

Empirische Ergebnisse der automatischen Parallaxenmessung

A. Pertl, Stuttgart

1. Einleitung

Seit Beginn der photogrammetrischen Stereoauswertung mit Pulfrichs musealem Stereokomparator haben sich die Stereoauswertegeräte auf Grund technologischer Neuerungen kontinuierlich verändert.

Mit verbesserten Auswertegeräten konnten die gestellten Aufgaben der 3-d Auswertung meist präziser oder wirtschaftlicher gelöst werden. Im Zeitalter der Mikroelektronik sind photogrammetrische Auswertegeräte denkbar, mit denen im Vergleich zu gegenwärtigen Systemrealisierungen 3-d Auswertungen durchgeführt werden können, deren Ergebnisse vom räumlichen Sehvermögen des Auswerters völlig unabhängig sind bzw. die vollständig operateurunabhängig ablaufen. Die Aufgabe der stereoskopischen Zuordnung identischer Bildpunkte kann dabei vom menschlichen visuellen System auf die Verfahren der digitalen Verarbeitung von Bildsignalen übertragen werden.

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit den Ergebnissen empirischer Untersuchungen der teilautomatisierten höchpräzisen 3-d-Messung in einem mit CCD-Kameras bestückten analytischen Plotter.

Im gegenwärtigen Entwicklungsstadium des modifizierten Planicomp C 100 können unter bestimmten Voraussetzungen (Abschnitt 2) Horizontal- und Vertikalparallaxen (Quer- und Längsdisparitäten) durch digitale Bildkorrelation gemessen werden. Die Näherungseinstellung der Meßpunkte wird vom Operateur übernommen (Pertl, 1984).

Durch die digitale Bildkorrelation werden digitalisierte Bildausschnitte auf ihre Ähnlichkeit überprüft. Sie wird hier in erster Linie zur Messung von Parallaxen zweier korrespondierender Bildausschnitte verwendet. Ersetzt man bei prominenten Bildstrukturen (z. B. signalisierte Punkte) einen der beiden Bildausschnitte durch ein künstlich erstelltes Grauwertmuster, so entspricht die Parallaxenmessung durch digitale Bildkorrelation einer Punktlokalisierung bzw. Punktmessung (Ackermann, 1985).

An die Praxistauglichkeit des Auswertesystems werden neben den Präzisionsanforderungen auch Bedingungen der Wirtschaftlichkeit gestellt.

Im zweiten Abschnitt dieses Beitrages werden die Kriterien angegeben, die die Korrelationsflächen erfüllen müssen, um hohe Punktzuordnungsgenauigkeiten zu gewährleisten. Außerdem wird gezeigt, welcher Zeitaufwand für die automatische Parallaxenmessung notwendig ist.

Im dritten Abschnitt wird an drei Beispielen aus der photogrammetrischen Praxis die Funktionstüchtigkeit und die Leistungsfähigkeit der korrelatorunterstützten Messung im analytischen Plotter gezeigt. Neben einer Beschreibung der Versuchsabläufe werden die Ergebnisse der Messungen zur Punktübertragung für die Aerotriangulation, zur Oberflächenmessung und zur Feststellung von Objektdeformationen bzw. -veränderungen interpretiert.

2. Empirische Untersuchungen zur Punktzuordnung durch digitale Bildkorrelation

Die Untersuchungen dieses Abschnitts gelten der Präzision und dem Zeitaufwand des von Ackermann und Pertl (Ackermann, Pertl, 1983) beschriebenen Punktzuordnungsverfahrens durch digitale Bildkorrelation.

Die Untersuchungen beschränken sich auf solche Parameter, die bei der Punktauswahl vom Operateur gesteuert werden können. Dies sind die Größe, der Anfangsüberlappungsbereich und unter der Einschränkung des vorgegebenen Bildermaterials, der Bildinhalt der Korrelationsflächen.

2.1 Präzision

In einer theoretischen Studie weist Förstner (Förstner, 1982) nach, daß die Präzision der Punktzuordnung durch digitale Bildkorrelation abhängig ist von den Parametern

- Anzahl der Bildpunkte
- Bildkontrast
- Bildrauschen
- Größe der Bildelemente.

Die Größe der Bildelemente ist durch das System (CCD-Sensor) vorgegeben und wird deshalb hier von der weiteren Betrachtung ausgeklammert.

Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich jeweils auf die kleinstmögliche Pixelgröße des Systems von $(20 \mu\text{m})^2$.

Anzahl der Bildpunkte

Verdoppelt man die Seitenlänge der Korrelationsfenster, so besagt die theoretische Genauigkeitsformel (Förstner, 1982)

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\sigma_n^2}{\sigma_{g_x}^2} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{g_y}^2} \right) = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\text{SNR}^2} \left(\frac{\sigma_g^2}{\sigma_{g_x}^2} + \frac{\sigma_g^2}{\sigma_{g_y}^2} \right) \quad (2.1)$$

daß die Varianz σ_p^2 um den Faktor 4 verbessert wird.

Die empirischen Untersuchungen bestätigen die Abhängigkeit der Punktzuordnungsgenauigkeit von der Bildpunktanzahl (Fig. 2.1).

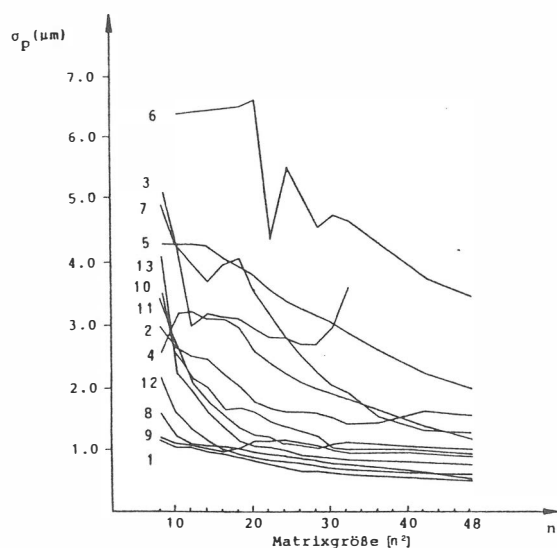


Abb. 2.1 Präzision der Punktzuordnung in Abhängigkeit der Bildpunktanzahl

Eine lineare Abhängigkeit der Varianz σ_p^2 von der Pixelanzahl wird jedoch nicht erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich bei veränderter Größe der Korrelationsflächen zwangsweise auch der Bildinhalt und damit die Bildgeometrie verändert. Außerdem setzt Gleichung (2.1) Isotropie des Bildinhaltes und weißes Rauschen voraus. Diese Annahmen können für die empirischen Untersuchungen nicht getroffen werden.

Zur Erstellung der Graphik (Fig. 2.1) wurden Bildausschnitte unterschiedlichen Inhaltes verwendet. Es handelt sich dabei ausschließlich um Abbildungen natürlicher Geländeobjekte (Luftbildaufnahmen $m_b = 1 : 4000$). (Anhang A 1)

Bereits für eine Korrelationsflächengröße von (16x16) Bildpunkten werden hier Punktzuordnungsgenauigkeiten bis 0,05 Pixel (1 μ m) erreicht. Die Ergebnisse können als repräsentativ angesehen werden, denn entsprechende Untersuchungen an Luftbildern aus anderen Bildflügen liefern Präzisionswerte in der gleichen Größenordnung. Die Genauigkeitswerte sind unabhängig vom Bildmaßstab. Entscheidend für die Güte der Punktzuordnung ist die Bildstruktur innerhalb der Korrelationsflächen.

Bildstruktur

Die Bildstrukturen unterscheiden sich durch ihre Form, ihre Größe sowie den Kontrast zu ihrer jeweiligen Umgebung. In der Gleichung 2.1 sind diese Texturparameter in den Quotienten

$$\frac{\sigma_g^2}{\sigma_{gx}^2} \quad \text{und} \quad \frac{\sigma_g^2}{\sigma_{gy}^2}$$

zu finden. Der Betrag von σ_{gx}^2 bzw. σ_{gy}^2 wird primär durch die Steilheit der Grauwertgradienten (Bildschärfe) bestimmt.

Beim Korrelationsalgorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate (Ackermann, 1984) wirken sich die Eigenschaften der Grauwertgradienten auf die Kofaktoren aus. Mit Hilfe der Kofaktoren können mittlere Fehlerellipsen nach Helmert (Wolf, 1975) abgeleitet werden, deren Form und Größe durch die Bildtextur charakterisiert werden.

Tritt der Sonderfall ein, daß die Bildstrukturen in allen Richtungen gleiche Eigenschaften aufweisen, so erhält man anstatt einer Fehlerellipse einen Fehlerkreis.

Bildstrukturen mit solchen Eigenschaften findet man in großmaßstäbigen Luftbildaufnahmen am häufigsten in Form von künstlichen Bauwerken (Schachtdeckel, Straßenmarkierungen, Fahrspuren etc.). In kleinmaßstäbigen Luftbildern zeichnen sich vor allem Feldecken, Wegekreuze etc. durch ähnliche Bildstrukturen in rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen aus. Neben der Objektform, dem Bildkontrast und der Bildschärfe beeinflusst auch die Größe der abgebildeten Objekte wegen der endlichen Pixelgröße der CCD-Sensoren (20 μm)² die Korrelationsgenauigkeit. x

Der Korrelationsalgorithmus bietet mit der Überprüfung der Fehlerellipsen auf ihre Form und Größe die Möglichkeit der Selbstdiagnose. Für die Korrelation ungeeignete Bildstrukturen, z. B. linienhafte oder kontrastarme Objekte, werden vom Algorithmus erkannt.

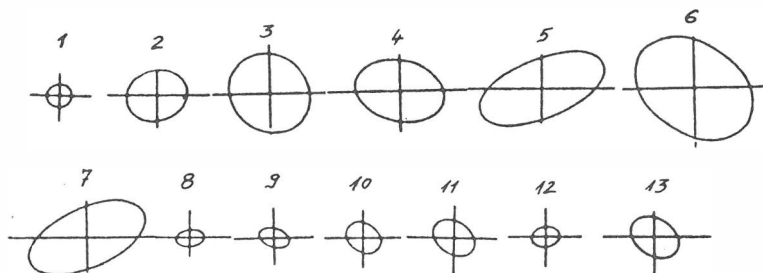


Fig. 2.2 Fehlerellipsen der Korrelationsbeispiele 1 - 13
Matrixgröße 16 x 16 Bildpunkte

2.2 Zeitaufwand

Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit des Korrelationsverfahrens nach der Methode der kleinsten Quadrate sind der Anfangsüberlappungsbereich (Näherungswerte) und die Pixelanzahl der Korrelationsflächen.

Konvergenz

Da der Feinkorrelationsalgorithmus numerisch sehr aufwendig ist, werden zur Näherungswertbestimmung wirtschaftlichere Verfahren (Ackermann, 1984; Pertl, 1984) herangezogen. Der Feinkorrelationsalgorithmus kommt erst dann zum Einsatz, wenn die Korrelationsflächen weniger als ca 1,5 Pixel voneinander abweichen. Unter dieser Voraussetzung ist das Korrelationsmaximum nach ca. 3-4 Iterationen (Fig. 2.3) erreicht.

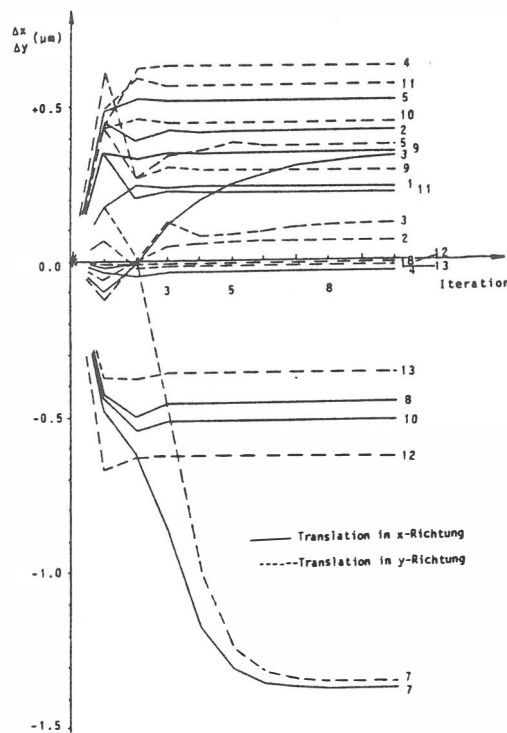


Fig. 2.3 Iterationsabhängige Veränderung der Translationsparameter der Korrelationsbeispiele 1-13 (≙ Parallaxenänderungen)

Flächengröße

Der Präzisionsgewinn der Punktzuordnung mit großen Korrelationsflächen (Fig. 2.1) geht auf Kosten des Zeitaufwandes. In Fig. 2.4 ist der Zeitaufwand des Feinkorrelationsalgorithmus für verschiedene Matrixgrößen dargestellt. Die Zeitangaben beziehen sich auf die Software-Realisierung an einem Kleinrechner HP 1000. In der Fig. 2.4 sind die Zeitangaben für die Bereitstellung der Grauwertmatrizen (Abtastung, Übertragung und Diodierung) nicht angegeben. Aufser dem

gang und Diodierung) nicht angegeben. Aufser dem

Gesamtzeiten für jeweils 1 - 4 Iterationen ist der Zeitaufwand für das Resampling und den Aufbau des Normalgleichungssystems gesondert angegeben. Gegenwärtig wird die Normalgleichungsmatrix bei jeder Iteration neu erstellt. An dieser Stelle kann noch Rechenzeit eingespart werden, wenn nach der ersten bzw. zweiten Iteration nur noch die rechten Seiten des Normalgleichungssystems neu erstellt werden und die Normalgleichungsmatrix nicht mehr verändert wird.

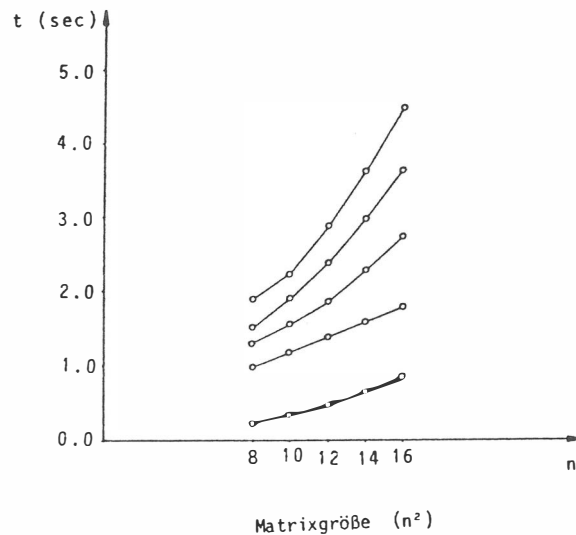


Fig. 2.4 Zeitaufwand für die Korrelation nach der Methode der kleinsten Quadrate

3. Photogrammetrische Standardaufgaben - Vergleich zwischen konventioneller und korrelatorunterstützter Messung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse einiger Vergleiche zwischen konventionellen und korrelationsunterstützten Messungen vorgestellt. Aus der photogrammetrischen Praxis wurden die Anwendungsgebiete

- 1) Aerotriangulation
- 2) Oberflächenmessung und
- 3) Deformationsmessung

ausgewählt.

3.1 Aerotriangulation

Für die Identifizierung von Punkten bei der Aerotriangulation stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung (Jordan, Eggert, Kreissl, 1972): a) Signalisierung der Geländepunkte, b) künstliche Markierung der Bildpunkte und c) die Verwendung natürlicher Geländeobjekte. h

Eine Signalisierung der Verknüpfungspunkte kommt aus Aufwendungsgründen meist nicht in Frage. Nachteilig bei der künstlichen Markierung der Verknüpfungspunkte ist die lokale Zerstörung der photographischen Emulsion. Werden natürliche Geländepunkte zur Verknüpfung der Bilder verwendet, so kommt es bei konventionellen Punktübertragungsverfahren häufig zu Identifizierungsfehlern. Wenn die natürlichen Geländepunkte nicht genügend klein und deutlich zu erkennen sind, bereitet die Feineinstellung bei der Messung oftmals Schwierigkeiten. wands?

Hier bietet ein Punktübertragungsverfahren Abhilfe, das die Möglichkeiten des analytischen Auswertungs-systems und der digitalen Bildkorrelation nützt. Für dieses Verfahren ist eine künstliche Markierung der Verknüpfungspunkte nicht erforderlich. Da die Korrelation flächenhaft arbeitet, sind kleine Bildstrukturen für die Feineinstellung nicht unbedingt nötig. Zudem muß bei diesen Verfahren im Gegensatz zu konventionellen Punktübertragungsverfahren jedes Bild nur einmal in den Bildträger des Auswertesystems eingelegt werden.

Im folgenden wird über eine Untersuchung berichtet, bei der die Verknüpfungsgenauigkeiten einer konventionellen Messung am Monokomparator PK 1, einer konventionellen und einer korrelatorunterstützten Messung am Planicom C 100 verglichen werden. Als Vergleichsgröße dient der jeder Messung spezifische σ_0 -Wert aus der Bündelblockausgleichung.

Bildmaterial

Das verwendete Bildmaterial stammt aus einer Befliegung des Gebietes Schnürpflingen, (BW, Übergang Schwäbische Alb - Oberschwaben; Bildmaßstab 1 : 4000; RMK A 15/23 mit FMC; Kodak Panatomic X; p = 60%, q = 40 - 80 %; Flugrichtung OW und WO; Flughöhe über Grund 600 m; Aufnahmetag 5.4.1985).

Aus dem gesamten Block wurde für diese Untersuchungen ein Teilblock (Fig. 3.1) ausgewählt. Der Teilblock besteht aus vier Streifen mit je sechs bzw. sieben Bildern, in denen durchschnittlich ca. 16 (insgesamt 405) signalisierte Verknüpfungspunkte liegen. Diese sind jeweils als Einzel- bzw. Doppelpunkte auf die 9 Schemapunkte der Bilder verteilt. In der unmittelbaren Nachbarschaft eines jeden dieser signalisierten Verknüpfungspunkte wurde ein markanter Geländepunkt ausgewählt. Somit ist bei Verwendung der signalisierten bzw. natürlichen Verknüpfungspunkte für die Punktübertragung eine ähnliche Blockgeometrie gewährleistet.

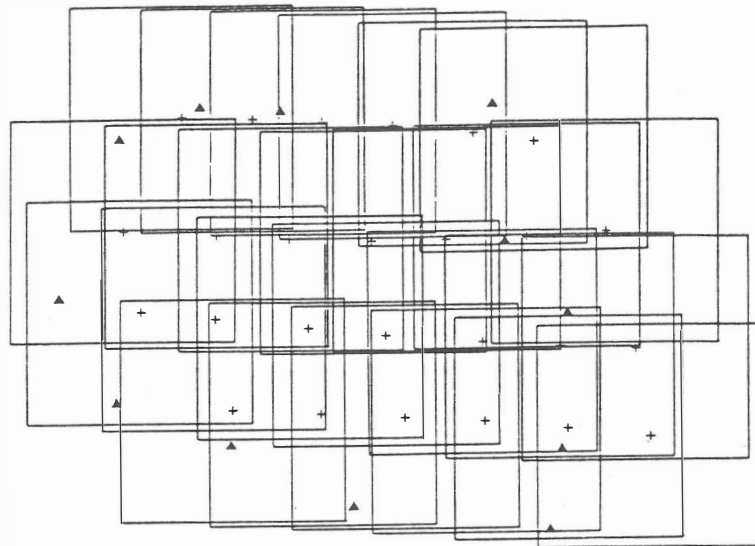


Fig. 3.1 Teilblock Schnürpflingen
(▲ Paßpunkte, + Bildmitte)

Aus den vorhandenen Lage- und Höhenpaßpunkten wurde eine Randbesetzung für den Teilblock mit 12 signalisierten Lage- und Höhenpaßpunkten ausgewählt.

Für die Überprüfung der (Lage-)Absolutgenauigkeit stehen weitere 107 signalisierte Vergleichspunkte zur Verfügung. Diese Punkte wurden in die Blockausgleichungen nicht als Verknüpfungspunkte eingeführt.

Messung

Mit dem Monokomparator Zeiss PK 1 wurden die Paß-, Vergleichs- und signalisierten Verknüpfungspunkte (Version SIG PK 1) gemessen.

Die Messungen mit dem Analytischen Auswertesystem Planicomp C 100 wurden im Komparator-Modus (Mono-Komparator - linker Bildwagen) durchgeführt. Die Messungen des Operateurs beschränkten sich wieder auf die Paß-, Vergleichs- und signalisierten Verknüpfungspunkte (SIG C 100). Direkt im Anschluß an diese Messungen erfolgte bei unveränderter Orientierung der Bilder die Digitalisierung der Bildausschnitte für die später extern durchgeführte digitale (Mehr-)Bildkorrelation. Es wurden nur solche Bilddetails digitalisiert, die später für die Verknüpfung der Bilder herangezogen wurden. Die digitalisierten Bildausschnitte wurden in zwei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe enthält signalisierte (SIGKORR) und die zweite Gruppe enthält natürliche Geländepunkte (NATKORR). Neben den Bildmatrizen wurden die Abtastposition (Gerätekoordinaten) und die Kalibrierungsdaten für die Zuordnung der CCD-Kamera zu der Meßmarkenposition (Gülch, 1985) auf Magnetband registriert.

Korrelation

Für jeden Verknüpfungspunkt lagen zwischen zwei und neun digitalisierte Bildausschnitte vor. Aus diesen wurde jeweils einer ausgewählt (Muster) und mit den verbleibenden Bildmatrizen korreliert. Im Anschluß an die Flächenanpassungen wurde innerhalb des Musters ein Punkt definiert (Ackermann, Pertl 1983), der in alle übrigen Bildmatrizen des zugehörigen Geländepunktes übertragen wurde (Fig. 3.2).

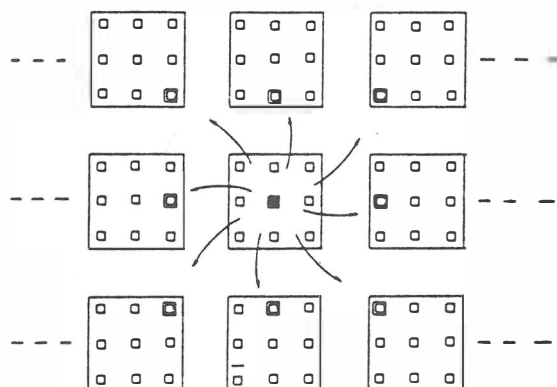


Fig. 3.2 Punktübertragung

Die Punktzuordnungsgenauigkeiten durch Korrelation sind in den Fig. 3.3 und 3.4 getrennt für Bildstrukturen natürlicher und signalisierter Geländepunkte zusammengestellt. Für 97 % (80 %) der natürlichen und 90 % (61 %) der signalisierten Geländepunkte sind die ermittelten theoretischen Übertragungsgenauigkeiten besser als 3 μm (2 μm).

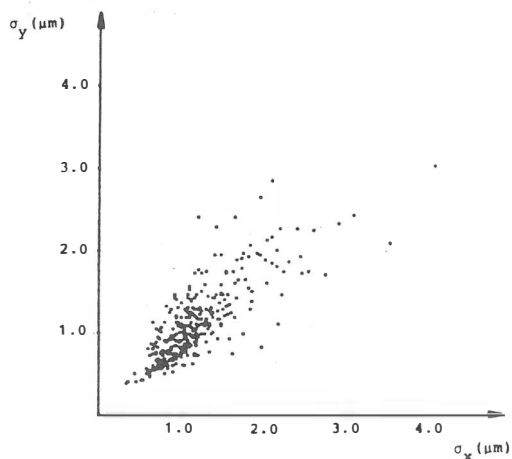


Fig. 3.3 natürliche Geländestrukturen

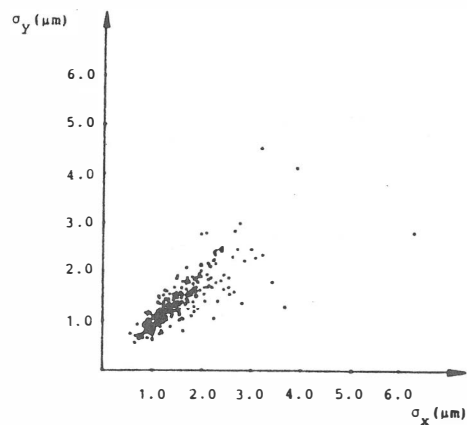


Fig. 3.4 signalisierte Geländepunkte

Präzision der Bildpunktzuordnung

Bildkoordinaten

Die Koordinaten der Übertragungspunkte beziehen sich zunächst auf lokale Koordinatensysteme (Abtastsysteme). Mittels der Abtastposition der Bildmatrizen und der Zuordnungswerte von Meßmarke und CCD-Kamera werden diese Koordinaten in das Bildwagenkoordinatensystem transformiert. Eine daran anschließende Reduktion auf den Bildhauptpunkt und eine symmetrisch zum Bildhauptpunkt angebrachte Korrektur der Verzeichnungswerte lieferten die Bildkoordinaten der ausgewählten Verknüpfungspunkte.

Blockausgleichung

Mit den vier Datensätzen wurde nun jeweils eine Bündelblockausgleichung mit dem Programm PAT-BS durchgeführt. Bei der Bereinigung der Version NATKORR mußten 20 Messungen eliminiert werden. Die entsprechenden Messungen wurden aus Gründen der vergleichbaren Blockgeometrie auch in den anderen Versionen eliminiert. In der Version SIGKORR sind zusätzlich fünf Punkte ausgefallen. Da es sich hier um einzelne von mehrfach gemessenen Verknüpfungspunkten handelt, ändert sich die Anzahl der Blockpunkte nicht. Deshalb wurden die entsprechenden Punkte in den anderen drei Versionen nicht eliminiert.

Für die vier verschiedenen Versionen (Tab. 3.1) wurden die Orientierungsparameter der Bilder und 12 blockinvarianten zusätzliche Parameter über die Selbstkalibrierung bestimmt. In die Blockausgleichungen wurden jeweils nur die Messungen der Verknüpfungspunkte und der 39 Paßpunkte (12 im Gelände) eingebracht.

Version	Messung am	Art der Punkte	Anzahl der Verknüpfungspunkte	Anz. d. Verkn. PP	Anz. d. Blockpkt.
SIG Pk 1	Pk 1	signalisiert	405	39	104
SIG C 100	Planicomp C 100 (Operateur)	signalisiert	405	39	104
NAT KORR	Planicomp C 100	natürlich	405	39	104
SIG KORR	Korrelator	signalisiert	400	39	104

Tab. 3.1

Die Genauigkeitswerte (σ_0 -Werte) der Bündelblockausgleichungen werden somit im wesentlichen von der Meßgenauigkeit bzw. der Übertragungsgenauigkeit der Verknüpfungspunkte bestimmt.

Tab. 3.2 Genauigkeitsergebnisse

Genauigkeitsergebnisse

Version	σ_0 (μm)	μ_x	μ_y (μm)	μ_{xy}	σ_0	μ_x	μ_y (cm)	μ_{xy}
SIG Pk 1	2,4	2,7	3,2	3,0	1,0	1,1	1,3	1,2
SIG C 100	2,7	3,0	3,5	3,3	1,1	1,2	1,4	1,3
NAT KORR	4,0	3,6	3,8	3,7	1,6	1,5	1,5	1,5
SIG KORR	3,9	4,5	3,9	4,2	1,6	1,8	1,6	1,7

Als herausragendes Ergebnis dieser Untersuchung ist der σ_0 -Wert von 4,0 μm aus der Version NATKORR zu sehen. Denn dieses Ergebnis verdeutlicht die Leistungsfähigkeit der digitalen Bildkorrelation als Punktübertragungsmethode für die Aerotriangulation.

Für die vier Versionen wurden mit den jeweiligen Orientierungs- sowie den 12 blockinvarianten Parametern und den Bildkoordinaten die Strahlenschnitte der Vergleichungspunkte berechnet. Ein Vergleich dieser Werte mit den bekannten Geländekoordinaten führt auf die in Tab. 3.2 angegebenen absoluten Lagegenauigkeiten des Teilblockes.)h/

Einschränkend muß hierzu erwähnt werden, daß mit dem Korrelator nur unter bestimmten Voraussetzungen (Ackermann, 1985) Punktmessungen durchgeführt werden können. Da diese Bedingungen bei der vorliegenden Untersuchung nicht gegeben waren, wurden für den absoluten Lagevergleich der Versionen NATKORR und SIGKORR die Bildkoordinatenmessungen der Vergleichspunkte aus der Version SIGC100 übernommen.

Erkenntnisse und Schlußfolgerungen

Als wesentliches Ergebnis kann herausgestellt werden, daß mit der Methode der digitalen Bildkorrelation ausgezeichnete Punktübertragungsgenauigkeiten erzielt werden. Aus den σ_0 -Werten in Tab. 3.1 (Version SIGC100, NATKORR, SIGKORR) läßt sich ein Anteil für den Korrelator von 3,0 μm bzw. 2,8 μm ableiten. Diese Ergebnisse stimmen mit den internen Präzisionsangaben des Korrelators überein. Es konnte auch nicht eindeutig geklärt werden, welchen Einfluß dabei die temperaturabhängigen tageszeitlichen Schwankungen der Abtastposition der Kamarasensoren (Gülch, 1985) haben. Bei den hier vorliegenden Messungen wurden nur jeweils vor der ersten und nach der letzten Messung eines jeden Tages eine Systemkalibrierung durchgeführt. Bei zukünftigen Messungen sollte nach jedem Bildwechsel die Abtastposition der Kamarasensoren überprüft werden, um diese temperaturabhängigen Fehlereinflüsse möglichst klein zu halten. /

Werden die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit denen einer Untersuchung verschiedener Punktübertragungs- und Markierungsgeräte (Sigle, 1981) verglichen, so zeigt sich deutlich die Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Punktübertragungsmethode.

Ein absoluter Vergleich der beiden Untersuchungen kann hier nicht angestellt werden, da die Randbedingungen (Bildmaterial, Blockgeometrie etc.) nicht identisch waren.

Die dort erzielten Ergebnisse basieren genauso wie das Ergebnis der Version SIGPK1 ($\sigma_0 = 2,4 \mu\text{m}$) auf Messungen mit einem Monokomparator Zeiss PK1. Für signalisierte Verknüpfungspunkte (18 Punkte pro Bild) ergab sich nach einer Bündelblockausgleichung mit 12 blockinvarianten Parametern ein der SIGPK1-Version vergleichbarer σ_0 -Wert von 2,6 μm . Künstlich markierte Verknüpfungspunkte führten auf einen δ_0 -Wert von 6 μm .

Bei den hier vorliegenden Untersuchungen wurden die σ_0 -Werte für natürliche Verknüpfungen zu $4,0 \mu\text{m}$ und für signalisierte Verknüpfungspunkte zu $3,9 \mu\text{m}$ ermittelt. Die Punktübertragung durch digitale Bildkorrelation ist somit der Präzisionsaerotriangulation zuzuordnen.

Bei der Bereinigung des Blockes NATKORR mußten 20 Messungen eliminiert werden. 75 % dieser Ausfälle konnten bereits bei der Korrelation lokalisiert werden und sind auf Bildfehler (Kratzer in der Filmemulsion, Trocknungsflecken etc.) bzw. falsche Näherungseinstellungen (Identifizierungsfehler) zurückzuführen.

Von den in der Version SIGKORR zusätzlich ausgefallenen fünf Messungen sind vier durch schlechtere Korrelationswerte aufgefallen.

Das bedeutet, daß die Rate der Selbstdiagnose bei der Korrelation sehr hoch ist. Allerdings können Fehlkorrelationen gleichartiger Objekte nicht ausgeschlossen werden.

3.2 Teilautomatische Oberflächenerfassung

Bei der photogrammetrischen Oberflächenvermessung mit dem Planicomp wird der Operateur durch verschiedene Systemprogramme des analytischen Auswertegerätes unterstützt. Die stereoskopische Feineinstellung, das Aufsetzen der Meßmarke auf die Objektoberfläche ist aber auch bei diesem Auswertesystem operateurabhängig.

Es wird hier von einer Vergleichsmessung berichtet, bei der die Stereomessung zum einen von einem erfahrenen Auswerter und zum anderen vom Korrelator durchgeführte wurde.

Bildmaterial

Für diesen Test wurden zwei UMK-Aufnahmen einer präparierten Industriebeschaffenheit verwendet ($m_B \approx 1:23$, $c = 99,18$ mm, $p \approx 60$ %). Da für die äußere Orientierung des Bildpaares keine Daten vorlagen, mußte ein freies Bezugssystem gewählt werden, das sich auf geschätzte Punktabstände im Objektraum bezieht.

Messung

Die Messungen wurden auf einen Teilausschnitt von ca. 1 cm x 1 cm im Bild beschränkt. Diese Fläche wurde profilweise abgefahren. Die Profilvorgabe bei der Korrelatorunterstützten Messung erfolgt in einem oder beiden Bildern (hier links). Nach Vorgabe des Profilanfangs- und Profilendpunktes wird der (linke) Bildwagen schrittweise um konstante Intervalle weiterbewegt. Die entsprechende Position des zweiten Bildwagens wird aus den vorangegangenen Messungen präzisiert und anschließend durch das Ergebnis der Korrelation korrigiert. Für die vorliegende Untersuchung wurde in Profilrichtung eine Schrittweite von 0,1 mm gewählt. Der Abstand der Profile betrug 0,2 mm. Eine solche dichte Punktfolge war nötig, da der Konvergenzradius der Korrelation relativ klein ist ($< 80 \mu\text{m}$) und das angewandte Prädikationsverfahren sehr empfindlich auf Krümmungsänderungen der Objektoberfläche reagiert.

Insgesamt wurden 36 Profile gemessen. Die durchschnittliche Punktzahl für jedes Profil liegt bei 76 Punkten.

Bei der Messung sind aus verschiedenen Gründen Korrelationsausfälle aufgetreten, bei denen der Operateur über eine Menueinstellung in den Meßprozess eingreifen konnte. Die häufigsten Korrelationsausfälle sind auf fehlende Bildstruktur, Lichtreflexion, Kantensprünge und große Affinitätsunterschiede der beiden Bildausschnitte zurückzuführen. Da diese Störungen nur lokal aufgetreten sind, konnte die Mehrzahl der Profile ohne wesentliche Eingriffe des Operateurs gemessen werden.

Bei der Messung des Operateurs erfolgt die Profilvergabe im Objektraum. Die zu messenden Punkte werden automatisch angefahren (Lage). Vom Operateur ist lediglich die Höhe (Tiefe) nachzustellen. Der Punktabstand in Profilrichtung bei der vorliegenden Messung betrug 2,3 mm (0,1 mm im Bild) und der Profilabstand 4,6 mm (0,2 mm im Bild).

Berechnungen und Ergebnisse

Aus den beiden Datensätzen wurden mit dem Programmsystem SCOP Isolines (Fig. 3.5 und 3.6) abgeleitet. Aus der Operateurmessung standen dazu ca. 3 200 und aus der Korrelatormessung ca. 2 700 Koordinatentripel zur Verfügung. Der gewählte Isolinenabstand beträgt 1 mm.

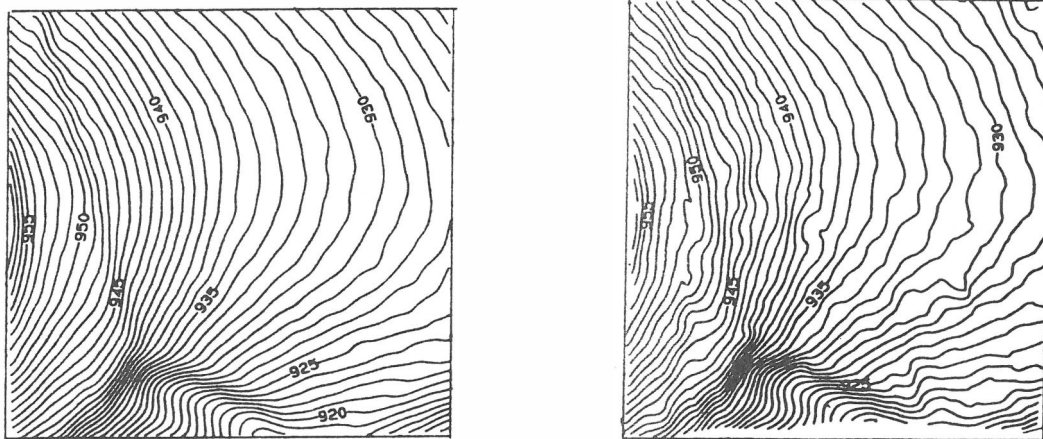


Fig. 3.5 + 3.6 Isolines im 1 mm-Intervall einer präparierten Industriebefläche
a) konventionelle Messung
b) korrelatorunterstützte Messung

Um die beiden Messungen miteinander zu vergleichen, wurde an den Stützstellen der Korrelatormessungen die Differenzen zu dem aus der Operateurmessung abgeleiteten DHM gebildet. Die Ergebnisse sind im Histogramm (Fig. 3.7) zusammengefaßt und zeigen eine systematische Abweichung der Korrelatormessung gegenüber der Operateurmessung von $-0,20$ mm. Die mittlere quadratische Abweichung beträgt $0,37$ mm.

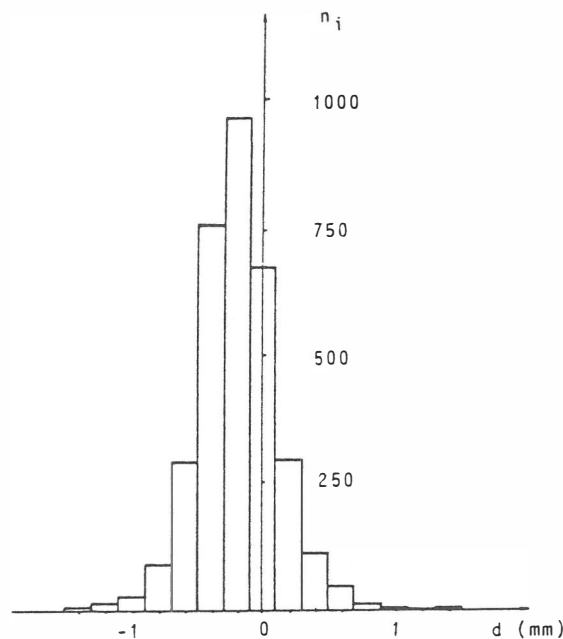


Fig. 3.7 Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen der konventionellen und der korrelatorunterstützten Messung

Der ruhigere Isolinienvverlauf der Operateurmessung kann damit erklärt werden, daß der Operateur die Meßmarke auf der Objektoberfläche entlangführen kann (Filterfunktion), während der Korrelator zwischen Objektoberfläche und der auf die Objektoberfläche aufgesprühten Farbpräparierungen nicht unterscheiden kann.

Die Vergleichsmessung hat gezeigt, daß die stereoskopische Feineinstellung durch die digitale Bildkorrelation übernommen werden kann. Voraussetzung dafür ist allerdings eine kontrastreiche Objektoberfläche. Die bei der Messung aufgetretenen Schwierigkeiten betreffen vornehmlich die Näherungswertbestimmung für die Bildkorrelation. Diese können durch verschiedene Verfahren der Bildzuordnung (Förstner, 1985; Kories, 1985) gelöst werden.

3.3 Bestimmung der räumlichen Veränderung von Objekten aus Meßbildern

Werden photogrammetrische Meßmethoden zur Erfassung deformierter oder lageveränderter Objekte angewandt, so treten oftmals Schwierigkeiten bei der Punktidentifikation und Punktzuordnung der Vergleichspunkte in den Bildern der verschiedenen Meßepochen (unterschiedliche Bildmaßstäbe, Lageverschiebung und Formveränderung der Objekte) auf. Die Punktzuordnung bzw. -übertragung kann auf verschiedene Weise erfolgen (Hellmeier, Wendt, 1982).

Am Beispiel eines jungvulkanischen Gebietes im Nord-Osten Islands wird hier ein Verfahren der Punktübertragung vorgestellt, bei dem die Möglichkeiten des analytischen Auswertesystems und der digitalen Bildkorrelation genutzt werden. Im Vordergrund der Untersuchung steht dabei nicht der Präzisionsnachweis der digitalen Bildkorrelation als Punktübertragungsmethode (siehe hierzu 3.1), sondern die Funktionstüchtigkeit des Verfahrens zur Gewinnung von Verschiebungsvektorfeldern aus Meßbildern, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden.

Bildmaterial

Für die Untersuchungen standen uns die Luftbilder (Originalnegative) aus drei Befliegungen (1976, 1980, 1982) zur Verfügung. Aus den Epochen 1976 und 1980 wurde jeweils ein Bildpaar ausgewählt, in dem sich das geodätische Profil Gjastykki befindet. Die Bilder der Epoche 1982 konnten nicht verwendet werden, da sich die Objektoberfläche zwischen den Bildflügen 1980 und 1982 (neuer Lavastrom) wesentlich verändert hat. Neben den Randabbildungen standen keine weiteren Daten zur inneren Orientierung der Aufnahmen zur Verfügung.

Objektsystem

Zur Einpassung der photogrammetrischen Modelle in das Geländesystem standen keine ausreichenden Informationen zur Verfügung. Zwar sind im Spatengebiet von Gjastykki geodätisch bestimmte Stützpunkte vorhanden, doch sind diese auf Grund fehlender Signalisierung schwer identifizierbar. Wegen der ungünstigen Verteilung eignen sich die Paßpunkte (Fig. 3.8) nicht für die absolute Orientierung der photogrammetrischen Modelle. Außerdem fallen die geodätischen Bestimmungen nicht mit den Zeitpunkten der Bildflüge zusammen. Deshalb erfolgte lediglich eine relative Einpassung der photogrammetrischen Modelle in das terrestrische System. Die Grundlagen dafür wurden der topographischen Arbeitskarte Gjastykki (Weimann, 1979) entnommen.