

# Adaptive kleinste Quadrate Korrelation und geometrische Zusatzinformationen

Autor(en): **Grün, A.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **83 (1985)**

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

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-232612>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

are provided including individual variances and covariances for all ground points and camera stations. A subsequent block adjustment program has been written by James Lucas (Lucas, 1984), that proceeds by elimination of the camera stations and solving for the ground points. This approach is more amenable computationally to determine the distance, azimuth, and elevation difference with corresponding variances and covariances for all inter-visible ground points that are located within a moderate distance of each other to satisfy geodetic survey requirements.

Any targets or passpoints that have been overlooked, or rejected during coordinate refinement or block adjustment, may be recovered. Only the required point and its six nearest reseau need be measured manually, processed through the coordinate refinement program, merged with the other photograph points and reprocessed through the block adjustment. This relatively short process not only helps maintain block geometry and data set integrity, but also can be used to add new points for which precise coordinates are desired.

### Results and Comments

The results presented in the Table of the Casa Grande and Ada County projects demonstrate the power of this photogrammetric process. Each of those projects was designed for U.S. section corners set at one mile spacing which in turn dictated the project photoscales. The only other design constraint of the process is a nominal spacing of geodetic control every five to seven air bases around the periphery of the project area.

Although the above describes a very efficient process, there are several improvements that we hope to achieve. Automatic pointing using a solid state

detector array on the comparator, coupled with a high speed on-line parallel processor, can eliminate the need for manual operator pointings on all targetted and reseau images. The use of a backlighted reseau such as the NOS design (Perry, 1978) that was used for the NASA-ITEK Large Format Camera and is currently being fabricated at NOS for a Wild RC-10 camera will enable more optimal photograph processing. That is, photographic exposure can be optimized for both backlighted reseau and ground target images, since both are high energy light sources, whereas the current combination of shadow (projected) reseau with high energy ground targets limits the latitude of photograph exposure and development. The addition of bordering techniques and self calibration modeling to the block adjustment programs can enhance the output products. And finally, it can be foreseen that in the not too distant future new digital stereocorrelation devices used in conjunction with high resolution metric camera systems, employing forward motion compensation, will eliminate the need for artificial ground targets to be placed in passpoint locations, thus eliminating significant field efforts.

### Summary

The attainment of accuracies better than two micrometers, as demonstrated in the 1978 Casa Grande project and repeated in the Ada County project, can be routinely achieved if proper care is taken "a priori" to eliminate all known sources of systematic error. The pursuit and achievement of such high accuracies can be attributed to the influence of Dr. Hellmut Schmid on the photogrammetric research efforts at NOS. The photogeodesy process described is dependent on the strength of geometric design coupled with redundant observations and measurements,

and powerful adjustment routines. Its use to densify basic control while at the same time providing a photographic control data base will meet many of the initial and future needs of a national multipurpose cadastre program.

### References

- Brown, Duane C.: Densification of Urban Geodetic Nets. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 43, 1977, pp. 447-467.
- Eichert, H.P., and R.C. Eller: Triangulation Test for Topographic Mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Oct. 1969, pp. 1039-1046.
- Fritz, Lawrence W. and Hellmut H. Schmid: Stellar Calibration of the Orbigon Lens. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, January 1974, pp. 101-115.
- Lucas, James R.: Photogrammetric Densification of Control in Ada County, Idaho: Data Processing and Results. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, May 1984, pp. 569-575.
- National Research Council: Need for a Multipurpose Cadastre. National Academy Press, Washington, D.C., 1980, 122 p.
- Perry, L.H.: An NOS-Developed Backlighted Reseau and Its Effect on Coordinate Refinement. Proceedings ASP Technical Meeting, October 1978, Albuquerque, New Mexico, pp. 431-438.
- Perry, L.H.: Photogrammetric Summary of the Ada County Project. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, May 1984, No. 5, pp. 563-567.
- Schmid, Hellmut H.: Three-Dimensional Triangulation with Satellites. NOAA Professional Paper 7, October 1974, 91 p.
- Slama, Chester C.: High Precision Analytical Photogrammetry Using a Special Reseau Geodetic Lens Cone. Proceedings of ISP Commission III International Symposium, International Society for Photogrammetry, 31 July-5 August, 1978, Moscow, U.S.S.R.
- Woodcock, L.F., and B.F. Lampton: Measurement of Crustal Movements by Photogrammetric Methods. 1964 ACSM-ASP Convention, Washington, D.C.

Adresse des Verfassers:  
Lawrence W. Fritz  
NOAA, National Ocean Survey  
6001 Executive Blvd., N/CG 233  
Rockville, Maryland 20852, USA

## Adaptive kleinste Quadrate Korrelation und geometrische Zusatzinformationen

A. Grün

### Vorwort

Es ist das Bestreben nach Verfeinerung der photogrammetrischen Verfahren zur Punktbestimmung, welches sich als das Hauptelement aus dem beruflichen

Lebenswerk Hellmut Schmid's herauskristallisiert. Methoden zur Punktbestimmung und deren Verbesserung stehen auch heute noch im Zentrum wissenschaftlichen Interesses in der Photogrammetrie. Zum Aspekt der Verfeinerung der Schätzmodelle kommt in letzter Zeit zunehmend das Problem der Automatisierung der Aufnahme- und

vor allem der Auswerteprozesse. Der automatischen Korrelation, oder etwas allgemeiner, der Methode des «Image Matching» kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Image Matching ist eine Grundfunktion der Photogrammetrie. Fast alle anderen Arbeiten bauen auf ihr auf, und ihr Ergebnis ist bestimmend für die Qualität des Ge-

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich  
Separata Nr. 93

samtresultats. Obwohl die neuen Image Matching Verfahren, die auf der gegenseitigen Zuordnung von Grauwerten aus verschiedenen Bildern beruhen, sich selbst noch in der Entwicklung befinden, zeichnen sich jetzt schon Systeme ab, welche die Möglichkeit bieten, Korrelations- und Punktbestimmungsprobleme simultan zu lösen. Damit erklimmen die Verfahren der photogrammetrischen Punktbestimmung nicht nur methodisch ein neues Niveau, sondern es eröffnen sich auch hinsichtlich Genauigkeit, Wirtschaftlichkeit und neuer Anwendungen interessante Aspekte für die Zukunft.

Folgende Bemerkung, bereits im Jahre 1959 publiziert, unterstreicht in diesem Zusammenhang die Weitsicht Hellmut Schmid: «Das Problem der Analytischen Photogrammetrie konzentriert sich heute offenbar nicht mehr so sehr auf die Frage der numerischen Behandlung der gemessenen Bildkoordinaten als vielmehr auf die Schwierigkeiten einer instrumentellen Lösung für die Aufgaben der Identifizierung und der koordinatenmässigen Erfassung des Bildinhalts» (Schmid 1959, Seite 10, 11). Der folgende Beitrag versucht, Identifizierung, Koordinierung des Bildinhalts und objektseitige Punktbestimmung zu automatisieren und zum Teil simultan zu lösen. Er baut somit ganz auf der Tradition Hellmut Schmid's auf. Er stellt eine logische Fortsetzung seiner Arbeiten dar im Zeichen einer Periode des Übergangs von der Analytischen zur Digitalen Photogrammetrie.

## 1. Einleitung

Die adaptive kleinste Quadrate Korrelation hat sich als genaues und flexibles Image Matching Verfahren erwiesen (Förstner 1982, Ackermann 1984, Grün 1985). Allerdings ist die Qualität des Ergebnisses nach wie vor in erster Linie vom Signalinhalt des zu korrelierenden Musters abhängig. Da bei vorliegendem Bildmaterial diese Signalinformation nur in beschränkter Masse verbesserungsfähig ist, muss versucht werden, anderweitig Informationen zu beschaffen, welche die Korrelation nutzbringend stützen können. Eine wichtige Klasse von Informationsträgern sind geometrische Zusatzbedingungen. Diese geometrischen Elemente liegen besonders bei photogrammetrischen Anwendungen sehr häufig vor, sei es bereits in der Anlage des Netzes (Verwendung von metrischen Kammern mit bekannter innerer Orientierung, bekannte Daten der äusseren Orientierung, Mehrfach-Bildüberdeckungen usw.) oder im Hinblick auf die besondere Art der Auswertverfahren (Bestimmung eines Objektpunktes aus mehreren Bildern, Messungen über vorgegebenen Grundrisskoordinaten, wie etwa über einem regel-

mässigen Netz, in Profilen, Messung von Höhenlinien usw.).

Diese Arbeit formuliert einige dieser Zusatzbedingungen analytisch. Dem Grundsatz von Allgemeingültigkeit und Flexibilität folgend werden die Zusatzbedingungen als linearisierte oder lineare Fehlergleichungen im Kontext der kleinsten Quadrate angegeben. Diese Fehlergleichungen werden zu jenen aus der reinen Grauwertkorrelation dazugekommen, womit auch das Gesamtsystem dem Modell der vermittelnden Ausgleichung (Standardproblem II) entspricht. Somit führen die Ansätze zu hybriden Systemen («Kombinierte Ausgleichungen»), wobei Grauwertbeobachtungen mit metrischen Bild- und Objektgrössen kombiniert werden.

Im folgenden werden behandelt: Punktbestimmung durch Mehrphotokorrelation unter Verwendung der Kollinearitätsbedingung bei bekannten und unbekanntem Daten der äusseren Orientierung (letzteres entspricht der klassischen Bündeltriangulation der Analytischen Photogrammetrie), automatische Profilierung, Gittermessungen und Höhenlinienmessung zur Produktion von DHM-Daten. Abschliessend wird noch ein Verfahren zur simultanen Korrelation mehrerer Muster vorgestellt.

Das Prinzip der adaptiven kleinsten Quadrate Korrelation sowie dessen Stützung durch die Kollinearitätsbedingung wurde in Grün (1985) diskutiert. Im folgenden werden daher nur die grundsätzlichen analytischen Formulierungen der erwähnten Verfahren gebracht. Eine weitere formelmässige Ausgestaltung und Erläuterung durch praktische Ergebnisse muss späteren Arbeiten vorbehalten bleiben.

## 2. Punktbestimmung durch Mehrphotokorrelation unter Einbeziehung der Kollinearitätsbedingungen

Für  $k + 1$  Photos erhalten wir  $k$  Gleichungssysteme zur Grauwertkorrelation für *einen* Objektpunkt  $P$  nach

$$\begin{aligned} -e_1 &= A_1'x_1 + A_1''x_1'' - \ell_1; P_1 \\ -e_2 &= A_2'x_2 + A_2''x_2'' - \ell_2; P_2 \\ &\vdots \\ -e_k &= A_k'x_k + A_k''x_k'' - \ell_k; P_k \end{aligned} \quad (1a)$$

und in kompakter Schreibweise

$$-e = A'x' + A''x'' - \ell; P \quad (1b)$$

Die Vektoren  $x_i' = (\Delta x, \Delta y)_i^T$  ( $i=1, \dots, k$ ) enthalten die Translationsparameter  $\Delta x_i, \Delta y_i$  der Bildkorrelationspunkte, während die Vektoren  $x_i''$  die restlichen geometrischen und radiometrischen Transformationsparameter repräsentieren. Die  $k + 1$  Kollinearitätsbedingungen können in linearisierter Form angesetzt werden zu

$$\begin{aligned} B_0''y_0 + t_0 &= 0, \\ B_1'x_1 + B_1''y_1 + t_1 &= 0, \\ &\vdots \\ B_k'x_k + B_k''y_k + t_k &= 0, \end{aligned} \quad (2a)$$

oder

$$B'x' + B''y + t = 0. \quad (2b)$$

Der Index (o) bezieht sich dabei auf das Bezugsmuster («template»). Für die Bilder aller anderen Muster wird eine modifizierte Form der Kollinearitätsbedingung benutzt, in welche die Translationsvektoren  $x_i'$  als zusätzliche Parameter einbezogen werden.

Der Zusammenschluss zwischen (1a) und (2a) ist gegeben über die Vektoren  $x_i'$ , also über die Translationsparameter  $\Delta x_i, \Delta y_i$  der Bildkorrelationspunkte.

Können in den Kollinearitätsbedingungen die Parameter der äusseren Orientierung als fest (gegeben) vorausgesetzt werden, so entspricht das System (1b), (2b) in übertragenem Sinn dem räumlichen Vorwärtsschnitt.

### a) Räumlicher Vorwärtsschnitt

Die Gleichungen

$$\begin{aligned} B_0''y_0 + t_0 &= 0, \\ B_i'x_i + B_i''y_i + t_i &= 0, i=1, \dots, k \end{aligned}$$

aus (2a) beschreiben folgende linearisierte Gleichungspaare:

$$\Delta x_i + \frac{\partial F_i^x}{\partial X} dX + \frac{\partial F_i^x}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_i^x}{\partial Z} dZ + F_i^{x(o)} + x_i^{(o)} = 0, \quad (3a)$$

$$\Delta y_i + \frac{\partial F_i^y}{\partial X} dX + \frac{\partial F_i^y}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_i^y}{\partial Z} dZ + F_i^{y(o)} + y_i^{(o)} = 0, \quad (3b)$$

wobei  $F_i^x, F_i^y$  die Funktionen der nichtlinearen Kollinearitätsbedingungen und  $X, Y, Z$  die Koordinaten des Objektpunktes darstellen. Da das Bezugsmuster festgehalten wird, gilt

$$x_0' = 0, \text{ d. h. } \Delta x_0 = \Delta y_0 = 0.$$

Tatsächlich wird System (2b) als System von Fehlergleichungen behandelt, wobei die Näherungswerte für die Bildkoordinaten des Korrelationspunktes ( $x_i^{(o)}, y_i^{(o)}$ ) als Beobachtungen aufgefasst werden.

Somit erhalten wir anstelle (2b)

$$-e_t = B'x' + B''y + t; P_t \quad (4)$$

mit

$$e_t \sim N(0, \sigma_0^2 Q_{tt}) \quad ; Q_{tt} = P_t^{-1}$$

Das Gesamtsystem (1b), (4) wird nach den Regeln der vermittelnden Ausgleichung standardmässig behandelt.

**b) Kernlinienkorrelation**

Die Stabilisierung der Korrelation durch Kernlinienbedingungen ergibt sich als Spezialfall der Kollinearitätsbedingungen. Werden aus den Gleichungen (3a), (3b) vor der Lösung des Gesamtsystems (1), (4) die Punktparameter  $dX, dY, dZ$  vorweg eliminiert, so entsprechen die verbleibenden Gleichungen den Kernlinienbedingungen. Im Falle von nur zwei Photos erhalten wir eine Bedingung. Dann ist die Situation vergleichbar mit der Verwendung der Kernlinienbedingung bei der Kreuzkorrelation.

**c) Digital-analytische Bündeltriangulation**

Kann über die äussere Orientierung nicht verfügt werden, so sind deren Parameter in die Kollinearitätsbedingungen (3a), (3b) aufzunehmen. Die Lösung des jetzt entstehenden Gesamtsystems (1b), (4) kann nicht mehr sequentiell Punkt für Punkt erfolgen, sondern es müssen mehrere Punkte gleichzeitig im System bestimmt werden. Daneben ist auch für eine ausreichende Anzahl von Datumsinformationen («Passpunkte») zu sorgen. Lösbarkeitsbedingungen sind für dieses Problem noch zu formulieren. Prinzipiell entspricht dieses Verfahren der konventionellen Bündellösung.

**3. Datenerhebungsmodi für das Digitale Höhenmodell**

Grundsätzlich können auch hier mehr als zwei Photos simultan verarbeitet werden. Zunächst wird wieder vorausgesetzt, dass alle Orientierungsdaten der Bilder bekannt sind. Zur Messung einzelner, beliebiger Punkte der Objektoberfläche können wir auf das System (1b), (4) zurückgreifen.

**a) Korrelation über festen Grundrisskoordinaten**

Ist über festen Grundrisskoordinaten  $X, Y$  zu korrelieren, wie im Gitter- und Profilmodus, dann wäre die Grauwertkorrelation folgendermassen zu formulieren

$$\begin{aligned} -e_1 &= -A'_0 x'_0 + A'_1 x'_1 + A'_2 x'_1 - l_1 ; P_1 \\ &\vdots \\ -e_k &= -A'_0 x'_0 + A'_k x'_k + A'_k x'_k - l_k ; P_k \end{aligned} \quad (5a)$$

oder

$$-e = -A'_0 x'_0 + A' x' + A'' x'' - l ; P(5b)$$

Hier ist auch das Template für Translationen freizugeben, d.h. es ist der Vektor  $x'_0 = (\Delta x_0, \Delta y_0)^T$  mitzuführen.

Ähnliches gilt auch bei den geometrischen Zusatzbedingungen. Anstelle (2a) erhalten wir hier

$$\begin{aligned} B'_0 x'_0 + B'_0 y'_0 + t_0 &= 0, \\ &\vdots \\ B'_k x'_k + B'_k y'_k + t_k &= 0. \end{aligned} \quad (6a)$$

oder

$$B' x' + B'' y'' + t = 0. \quad (6b)$$

Gleichung (6b) ist nicht mit (2a) identisch. Neben der Einführung von  $x'_0$  hat auch  $y$  eine andere Struktur. Wegen der Vorgabe von  $X$  und  $Y$  finden nun als modifizierte Kollinearitätsbedingungen die Gleichungen

$$\Delta x_i + \frac{\partial F_i^x}{\partial Z} dZ + F_i^{x(o)} + x_i^{(o)} = 0, \quad (7a)$$

$$\Delta y_i + \frac{\partial F_i^y}{\partial Z} dZ + F_i^{y(o)} + y_i^{(o)} = 0 \quad (7b)$$

Verwendung. Der Index  $i$  läuft nun über  $i=0, \dots, k$ .  $F_i^x, F_i^y$  sind die Funktionen der nichtlinearen Kollinearitätsbedingungen bei festgehaltenen  $X, Y$ -Werten.

**b) Korrelation von Höhenkurven**

Höhenkurven können direkt digital korreliert werden. Zu den Grauwertkorrelationsgleichungen (5a) addieren wir dazu wiederum eine modifizierte Form der Kollinearitätsgleichungen, bei der die Höhe  $Z$  festgehalten wird. Formal lassen sich diese Gleichungen wie bei (6b) anschreiben zu

$$B' x' + B'' y'' + t = 0. \quad (8)$$

Allerdings enthält der Vektor  $y$  hier die Punktparameter  $dX, dY$  entsprechend den modifizierten linearisierten Kollinearitätsgleichungen

$$\Delta x_i + \frac{\partial F_i^x}{\partial X} dX + \frac{\partial F_i^x}{\partial Y} dY + F_i^{x(o)} + x_i^{(o)} = 0, \quad (9a)$$

$$\Delta y_i + \frac{\partial F_i^y}{\partial X} dX + \frac{\partial F_i^y}{\partial Y} dY + F_i^{y(o)} + y_i^{(o)} = 0. \quad (9b)$$

( $i = 0, \dots, k$ )

$F_i^x, F_i^y$  sind hier die Funktionen der nichtlinearen Kollinearitätsbedingungen bei festgehaltenen  $Z$ -Werten.

**4. Mehrfachmusterkorrelation**

Dem Wunsch nach Stabilisierung der Korrelation entsprechend wird hier ein Satz von unmittelbar benachbarten Bildmustern simultan korreliert. Die Grundidee besteht darin, «schwache» Muster durch Ausnutzung von Punktidentitätsbedingungen durch benachbarte «gute» Muster zu stützen.

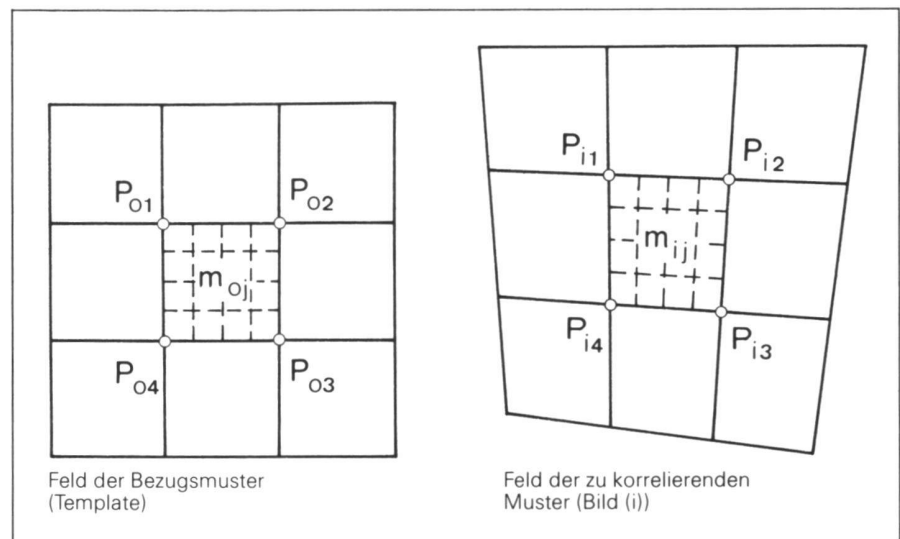
Die Korrelation der Muster  $m_{0j}, m_{ij}$  (siehe Abbildung) findet hier nicht mehr unabhängig von  $j$  statt, sondern es werden alle Muster eines Verbands simultan korreliert unter Einbeziehung der Nachbarschaftsbeziehungen aneinandergrenzender Muster. Diese Nachbarschaftsbeziehungen werden formuliert als Lagekorrespondenzen identischer transformierter Bildpunkte in benachbarten Mustern. Die Punkte  $P_1, \dots, P_4$  aus der Abbildung sind solche identischen Punkte, wobei jeder Punkt ausser dem Muster  $m_{ij}$  auch noch den drei direkt daran anschliessenden Mustern angehört.

Im folgenden werden wir, ohne Einschränkung der Allgemeinheit, von nur zwei Bildern ausgehen (Template und Bild).

Die Transformationsgleichungen für jeden Punkt (Pixelzentrum) eines Musters  $j$  lauten bei affinem Ansatz

$$\bar{x}_{\ell_j} = \Delta x_j + a_{12j} x_{\ell_j} + a_{21j} y_{\ell_j}, \quad (10a)$$

$$\bar{y}_{\ell_j} = \Delta y_j + b_{12j} x_{\ell_j} + b_{21j} y_{\ell_j}. \quad (10b)$$



Mehrfachmusterkorrelation mit Nachbarschaftsbedingungen  
 $m_{0j} \dots j$ tes Bezugsmuster im Template  
 $m_{ij} \dots j$ tes Muster im Bild (i)

$\ell$  ist ein Punktnummerindex, über den die Punkte im Gesamtmusterverband identifiziert werden können.

Die Bedingungen für die Lagekorrespondenzen eines transformierten Punktes ( $\ell$ ) lauten

$$\bar{x}_{\ell(j-m)} = \dots = \bar{x}_{\ell_j} = \bar{x}_{\ell(j+n)} \quad (11a)$$

$$\bar{y}_{\ell(j-m)} = \dots = \bar{y}_{\ell_j} = \bar{y}_{\ell(j+n)}.$$

Die Summe  $m+n+1$  repräsentiert die Anzahl der zu einem bestimmten Punkt gehörenden Muster (z. B.  $m+n+1=4$  für jeden Punkt  $P_1, \dots, P_4$  aus der Abbildung).

Das Gleichungssystem zur Grauwertkorrelation lautet hier

$$-e_j = A_j'x_j' + A_j''x_j'' - \ell_j; P_j \quad (12)$$

$j=1, \dots, p; p \dots$  Anzahl der Einzelmuster im Verband

Dieser Ansatz (12) ist formal identisch mit dem aus (1a), jedoch markiert hier der Index  $j$  das Einzelmuster im Verband.

Fassen wir die transformierten Punktkoordinaten als beobachtete Größen auf, so können wir die Korrespondenzbedingungen der identischen Punkte als Fehlergleichungen formulieren zu

$$-e_{\ell_j} = -\Delta x_j - a_{12j}x_{\ell_j} - a_{21j}y_{\ell_j} + \bar{x}_{\ell}; p_{\ell_j} \quad (13a)$$

$$-e_{\ell_j} = -\Delta y_j - b_{12j}x_{\ell_j} - b_{21j}y_{\ell_j} + \bar{y}_{\ell}; p_{\ell_j} \quad (13b)$$

oder

$$-e_{\ell_j} = C_j'x_j' + C_j''z_j + \bar{x}_{\ell}; P_{\ell_j} \quad (14)$$

Hier ist das Gesamtsystem (12), (14) zu lösen. Der Vektor  $x_j'$  beinhaltet  $z_j$  ( $z_j^T[a_{12},$

$a_{21}, b_{12}, b_{21}]_j$ ) und die radiometrischen Korrekturparameter. Die Punktkoordinaten  $\bar{x}_{\ell}, \bar{y}_{\ell}$  treten als neue, zusätzliche Unbekannte auf. Die geometrischen Identitätsbedingungen werden hier auf eine Weise genutzt, die dem Vorgehen bei der Anblockmethode der Modellblockausgleichung entspricht. Die Gleichungen (13a), (13b) korrespondieren dort mit den Gleichungen für die Verknüpfungspunkte.

Wiewohl hier nur auf die Korrelation von Musterverbänden aus zwei Bildern Bezug genommen wurde, kann dieses Verfahren durchaus auf mehr Bilder angewendet werden. Durch Hereinnahme von Kollinearitätsgleichungen kann auch hier ein zusätzlicher Stabilisierungseffekt erzielt werden.

### Ausblick

Das Anliegen dieses Artikels war es, verschiedene Möglichkeiten zur Ausnutzung geometrischer Zusatzbedingungen bei der kleinsten Quadrate Korrelation aufzuzeigen. Es wurden nur die grundlegenden Formeln wiedergegeben. Die Methoden sind noch im praktischen Einsatz zu überprüfen. Konvergenzverhalten, Rechenaspekte (Ausnutzung dünn besetzter Matrixstrukturen, Berechnungsmethoden für Designmatrizen und Normalgleichungen im Iterationsprozess) sowie Qualitätskriterien sind schwerpunktmässig zu untersuchen.

Die simultane Korrelation mit mehr als zwei Photos bietet sich nicht allein bei Off-line Anwendungen, sondern auch für On-line und Real-time Auswertungen an. Falls mehr als zwei Photos auf den Bühnen eines analytischen Plotters Platz finden, ist es möglich, selbst bei

Verwendung nur zweier Arraykammern, mehr als zwei Korrelationsfenster sehr kurz hintereinander abzutasten. Ausserdem ist es durchaus vorstellbar, mehr als zwei Arraykammern simultan zum Abtasten einzusetzen. Auch bei der unmittelbaren Verwendung digitaler Kammern als Messkammern für Real-time Anwendungen werden sich Arrangements mit mehr als zwei Kammern in Zukunft durchsetzen.

Die Verfahren können auch in der terrestrischen Photogrammetrie verwendet werden.

Ein weiterer Schritt in Richtung verbesserter Image Matching Verfahren muss die Semantik des Bildes berücksichtigen. Methoden der Machine Vision und des Image Understanding werden somit künftig vermehrt Aufmerksamkeit finden.

### Literatur

Ackermann, F., 1984: Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. Photogrammetric Record, 11 (64), 429-439

Förstner, W., 1984: Quality assessment of object location and point transfer using digital image correlation techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXV, A3a, Commission III, Rio de Janeiro

Grün, A., 1985: Adaptive least squares correlation - A powerful image matching technique. Paper presented to the ACSM-ASP Convention, Washington, D.C., March

Schmid, H., 1958/1959: Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, Nr. 4 (1958), Nr. 1 (1959)

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Armin Grün

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

## A Future for Realtime Photogrammetry

G. L. and T.B. Hobrough

### 1. Introduction

We are pleased and honoured to contribute to this volume commemorating the career of Professor Hellmut Schmid. There seems to be no limit to the growth and spread of ideas arising out of his pioneering work in the measurement of ballistic trajectories by photogrammetric means.

For several years the authors have been collaborating in the application of binocular stereo vision to industrial robots. The links connecting Professor Schmid's work and robot vision are the analytical stereo plotter and the auto-

mation of photogrammetric plotting by stereo image correlation.

The early work of G.L. Hobrough on single point stereo correlation for automating projection plotters was contemporary with U.V. Helava's formulation of the first analytical stereo plotting method (1956 to 1961). Helava's work in turn initiated the present flowering of analytical plotters, all of which derive in some measure from Schmid's fundamental ideas.

During the period 1967 to 1972 G.L. Hobrough developed the Gestalt Photomapper which was a high speed

plotter employing both area correlation and analytic methods. The Gestalt instrument produced high quality orthophotographs and digital topography but was limited to small map scales by its inability to accommodate height discontinuities.

Since 1972 the Hobroughs (G. L. & T.B.) have overcome the problem of height discontinuity, originally for the purpose of overcoming the scale limitation in automatic plotters but ultimately for enabling the application of stereo correlation to real-time stereo vision for the control of industrial robots.