectification Using Dynamic Meshes of Digitally Correlated Pass Points, Image Processing-Interactions with Photogrammetric and Remote Sensing, Proceedings, Graz, 1977, erschienen in den Mitteilungen der Geodätischen Institute der TU Graz

[5] Hofmann, O.: Ein neues multispektrales Satelliten-Bildaufnahmesystem, Bildmessung und Luftbildwesen 1/72, S. 47–55

[6] Hofmann, O.: Bildgüte aktiver und passiver Abtaster, Bildmessung und Luftbildwesen 3/83, S. 103–117

[7] Hofmann, O.: Deutsche Patentschriften DE 29 40 871 C2 und DE 30 43 577 C2

[8] Hofmann, O., Navé, P., Ebner, H.: DPS – A Digital Photogrammetric System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery, ISP-Symposium, Com III, Helsinki 1982 und Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 80, Aug. 1984, pp. 1135–1142

[9] Konecny, G.: Geometrical Aspects of Remote Sensing, ISP-Congress, Com. IV, Ottawa 1972

[10] Kraus, K.: Entzerrung von Multispektralbildern, Bildmessung und Luftbildwesen 4/1975, S. 129–134

[11] Jerie, H.G.: Proposal for a Modification of Line Scanners and Panoramic Cameras for the Acquisition of Stereo Imagery, ISP-Congress, Com. I, Helsinki 1976

[12] Lorenz, D.: Ein Zweistrahl-Infrarot-Zeilenabtaster für stereoskopische Wärmebilder, Bildmessung und Luftbildwesen 3/1972, S. 120–122

[13] Schmid, H.: Über den Wandel der geometrischen-algebraischen Modellvorstellung in der Photogrammetrie unter dem Einfluss computergestützter Auswerteverfahren, Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 7–8/1979, S. 197–205

[14] Schwidefsky, K., Ackermann, F.: Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1976

[15] Welch, R.: Cartographic Potential of a Spacecraft Line-Array Camera System: Stereosat, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, 1981, No. 8, pp. 1173–1185

Adresse des Verfassers:
Dr. Otto Hofmann
Messerschmidt-Bölkow-Blohm/AK 031
Postfach 801149, D-8000 München 80

Invariante Grössen bei Datumstransformationen

K. R. Koch

1. Datumsdefinition

Für eine geodätische Triangulation muss in der Regel ein Datum definiert werden. Dies war auch der Fall für die weltweite geometrische Satelliten-Triangulation, die unter der Leitung von Prof. H. Schmid in den Jahren 1966 bis 1973 aufgebaut wurde [Schmid 1974 a, b]. Mit einer solchen Triangulation werden die geometrischen Beziehungen zwischen den Punkten an der Erdoberfläche hergestellt, um dann als Ergebnis die Koordinaten der Triangulationspunkte in einem vorgegebenen Koordinatensystem auszudrücken. In der Regel bedarf es aber zusätzlicher Information, um die Lage des Triangulationsnetzes in bezug auf das Koordinatensystem anzugeben. Beispielsweise muss bei einem dreidimensionalen Netz über drei Translationen und drei Rotationen und eventuell noch über den Massstab verfügt werden, um das dreidimensionale Netz in dem vorgegebenen Koordinatensystem festzulegen. Eine solche Verfügung bezeichnet man als Datumsdefinition.

Für die weltweite geometrische Satelliten-Triangulation war die Translation und eine Rotation einzuführen [Schmid 1974 a, S. 79]. Die Datumsdefinition beeinflusst die Varianzen und Kovarianzen der Schätzwerte der Koordinaten, und die Diskussionen über dieses Problem von Prof. H. Schmid mit den Mitarbeitern des von ihm geleiteten Geodetic Research and Development Laboratory des National Geodetic Survey sind dem Autor dieses Beitrages noch in bester Erinnerung, der sich glücklich schätzt, von 1968 bis 1974 zunächst in einer Dauerstelle und dann in Teilzeitbeschäftigungen Mitglied dieses Geodetic Research and Development Laboratory gewesen zu sein.

Im folgenden soll untersucht werden, welche Grössen in einer geodätischen Triangulation invariant gegenüber den Datumsdefinitionen sind. Dies ist besonders dann von Interesse, wenn Hypothesen getestet werden, beispielsweise in den Triangulationsnetzen für die Deformationsanalyse. Zunächst aber soll auf die Transformationen eingegangen werden, die den Übergang von einer Datumsdefinition zu einer anderen ermöglichen.

2. Datumstransformation

Für Triangulationsnetze, in denen ein Datum zu definieren ist und die bekanntlich als freie Netze bezeichnet werden, führt die Schätzung der unbekannten Parameter auf ein Gauss-Markoff-Modell mit nicht vollem Rang

$$\underline{X}\underline{\beta} = E(\underline{y}) = \underline{y} + \underline{e} \qquad (2.1)$$

$$\text{mit } \operatorname{rg} \underline{X} = q < u \text{ und } D(\underline{y}) = \sigma^2 \underline{I}$$

in dem $\underline{X}$ die $n \times u$ Koeffizientenmatrix, $\underline{\beta}$ der $u \times 1$ Vektor unbekannter Parameter, $\underline{y}$ der $n \times 1$ Vektor der Beobachtungen, $\underline{e}$ der $n \times 1$ Vektor der Fehler, q der Rang der Matrix $\underline{X}$, σ^2 die Varianz der Gewichtseinheit und $E(\underline{y})$ und $D(\underline{y})$ der Erwartungswertvektor und die Kovarianzmatrix von $\underline{y}$ bedeuten. Das spezielle Modell (2.1) mit unkorrelierten Beobachtungen gleicher Varianzen ergibt sich durch Homogenisierung aus einem allgemeinen Modell mit korrelierten Beobachtungen ungleicher Varianzen.

In dem Modell (2.1) sind die unbekannten Parameter $\underline{\beta}$ nicht erwartungstreu schätzbar. Um schätzbare Grössen zu erhalten, werden anstelle von $\underline{\beta}$ die projizierten Parameter $\underline{\beta}_p$ eingeführt mit [Koch 1980, S. 171]

$$\underline{\beta}_p = (\underline{X}'\underline{X})^- \underline{X}'\underline{X}\underline{\beta} \qquad (2.2)$$

worin $(\underline{X}'\underline{X})^-$ eine generalisierte Inverse der Normalgleichungsmatrix $\underline{X}'\underline{X}$ bedeutet. Mit einer symmetrischen reflexiven generalisierten Inversen $(\underline{X}'\underline{X})^-_{rs}$ von $\underline{X}'\underline{X}$ mit

$$(\underline{X}'\underline{X})^-_{rs} = (\underline{X}'\underline{X})^- \underline{X}'\underline{X}[(\underline{X}'\underline{X})^-]' \qquad (2.3)$$

lässt sich wegen $\underline{X}' = \underline{X}'\underline{X}[(\underline{X}'\underline{X})^-]'\underline{X}'$ die Projektion (2.2) umschreiben in die Projektion

$$\underline{\beta}_p = (\underline{X}'\underline{X})^-_{rs}\underline{X}'\underline{X}\underline{\beta} \qquad (2.4)$$

mit der im folgenden gearbeitet wird. Die beste lineare erwartungstreue Schätzung $\hat{\underline{\beta}}_p$ von $\underline{\beta}_p$ ergibt sich zu

$$\hat{\underline{\beta}}_p = (\underline{X}'\underline{X})^-_{rs}\underline{X}'\underline{y} \quad \text{mit} \quad D(\hat{\underline{\beta}}_p) = \sigma^2(\underline{X}'\underline{X})^-_{rs} \qquad (2.5)$$

Die Wahl der generalisierten Inversen in (2.4) für die Projektion entspricht der Definition des Datums für das Triangulationsnetz. Dies kann man wie folgt zeigen. Eine generalisierte Inverse $(\underline{X}'\underline{X})^-_{rs}$ lässt sich ermitteln aus [Koch 1980, S. 59]

$$\begin{vmatrix} \underline{X}'\underline{X} & \underline{B}' \\ \underline{B} & \underline{O} \end{vmatrix}^{-1} = \begin{vmatrix} (\underline{X}'\underline{X})^-_{rs} & \underline{E}'(\underline{B}\underline{E}')^{-1} \\ (\underline{E}\underline{B}')^{-1}\underline{E} & \underline{O} \end{vmatrix} \qquad (2.6)$$