

DIGITALE BILDVERARBEITUNG IN DER PHOTOGRAMMETRISCHEN STEREOAUSWERTUNG

F. Ackermann, Stuttgart

1. Einleitung

1.1 Digitale Bildverarbeitung bezieht sich auf digitale oder digitalisierte Bilder. Der Begriff des Bildes ist dabei weit gefaßt. Wir können darunter für unsere Zwecke 2-dimensionale Intensitätsverteilungen von beliebigen physikalischen Signalen verstehen, die "Abbildungen" von Objekten, Zuständen oder Vorgängen vermitteln. Traditionelle Leitvorstellung, die unseren Bereich weitgehend abdeckt, ist ein optisches Bild bzw. seine Registrierung (= Speicherung) als Fotografie.

Die Digitalisierung eines Bildes besteht in seiner Diskretisierung und Quantisierung. Die Diskretisierung besteht in der Auflösung des 2-dimensionalen Kontinuums in hinreichend kleine, diskrete Flächenelemente, die üblicherweise ein regelmäßiges Raster bilden und als "Pixel" bezeichnet werden. Unter Quantisierung verstehen wir die Zuordnung von einem oder mehreren Zahlenwerten zu jedem Pixel, mit denen die (Mittelwerte über das jeweilige Pixel der) Intensitätswerte (oder Farbwerte, Wellenlängen, Polarisation o. ä.) der Bildsignale gekennzeichnet werden. Wenn insbesondere die Anordnung der Pixel einem Rechteckraster entspricht, lassen sich die jeweiligen Merkmalswerte des Bildes oder Bildausschnittes als Matrix darstellen und rechnerisch weiterbehandeln.

Die digitale Bildverarbeitung kann sich auf unmittelbar digital registrierte oder auf nachträglich digitalisierte Bilder beziehen. Unter digitaler Bildverarbeitung versteht man allgemein die weitere rechnerische Behandlung und Umwandlung der digitalen Bilder, die Analyse von Bildstrukturen und die Bildinterpretation, d. h. Rückschlüsse über Art, Lage, Zustand oder Veränderung der abgebildeten Objekte. Die Transformationen können sich dabei sowohl auf die Bildgeometrie (Pixel, Diskretisierung) als auch auf die Radiometrie (die jeweilige Signalcharakteristik, Quantisierung) beziehen.

1.2 Obige Umschreibung der digitalen Bildverarbeitung, die noch längst keine allgemeine Definition darstellt, zeigt schon, daß wir es mit einem sehr weitgespannten Komplex zu tun haben. Tatsächlich ist Bildverarbeitung ein derzeit in vielen Bereichen der Technik und Naturwissenschaft höchst aktuelles Thema. Wir kennen alle die Anwendung der Bildverarbeitung in der Fernerkundung, speziell mit den Landsat-Multispektral-Abtasteraufnahmen oder Radar-Abtastern. Die Aufgaben der Bildverbesserung und -verstärkung, der Transformation, der Bildvergleiche und der Multispektral-Klassifizierung sind uns geläufig. Ebenso ist uns vertraut, daß die Anwendungen auf Umwelt-Bestandsaufnahmen und -überwachung, Ressourcenerkundung und Informationsgewinnung allgemein in den Bereich der Geowissenschaften zielen.

Bildverarbeitung in der Fernerkundung stellt jedoch nur einen der größeren Sektoren der Anwendung dar. Ebenso gewichtige und eigenständige Entwicklungen können aus dem Bereich der Medizin und der Fertigungstechnik genannt werden. Sehende Roboter sind Gegenstand größten Interesses in der Industrie.

All diesen Entwicklungen und Anwendungen ist gemein, daß sie mit sehr großen Datenmengen zu tun haben und entsprechend komplexe Hardware-Systeme und Programme der Bildverarbeitung erfordern. Ein gewöhnliches Luftbild umfaßt etwa $1,3 \times 10^8 \approx 2^{27}$ Pixel von $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ Ausdehnung, wobei zusätzlich bei Schwarzweißbildern $256 = 2^8$ Helligkeitsstufen pro Pixel unterschieden werden.

1.3 Bei der Entwicklung und Anwendung der digitalen Bildverarbeitung in der Fernerkundung stand die Photogrammetrie im engeren Sinne abwartend daneben und zwar aus zwei Gründen: (1) Die Bildverarbeitungssysteme waren aufwendig und nicht in die üblichen Arbeitsverfahren, wie z. B. Kartierungen, integrierbar. (2) Nach Inhalt und Genauigkeit gingen diese Entwicklungen weitgehend an den klassischen Aufgabenstellungen der Photogrammetrie vorbei. Insbesondere standen hochgenaue geometrische Messungen nicht im Vordergrund, obwohl sie methodisch und technisch in der allgemeinen Bildverarbeitung enthalten sind bzw. sogar nur einen sehr kleinen Ausschnitt darstellen.

Mit dieser Feststellung ist schon zum Ausdruck gebracht, daß sich diese Situation neuerdings geändert hat. Von photogrammetrischer Seite sind Entwicklungen im Gange mit dem Ziel, die digitale Bildverarbeitung zur Lösung der elementaren Meßaufgaben der Photogrammetrie heranzuziehen. Zunächst geht es dabei nur um die Messung von x- und y-Parallaxen oder um die Messung von Bildkoordinaten. Es handelt sich also um die elementaren geometrischen Messungen der Stereo-Photogrammetrie in der Anwendung auf Luftbilder. Hierbei konzentriert sich die Entwicklung auf die digitale

Korrelation lokaler Bildausschnitte, d. h. auf ein sehr spezielles Problem der Bildverarbeitung. Wesentliche Randbedingung ist dabei allerdings die Integration des Verfahrens in den konventionellen photogrammetrischen Auswerteprozess insbesondere am analytischen Plotter.

Nachfolgend werden im Sinne einer einleitenden Übersicht Methoden und Leistungen dieser auf photogrammetrische Anwendungen bezogenen Entwicklung dargelegt. Gleichzeitig wird damit ein Rahmen für dieses Schwerpunktthema der Photogrammetrischen Woche abgesteckt, in den sich die weiteren Vorträge einordnen. Zunächst konzentrieren sich die Darlegungen auf die entsprechenden Entwicklungen in Stuttgart.

2. Digitale Korrelation lokaler Bildausschnitte

2.1 Die hier zur Diskussion stehenden Entwicklungen gehen von einer sehr beschränkten Problemstellung aus. Sie zielen zunächst nur auf die Korrelation lokaler Bildausschnitte zum Zwecke der Parallaxenmessung.

Die Lösung dieses Problems erwies sich als mit einfachen Mitteln machbar und ergab unerwartet gute Genauigkeiten. Die Verbindung eines derartigen Systems mit einem analytischen Plotter eröffnete die Möglichkeit, die digitale Bildkorrelation in praktikabler Weise zur Lösung der elementaren photogrammetrischen Meßoperationen einzusetzen und gleichzeitig die Integration mit der sonstigen Stereo-Auswertung herzustellen.

Im folgenden wird der Rahmen dieser Entwicklung abgesteckt und werden die nachfolgenden Vorträge eingeordnet, welche die bisherigen Ergebnisse darbieten und die weiteren Entwicklungen und die zu lösenden Probleme skizzieren. Die Ausführungen im ersten Teil beziehen sich direkt auf unsere Stuttgarter Entwicklungen, die seit einigen Jahren im Gange sind. Sie sind weder konzeptionell noch methodisch neu gewesen, haben aber in den speziellen Realisierungen offenbar den Anstoß zu einer Entwicklung gegeben, die in der photogrammetrischen Stereo-Auswertung rasch große Bedeutung erlangen dürfte.

2.2 Um Parallaxen in Stereo-Bildpaaren zu bestimmen, genügt es, jeweils nur kleine zugeordnete Bildausschnitte zu betrachten. Die zugeordneten Bildausschnitte seien in einer der Bildauflösung angemessenen Form (z. B. 20 μ m Pixelgröße) digitalisiert und liegen z. B. als Grauwert-Matrizen vor. Zunächst wird angenommen, die Bildausschnitte überlappen hinreichend, d. h. umfassen praktisch denselben Objektausschnitt. Diese Annahme stellt ein eigenes Problem dar, auf das gesondert eingegangen wird.

Das Problem ist nun, beide homologen Bildausschnitte durch ein sog. "window-matching" optimal zur Fusion zu bringen, d. h. die Grauwert-Matrizen in einer bestmöglichen Anpassung aufeinander zu transformieren. Die dabei auftretenden Translationen können - abhängig vom Koordinatensystem - als die gesuchten Parallaxen betrachtet werden.

In diesem Zusammenhang sind Entscheidungen bezüglich dreier Problemkomplexe zu fällen:

- (1) Das "optimale" window-matching wird häufig als diejenige Position bzw. Transformation definiert, bei der der Kreuzkorrelationskoeffizient der zugeordneten Grauwerte ein Maximum erreicht. Wir haben in unserem Fall statt dessen das - unter gewissen Voraussetzungen damit gleichwertige - Minimum der Quadratsumme der verbleibenden zugeordneten Grauwertdifferenzen gewählt.
- (2) Die homologen digitalisierten Bildausschnitte sind nicht identisch und können daher nicht vollständig zur Deckung gebracht werden. Diese Disparitäten sind nicht nur die Folge von mehr oder weniger zufälligen Bildstörungen (noise), sondern sie beruhen hauptsächlich auf den praktisch stets auftretenden geometrischen und radiometrischen Verschiedenheiten. Sie sind nicht nur prinzipiell zu erwarten, da es sich um zwei verschiedene Abbildungen desselben Objektes handelt, sondern sie können auch erhebliche Beträge annehmen, wie jedem Photogrammeter geläufig ist. Diese geometrischen und radiometrischen Disparitäten müssen für eine optimale Korrelation durch eine entsprechende Transformation beseitigt werden. Dieses Problem allgemein zu lösen ist schwierig. In unserem Fall jedoch, bei dem die effektiv benutzten Bildfenster sehr klein sind (z. B. 32 x 32 pixel $\hat{=}$ 0,64 mm x 0,64 mm im Bild), läßt sich zeigen, daß in der Regel eine Affin-Transformation genügt, um die geometrische Übereinstimmung hinreichend zu gewährleisten. Zusätzlich führen wir zwei Parameter zur Grauwert-Transformation mit, für die ähnliche Überlegungen gelten. Für die Transformation der Grauwertmatrizen benutzen wir also die sechs Parameter einer geometrischen Affin-Transformation und zwei Parameter für eine radiometrische Transformation. Diese acht Parameter sind unbekannt. Sie sind so zu bestimmen, daß die Korrelation beider Bildausschnitte nach der gewählten Definition optimal wird.

- (3) Zur Lösung der acht Parameter haben wir einen linearisierten Kleinste-Quadrate-Ansatz gewählt. Der entsprechende Algorithmus bestimmt die unbekannt Parameter direkt durch Minimalisierung der Quadratsumme der Grauwertdifferenzen. Dieser leistungsfähige Ansatz wird auch als adaptive Kleinste-Quadrate-Korrelation bezeichnet. Er wird nachfolgend noch näher beleuchtet.

2.3 Die Grauwert-Differenz Δg jedes Pixelpaares i gibt Anlaß zu einer linearisierten Fehlergleichung:

$$\Delta g_i + v_i = g_x \cdot da_0 + x \cdot g_x \cdot da_1 + y \cdot g_x \cdot da_2 + g_y \cdot db_0 + x \cdot g_y \cdot db_1 + y \cdot g_y \cdot db_2 + dr_0 + g \cdot dr_1 \quad (1)$$

Dabei sind $da_0 \dots db_2$ die sechs geometrischen, dr_0, dr_1 die zwei radiometrischen Transformationsparameter. Ihre Koeffizienten, die sämtlich mit dem Index i zu denken sind, sind durch den Grauwert g bzw. die Grauwert-Gradienten g_x und g_y sowie die Koordinaten x_i, y_i der Bezugsgrauwertmatrix gegeben. Streng genommen beziehen sie sich auf die entsprechenden Werte der unbekannt Grauwertfunktion, werden aber aus den digitalisierten Werten geschätzt, wobei eine Filterung zweckmäßig sein kann.

Die Koeffizienten der aus den linearisierten Fehlergleichungen gebildeten Normalgleichungen zeigen, daß die Bestimmung wie auch die Bestimmbarkeit der unbekannt Transformationsparameter hauptsächlich von den Grauwert-Gradienten abhängt, unabhängig von der hohen Redundanz des Systems. Hierin drückt sich die bekannte Tatsache aus, daß Bildkorrelation bzw. die stereoskopische Fusion von der Textur der Bildinhalte bestimmt ist. Dieser Algorithmus liefert die aus der linearen Kleinste Quadrate Theorie bekannten Genauigkeits- und Qualitätsmaße, insbesondere σ_0 , sowie mit σ_x, σ_y die Standardabweichungen der x - und y -Parallaxen, die über die Inversion der Normalgleichungen gewonnen werden. Ebenso sind Ausreißer zu erkennen oder die Kondition des Gleichungssystems, d. h. die mit dem Signal-Rausch-Verhältnis zusammenhängende Bestimmbarkeit der Parameter.

Wie sich gezeigt hat, kann mit diesem Algorithmus eine sehr hohe Genauigkeit der Korrelation und damit der Parallaxenbestimmung erreicht werden. Selbst mit kleinen Matrix Arrays kommt man bei Luftbildern weit in den Sub-Pixelbereich, z. B. in Genauigkeiten um $1 \mu m$. Wir können daher von einem sehr leistungsfähigen Algorithmus für die Feinkorrelation sprechen. Seine theoretischen Genauigkeitseigenschaften sind weitgehend geklärt. Insbesondere ist bekannt, wie die erreichbare Genauigkeit vom Signal-Rausch-Verhältnis, sowie von Fenster- und Pixelgröße abhängt, siehe dazu die Ausführungen im Vortrag Nr. 8 von W. Förstner.

Die hohe Genauigkeit der adaptiven Feinkorrelation ist auf der anderen Seite durch die Verwendung eines linearisierten Ansatzes erkauft. Das bedeutet, daß die Probleme der Näherungswerte und der Iterationen gemeistert werden müssen. Es zeigt sich, daß das Verfahren zwar schnell konvergiert, aber einen sehr kleinen Konvergenzradius hat. Die Ausgangsnäherungen der Parameter sollten einer Überdeckung innerhalb von wenigen (2-3) Pixeln entsprechen. Der Grund dafür liegt in der hochgradigen Nichtlinearität der Grauwertfunktionen (s. dazu Vortrag Nr. 13 von R. Kories). Weiterhin ist mit den Iterationen jeweils ein rechenaufwendiges Resampling verbunden, d. h. nach jeder Iteration müssen die Pixel neu definiert bzw. ihre Grauwerte interpoliert werden.

Der beschriebene Algorithmus realisiert die Flächenkorrelation des einen Bildfensters mit dem anderen. Sie besteht in der optimalen Transformation der einen Grauwertmatrix auf die andere. Das bedeutet, daß jeder Koordinate z. B. des linken Bildausschnittes eine entsprechende Koordinate des rechten Ausschnitts zugeordnet ist. Es ist nun sinnvoll, da das einzelne Pixel keine eigenständige Bedeutung hat, einen für den ganzen Ausschnitt repräsentativen Punkt auszuwählen und auf ihn die Parallaxenwerte zu beziehen. Dies könnte z. B. der Mittelpunkt des (linken) Bezugsfensters sein. Wir verwenden statt dessen einen gewogenen Schwerpunkt aller Pixel, mit den Quadraten der Gradienten als Gewichten:

$$x_s = \frac{\sum_i g_x^2 \cdot x}{\sum_i g_x^2} \quad y_s = \frac{\sum_i g_y^2 \cdot y}{\sum_i g_y^2} \quad (2)$$

Diese Definition des repräsentativen Mittelpunktes hat im Fall ungleichmäßiger Gradientenverteilung anschauliche Vorzüge. Sie ist im übrigen invariant gegen lineare Transformationen.

2.4 An dieser Stelle soll kurz auf das Problem der Punktmessung eingegangen werden, das zu Mißverständnissen Anlaß gegeben hat, da in gewissem Sinne die Feinkorrelation auch zur Punktmessung benutzt werden kann.

Die oben geschilderte Parallaxenbestimmung wird auch als Punktübertragung bezeichnet in dem Sinn, daß zu einem willkürlichen (Schwer-)Punkt eines Ausschnitts der zugeordnete Punkt zum anderen Ausschnitt gesucht wird. In manchen Anwendungen tritt dieser Aspekt in den Vordergrund, der im übrigen gewissen Verfahren der konventionellen Punktübertragung entspricht. In dieser Funktion ist die Flächenkorrelation auch als multiple Korrelation zur gemeinsamen Punktübertragung mehrerer überlappender Bildausschnitte geeignet. Entscheidend ist dabei, daß zu einem definierten Schwerpunkt die zugeordneten Punkte gesucht werden, siehe Abb. 1.

Die Flächenkorrelation ist auch dann noch zur Punktübertragung geeignet, wenn an Stelle des Gradientenschwerpunktes ein durch bestimmte Koordinaten in einem Ausschnitt vorgegebener Punkt betrachtet wird. Seine Homologen sind in den anderen korrelierten Bildausschnitten klar definiert. Wenn in den betrachteten Bildausschnitten einzelne oder mehrere signalisierte Punkte liegen, die eine gute Bildtextur abgeben, ist die Parallaxenbestimmung bzw. die Punktübertragung durch die Flächenkorrelation ebenfalls einwandfrei und eindeutig. Allerdings wird nicht der signalisierte Punkt identifiziert und übertragen, sondern nach wie vor der jeweilige Gradientenschwerpunkt, der nicht zwingend mit dem signalisierten Punkt zusammenfällt.

Es ist im Vergleich dazu ein völlig anderes Problem, das Grauwertbild eines signalisierten Punktes in einem Bildausschnitt zu identifizieren und seinen Ort zu messen. Diese Aufgabe entspricht der bisherigen Punktmessung bzw. Bildkoordinatenbestimmung z. B. mit einem Monokomparator. Hierbei geht es nicht um eine Flächenkorrelation, sondern speziell um die Identifizierung und Lokalisierung der betreffenden Bildeinheit. Auch wenn man sich speziell bei den signalisierten Punkten, die genähert eine Gaußsche Grauwertfunktion haben, dabei einfache und anschauliche Lösungen vorstellen kann, handelt es sich allgemein und prinzipiell um Mustererkennung. Einen speziellen Mustererkennungsalgorithmus verwenden wir z. B. inzwischen für die Messung von Bildrahmenmarken mit Binärbildverarbeitung. Nun kann aber trotzdem mit der Methode der Flächenkorrelation in besonderen Fällen ein der Mustererkennung praktisch gleichwertiges Ergebnis erzielt werden, insbesondere bei radialsymmetrischen Signalen. Man korreliert in diesem Fall die gemessene Grauwertmatrix mit einer künstlichen Mustermatrix des Signals, die so angeordnet ist, daß der gesuchte Punkt (z. B. das Zentrum bzw. der Symmetriepunkt des Signals) gleichzeitig der Gradientenschwerpunkt der Mustermatrix ist, was in der synthetischen Matrix sehr leicht zu bewerkstelligen ist. In diesem Fall ergibt der Algorithmus der Flächenkorrelation den gesuchten Punkt in der gemessenen Bildmatrix. So kann man z. B. Bildrahmenmarken oder signalisierte Punkte in Einzelbildern automatisch messen, siehe Abb. 2.

Bei den im Vortrag Nr. 10 von A. Pertl vorgestellten Anwendungsbeispielen der Bildkorrelation fehlt dennoch die Messung signalisierter Punkte. Der Grund dafür liegt ausschließlich in der mit 20 µm festgelegten Pixelgröße des Digitalisierungssystems. Signalisierte Punkte haben in Luftbildern nur Durchmesser in der Größenordnung von 50 µm, was 2-3 Pixeln entspricht. Diese Diskretisierung ist zu grob, um genaue Ergebnisse für die Punktmessung zu liefern.

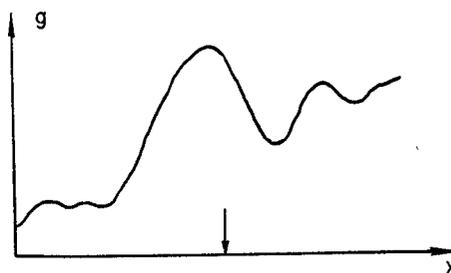


Abb. 1: Gradientengewichteter Flächenschwerpunkt

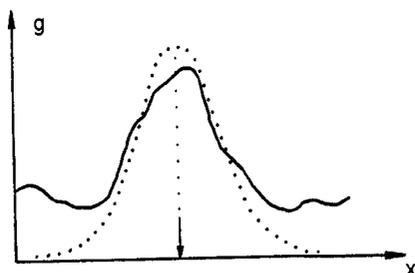


Abb. 2: Punktbestimmung durch Flächenkorrelation mit synthetischer Mustermatrix

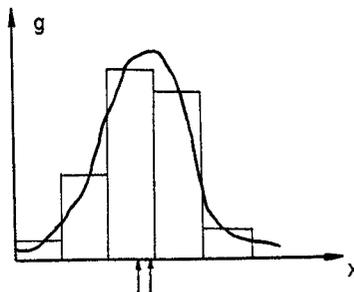


Abb. 3: Grobe Diskretisierung eines Signals

2.5 Zusammengefaßt kann festgestellt werden, daß mit dem beschriebenen Algorithmus der Flächenkorrelation eine potentiell sehr genaue Methode zur Parallaxen- und (in der oben definierten Einschränkung) zur Punktmessung entwickelt wurde. Das Verfahren ist selbstkontrollierend. Jede Korrelation ergibt Qualitätsindikatoren, insbesondere über ihre Präzision.

Die theoretischen Voraussetzungen der Methode, ihr mathematisches Modell und die für die Genauigkeit bestimmenden Bedingungen sind bekannt. Unter den bei Luftbildern üblichen Bildkontrasten und -texturen genügen schon kleine Bildausschnitte von 16 x 16 Pixel, um Genauigkeiten um 2 µm zu erreichen, ein Wert, der als zunächst anzustrebendes Ziel im Raum steht.

Der beschriebene Algorithmus setzt allerdings gute Näherungsüberlappung der Bildausschnitte voraus, was durch besondere Maßnahmen sichergestellt werden muß.

Die Anwendung des Algorithmus ist auf kleine Bildausschnitte beschränkt, im Zusammenhang mit der verwendeten Transformation. Im übrigen wird allgemein im mathematischen Modell eine einfache Objektfläche vorausgesetzt. Insbesondere können Unstetigkeiten in der z-Koordinate, wie z. B. bei Häusern oder Bäumen, nicht bewältigt werden. Allerdings erkennt der Algorithmus, ob solche Störungen vorliegen.

3. Praktische Ergebnisse mit Bildkorrelation am analytischen Plotter

3.1 Es ist ein wesentlicher Schritt für die praktische Anwendbarkeit der digitalen Bildkorrelation, daß das System auf einem analytischen Auswertegerät, in unserem Fall dem Zeiss Planicomp C 100, implementiert wurde und so für on-line Operationen an diesem Gerät verwendbar ist. Dieser Schritt stellt jedenfalls im gegenwärtigen Zeitpunkt die einfachste Möglichkeit dar, die digitale Bildkorrelation auf die elementaren photogrammetrischen Meßoperationen anzuwenden und mit der weiteren Stereoauswertung zu integrieren.

Über den gegenwärtigen Stand des Systems und die Justier- und Kalibrierungsanforderungen sowie über die bisherigen Erfahrungen mit der Hardware berichtet E. Gülch im Vortrag Nr. 9.

3.2 Mit dem programmierten Algorithmus der Feinkorrelation und der Realisierung des Systems in Verbindung mit einem analytischen Plotter steht ein Verfahren zur automatischen Messung von Parallaxen und (in eingeschränktem Sinn) von Punkten in photogrammetrischen Meßbildern zur Verfügung. Das Gesamtsystem ist zwar derzeit experimentell und erfüllt z. B. noch nicht alle Anforderungen an die Geschwindigkeit der automatischen Messungen. Dennoch ist es geeignet, um die Leistungsfähigkeit und die Anwendbarkeit des Systems zu demonstrieren.

Wenn man nur die punktweisen geometrischen Meßoperationen am analytischen Plotter ins Auge faßt, d. h. Parallaxen- und Punktmessungen, letztere wie beschrieben mit Flächenkorrelation oder besonderen Algorithmen, kann man folgende Anwendungen des automatischen Verfahrens unterscheiden:

- automatische Messung der Bildrahmenmarken für die innere Orientierung
- automatische Parallaxen- oder Bildkoordinatenmessung für die relative Orientierung
- im begrenzten Umfang, d. h. in geeigneten Fällen automatische Messung von Höhenpaßpunkten und (signalisierten) Lagepaßpunkten für die absolute Orientierung
- x-Parallaxen bzw. Höhenmessung von Geländepunkten für digitale Höhenmodelle bzw. allgemeiner zur punktweisen Oberflächenerfassung
- automatische Messung signalisierter Punkte, z. B. im Anwendungsbereich der Katasterphotogrammetrie
- einfache oder mehrfache digitale Punktübertragung von Verknüpfungspunkten für die Aerotriangulation
- Punktübertragung in Bilder, die zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden, für Deformationsanalyse

Es ist erkennbar, daß die hochgenaue automatische Messung der elementaren geometrischen Größen von erheblichem Interesse ist und allein schon die Einführung der digitalen Bildverarbeitung rechtfertigt.

Im Vortrag von A. Pertl werden einige Ergebnisse von Versuchsmessungen vorgestellt. Sie bestätigen die erwarteten Leistungen des Systems bzw. präzisieren sie.

4. Näherungswerte und Zuordnungsverfahren

4.1 Die Anwendung von Algorithmen zur adaptiven Feinkorrelation sowie zur Punktmessung setzen eine Anfangsübereinstimmung der Bildausschnitte von wenigen Pixeln voraus. Diese Beschaffung guter Näherungswerte stellt das schwierigere und operationell wichtigere Problem der Bildkorrelation, selbst in dem hier betrachteten speziellen Anwendungsbereich, dar.

Da hier auch operationelle Aspekte ins Spiel kommen, ist die Lösung des Problems der Näherungswerte nicht nur in geeigneten Rechenalgorithmen zu suchen, sondern wird auch äußere Umstände zu berücksichtigen haben. Die Kopplung der Bildverarbeitung mit einem vom Operateur bedienten analytischen Auswertegerät erlaubt, z. B. die Beschaffung vor allem grober Näherungswerte dem Operateur zu überlassen. Bis auf weiteres wird dieses Verfahren dann zweckmäßig, wirtschaftlich und dem Operateur zumutbar sein, wenn es sich nur um wenige Messungen handelt, wie z. B. bei der relativen Orientierung, wobei auch noch der schrittweise Übergang zum algorithmischen Verfahren denkbar und praktikabel ist. In unserer eigenen Strategie, die einen analytischen Plotter mit dem Operateur voraussetzt, halten wir es derzeit für vernünftig, die groben Näherungswerte bzw. die Anfangsüberlappung der digitalisierten Bildausschnitte für eine begrenzte Zahl von wenigen Messungen dem Operateur zu überlassen. Darüberhinaus soll jedoch die Näherungswertbeschaffung automatisch und algorithmisch erfolgen und den Operateur bis auf Überwachungsfunktionen entlasten. Diese Strategie ist dann besonders wichtig, wenn z. B. sehr viele Punkte für digitale Geländemodelle zu korrelieren sind oder wenn viele Verknüpfungspunkte bei einer Blocktriangulation digital zu korrelieren bzw. zu übertragen sind. Diese beiden Beispiele zeigen schon, daß die Berechnung von Näherungswerten für die Feinkorrelation nicht unbedingt grundsätzlich einem Schema folgen muß, sondern daß die für die jeweilige Anwendung bestimmenden Umstände herangezogen werden sollten.

4.2 Trotz der Forderung, anwendungsbezogene Umstände für die Beschaffung von Näherungswerten zu berücksichtigen, können einige allgemeine Strategien genannt werden. Wir müssen zwar immer noch davon ausgehen, daß eine gewisse Anfangsüberlappung der Bildfenster vorgegeben ist, damit überhaupt Beziehungen zwischen den Grauwertmatrizen bestehen. Davon ausgehend können wir in unserem Arbeitsbereich zunächst drei Maßnahmen nennen, welche die Bestimmung genauer Näherungswerte ermöglichen oder erleichtern. Dies sind: (1) große Bildfenster, (2) robuste Zuordnungs- bzw. Korrespondenzalgorithmen, (3) Vorausberechnung der Erwartungswerte. Hierzu kurz einige Bemerkungen:

- (1) Größere Bildausschnitte vergrößern allgemein den Einfangbereich für die Zuordnungsalgorithmen. Allerdings bringt die direkte Anwendung von Korrelations-Algorithmen nicht viel, wegen der Nichtlinearität der Grauwertfunktionen, ganz abgesehen von dem mit der Anzahl der Pixel steigenden Rechenaufwand. Eine Milderung bringt dabei die Zusammenfassung von z. B. vier oder neun Pixeln zu größeren Ersatzpixeln. Große Bildfenster erhalten aber ihre eigentliche Bedeutung im Zusammenhang mit
- (2) robusten Zuordnungs- und Korrespondenz-Algorithmen. Hierbei werden durch sog. Interest-Operatoren in den Grauwertmatrizen Stellen mit bestimmten Eigenschaften gesucht - in unserem Fall z. B. Stellen, die sich gut zur Korrelation eignen. Von diesen Punkten in beiden Bildausschnitten werden durch Ähnlichkeitskriterien einander entsprechende Paare ausgesucht, auf die sich dann eine Näherungstransformation zur Verbesserung der Überlappung abstützen kann. Solchen Korrespondenzalgorithmen kommt in der Bildverarbeitung eine große Bedeutung bei. Sie werden in den Vorträgen Nr. 8 und 13 angesprochen.
- (3) In wichtigen Anwendungsfällen, insbesondere bei der Messung von digitalen Gelände- oder Oberflächenmodellen, besteht die Möglichkeit, die nächsten Geländepunkte vorzuberechnen und dadurch Näherungswerte für die Digitalisierung und die Zuordnung der Bildausschnitte zu gewinnen. Wenn dabei über die Fläche nichts bekannt ist, wird man in einer Art umgekehrten Progressive Samplings die Schrittweiten erhöhen und sie wieder reduzieren, wenn die Zuordnung verloren geht oder zu gehen droht. Bei Industrieanwendungen wird es auch Fälle geben, wo die Form der abzutastenden Fläche von vornherein genähert bekannt ist. Eine wesentliche Rolle wird die Vorausberechnung von Näherungswerten im Sinne einer on-line Triangulation auch bei der digitalen Punktübertragung für die Blocktriangulation spielen.

5. Bildverarbeitung für photogrammetrische Kartierungen

5.1 Die bisherigen Ausführungen und auch unsere eigenen bisherigen Entwicklungen beziehen sich ausschließlich auf die Messung von Parallaxen oder Bildpunkten mit der digitalen Bildverarbeitung. Es wurde schon erwähnt, daß man den Standpunkt vertreten kann, diese Anwendung allein der

Bildverarbeitung rechtfertige schon ihre Einführung. Tatsächlich liegen aber die nächsten allgemeineren Entwicklungs- und Anwendungsstufen auf der Hand, selbst wenn die einerseits einschränkende, andererseits das ganze sehr erleichternde Randbedingung der Kopplung mit einem analytischen Plotter vorläufig beibehalten wird, nämlich die automatische Erfassung und Kartierung topographischer Gegenstände.

Die über die Bildkorrelation hinausgehende, mit Mitteln der Mustererkennung arbeitende Erfassung und Messung von Bildrahmenmarken oder durch einfache geometrische Muster definierten Objektpunkten deutet bereits die Entwicklung an. Die Erweiterung auf die häufigsten topographischen Gegenstände liegt nahe. Dabei werden zwar zusätzliche Probleme zu lösen sein, z. B. bei der Erfassung von 3-dimensional ausgeprägten Objekten (z. B. Häusern). Aber mit vorläufiger Unterstützung durch den Operateur bezüglich der Erkennung und Klassifizierung der Objekte ist eine Entwicklung zur weitgehend automatischen Kartierung absehbar. Eine besondere Rolle wird dabei der automatischen Linienverfolgung zukommen, auf die aus einem Anwendungsbereich im letzten Vortrag Nr. 14 des Schwerpunktthemas ein Ausblick gegeben wird.

5.2 Zum Schluß kann der Überzeugung Ausdruck verliehen werden, daß der digitalen Bildverarbeitung in der Photogrammetrie eine sehr große Bedeutung zukommen wird. Dies gilt nicht nur für den hier in den Vordergrund gestellten klassischen Aufgabenbereich der Photogrammetrie, sondern auch für Industrie- und Sonderanwendungen. Die Tatsache, daß an verschiedenen Stellen diese Entwicklungen energisch vorangetrieben werden, belegt, daß sich diese Überzeugung rasch ausbreitet.

Ebenso wichtig ist die Feststellung, daß schon mit verhältnismäßig einfachen Mitteln praktische Anwendungen mit wirtschaftlichem Erfolg möglich sind und aus diesem Grund mit der alsbaldigen schrittweisen Einführung der Bildverarbeitung in die photogrammetrische Praxis gerechnet werden kann. Wir hoffen, daß die bei dieser Photogrammetrischen Woche vorgeführten Probeauswertungen und Ergebnisse diese Erwartung stützen können.

Zusammenfassung

In dem Vortrag werden der Entwicklungsstand und die Problemfelder der in dem analytischen Plotter integrierten digitalen Bildkorrelation dargelegt. Nachdem der hochgenaue adaptive Kleinst-Quadrat-Algorithmus der Bildkorrelation erprobt und seine Anwendbarkeit bestätigt ist, verschiebt sich das Interesse auf die allgemeinen Probleme der Näherungswertbeschaffung und der Korrespondenz-Algorithmen. Abschließend wird die Bedeutung der Entwicklung für die photogrammetrische Kartierung hervorgehoben.

DIGITAL IMAGE PROCESSING IN PHOTOGRAMMETRIC STEREO PLOTTING

Abstract

The paper reviews the status of development and the problem areas of digital image correlation in its joint operation with the analytical plotter. The high accuracy algorithm of adaptive least squares correlation being firmly established and shown to be applicable the interest is shifted towards the wider problems of approximate values and correspondence algorithms. The importance of the development and its expected impact on photogrammetric mapping is emphasized.

Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart
Keplerstr. 11
D-7000 Stuttgart 1