画像相関を使った空中写真からの等高線自動図化の一方法——処理手法と自動標定

Automatical Contour Production Using Image Correlation of Aerial Stereo Photographs——Processing and Automatic Orientation

森 忠次*・服部 進*
今井 啓介**・小川 一郎***

*Chuji MORI, Susumu HATTORI,
Keisuke IMAI, Ichiro OGAWA*

Abstract: A practical experiment for producing a contour map automatically from aerial stereo photographs using a drum scanning micro densitometer and a general purpose computer is described. The procedure is based partly on the Kreiling's method, and partly on the Konecny's method.

Among a sequence of procedures for automatical contour drawing, this paper contains photo digitizing, calibration of the image coordinate system using 4 fiducial marks, and automatical relative orientation using 2-dimensional image correlation. And following procedures, that is, digital rectification, production of grid elevation files using 1-dimensional image correlation, and contour map drawing will be discussed in the subsequent paper.

Some remarks obtained by the experiment are:

- 1) A drum scanning micro densitometer caused considerable irregular deformations in the image, which might not be tolerable from a photogrammetric point of view.
- 2) In the test of automatical relative orientation using 2-dimensional image correlation technique, when high contrast points are selected as the orientation points on the left image, the homologous points were capable of being searched with higher precision than when one identified the homologous points on the image printed with a line printer by eye-sight.
- 3) However, in the case that orientation points were given arbitrarily on the left image, the homologous points in the mountainous region could not be searched at all.

概 要: 走査型微少濃度計と汎用電子計算機を使用して、実体空中写真から数値地形モデルおよび等高線を自動的に製作する1つの方法について一連の実験を行った。この方法は基本的には Kreiling の研究と Konecny の提案に基づいているが実験によっていくつかの新しい成果を得た。

この論文は空中写真の画像分解から自動相互標定までを実験に則して説明した。まず空中写真をドラム走査型微少濃度計で画像分解し、画像の行、列を軸とする座標系を4隅の指標を使って較正する。つぎに左画像に与えた標定点を、画像の相関を使って右画像の中で探索し、解析的に標定要素を求めた。これに続く処理は左右画像を偏位修正してファイル処理を効率的に行えるようにした後、地上座標系の格子点標高を順次求めていく手続きをとっているがこれについては別に報告する。

前半の実験から得た注目すべき結果としては、

- 1) 現在のドラム走査型微少濃度計の機構ではフィルムの変形による画像の不規則歪みがかなり大きく、写真測量の観点からは許容度を越える。
- 2) 標定の自動化については、コントラストの高い点を標定点として左画像に与えればその対応点を機械的に探し出すことができ、相互標定の結果も目測でグレイマップを使って行った位置同定より高い精度が得られた。
- 3) しかし任意に標定点を与えた場合には、山地にある対応点を探し出すことはできなかった。

* 岡山大学工学部

** 愛媛県庁

*** 建設企画コンサルタント(株)

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 20, No. 4, 1981

1. 結 言

写真測量の自動化は2つの方向に分かれて進んでいる^{1), 2)}。1つは、写真座標の計測値を編集して図化したり、データファイルを作製する方向であって、Zeiss社 Planicomp C-100, OMI社 AP/C-3T, Bendix社 US-1 Universal Stereo Plotterなどに代表される解析図化機の進歩と、地図情報化システムと呼ばれるソフトウェアの開発に依存している。

他の1つは、写真座標の観測機構そのものを自動化して、等高線描画、数値地形モデル(DTM)や写真地図の作製を計算機の制御のもとで行おうとする考えであって、解析図化機との連動も試みられている。この論文は後者の課題についてその1つの方法を具体的な実験例に沿って紹介し、その問題点を述べたものである^{3), 4)}。

すでにいくつかの自動図化機が製作されていて、一部は実用に供されている。その代表としては、Gestalt Photomapping System (Gestalt社)^{5), 6)}, AS-11-BX Image Correlation System (Bendix社)⁷⁾などが挙げられる。これらの機械は原理的には例外なく実体画像の相関をとって、対応点の位置を決定する機構になっていて、実体空中写真をテレビカメラなどで走査し、信号を高速計算機でオンライン処理している。このほかにアナログで信号の相関を取り、DTMないし正射写真を製作するTopomat System (Zeiss Jena社)⁸⁾がある。さらにこの報文と同じく、走査型微小濃度計と汎用電子計算機を使い、オフラインで上記の機械処理を代行している例もすでにいくつか報告されている^{9), 10), 11)}。

本来実用上の見地からは、取り扱うデータの量、計算の速度といった点でオンライン処理が必須であるが、専用機の設計のためには、対応点の同定の手法や処理の流れを比較検討し、理論的、実験的考察を積み重ねる必要がある。汎用計算機による処理は安価で特別な装置を必要としないこと、多くの画像処理ソフトウェアを使用できるなどの点で、専用機開発の基礎として重要な意義を持つ。汎用計算機を使うオフライン処理には、またそれ自体で解決しなければならない問題を含んでいて、処理の流れもオンラインの場合とは変わってくることは否めないにしても、最も重要な対応点同定の手法やそれに伴う精度といった両者に共通する問題を取り扱うことができる。そこでここではオフラ

イン処理によって、等高線を自動描画していく手続きを研究し、具体的な実験に則して、その方法を順を追って解説する。実験の詳しい流れ図は次第に示すが、処理の概要としては、1対の実体空中写真のデジタル画像を作り、画像の相関によって標定点を自動探索して標定要素を求める。次に地上座標系に作った格子点の標高をこれも画像相関を使って求めていく構成になっている。本論文では処理の流れを示して、格子点標高決定に至るまでに実施した方法を明らかにするとともに、画像分解とそれに伴う座標系の校正、および自動相互標定について記述し、格子点標高を自動的に求める方法については後報に譲ることとする。

2. 自動等高線描画のための処理の流れ

ドラム走査型濃度計と汎用計算機による自動図化の研究は何人かの研究者の手で行われているが、これまでのところ原理的にはいずれもほとんど同じ方法によっている。図-1にこの実験で行った処理の流れを

図-1 等高線自動描画の流れ図

示す。これはKreiling¹²⁾の方法と同じであるが、随所に独自の工夫と考察を行っている。流れ図に則して概略を述べると次のようである。

- (1) 1対の実体空中写真を画像分解し、磁気テープに出力する。
- (2) 分解した画像の伸縮を補正するため、ステレオコンパレータを使って4隅の指標により座標系を校正する。
- (3) 標定要素を別に求めて計算機に入力してもよいが、ここでは自動的にこれを得ることを試みる。この実験では相互標定のみを扱い、左画像上にコントラストの強い標定点を与えてこの対応点を探索する場合と、任意に与えた標定点を探索する場合について実験した。
- (4) 偏位修正画像を作成する。両画像を独立標定法のモデル座標系（すなわち撮影基線をX軸とし、左写真の撮影点を通してX軸に直交するY,Z軸をとる。）のXY平面に偏位修正すれば、対応点は常に同じY座標を持つので、順編成ファイルの濃度値データを処理して対応点探索をするのに好都合となる。
- (5) 地上座標系 $X_G Y_G Z_G$ の $X_G Y_G$ 平面に格子をつくり、その格子点標高を順次探索して標高ファイルを作成する。ここではKonecny¹³⁾が提示した方法を改良、発展させた。
- (6) 格子点標高をフィルタリングして誤差を除いてから、格子点間を内挿して等高線を描画する。図の記号は等高線を手描きしたことを示すが、格子間隔は十分に密なので計算機による描画と大差はないであ

図-2 実験に使った左写真
 (1から6まで番号のついた領域(2.5cm×2.5cm)は相互標定点領域、
 (右下の大きな領域(5.0cm×5.0cm)は等高線描画領域)

ろう。

この報文は(1)から(3)までを記述する。ここでの自動相互標定は実験的に試みたものであって、求めた結果は種々の制約から不十分なもので、(4)に用いた標定要素は別にステレオコンパレータを使って解析的に求めたものであることをあらかじめ断っておく。

3. 実体空中写真の画像分解

画像分解にはJoyce Leoble 社ドラム走査型微少濃度計 Scandig 3 (京都大学食糧科学研究所所有)を使用した。画素の大きさは写真測量の観点からは20 μm程度が望ましいが¹⁴⁾、データ量が極端に大きくなるのと、ここではまだ実験段階であるので50 μmとした。濃度は0-3 Dを8ビットで測定し磁気テープに出力した。写真1枚あたりのデータ量は約22メガバイトであった。実験に使用した空中写真の諸元を表-1に示し、その左写真を図-2に示した。写真縮尺は1:26,000であって50 μmは地上1.3 mに相当する。

表-1 実験に使った空中写真の諸元

撮影計画	建設省国土地理院
撮影作業	東日本航空
地区名	岡山市吉備津
写真番号	CG-70-2X C1-3, 4
撮影年月日	昭和45年5月18日
撮影縮尺	1:26,000
撮影高度	3,900 m
カメラ	RMK 15/23

4. 画像座標系の較正

ドラム型の濃度計は画像を高速分解できる反面、ドラムにフィルムを巻き付ける操作でフィルムが変形し、複雑な歪みが入る。分解画像の画素の並びを行番号と列番号で表わした座標系(画像座標系と呼ぶ)ξηを、ステレオコンパレータの座標系に平行で主点を通る写

真座標系xyに変換することを考える。ξはドラムの円周方向にとり、写真のy軸と同じ方向にする。

もしフィルムが完全にドラムに密着されていれば、xy座標系とξη座標系とは、

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \tag{1}$$

というアフィン変換式が成り立つ。左右の写真について、それぞれ4つの指標を用いて最小2乗法で係数を求めたところ表-2の結果を得た。指標の画像座標はグレイマップ上で目測で求め、写真座標はステレオコンパレータで計測した。

画像にはドラムの円周方向でおよそ0.5%の縮みが見られた。残差の2乗平均値はかなり大きく、複雑な歪が残存していることがわかる。0.82画素の残差は写真測量の見地からは許容しがたいが、やむを得ずこのまま実験を続行した。この問題を解決するにはフィルムを圧着させる機構を設けるか、むしろフィルムは平面保持して位置的、光学的歪みを注意深く除去したテレビカメラ型の濃度計を使うのが望ましい。

5. 相互標定点の探索

オンライン処理の機械はモニタディスプレイを備えているので、これを用いて標定できるが、オフライン処理の場合には標定要素は別に求めて計算機に入力するのが便利である。しかし標定作業まで含めて自動化しようとする試みもあって、そのための2次元的な対応点探索手法がいくつか提案されている^{9), 10)}。ここではKreilingが行った方法を少し改良して相互標定点を自動的に探索することを試みた。

実験はまず左画像に特徴的な点を与え、これを右画像上で探索した。実験の手続きは以下のである。

(1) 左画像に相互標定点を与える。

図-2の□で示した6つの512×512画素の範囲を相互標定点領域と定義して、左画像上の1つの領域内に9点ずつ計54点の標定点を選んだ。標定点としては、

表-2 写真座標系と画像座標系の変換定数

	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	b_1	b_2	残差の2乗平均値
左写真	20.002 $\pm 7.84 \times 10^{-3}$	0.444 $\pm 7.84 \times 10^{-3}$	-0.430 $\pm 7.84 \times 10^{-3}$	19.390 $\pm 7.84 \times 10^{-3}$	2272.50 ± 0.626	2290.00 ± 0.626	0.626 (画素)
右写真	20.015 $\pm 1.028 \times 10^{-2}$	-0.165 $\pm 1.028 \times 10^{-2}$	0.157 $\pm 1.028 \times 10^{-2}$	19.400 $\pm 1.028 \times 10^{-2}$	2276.37 ± 0.821	2229.12 ± 0.821	0.821 (画素)

数字の単位は a_{ij} (画素/mm), b_j (画素)

ステレオコンパレータで計測するときと異なり、池の端、道路の境界など極めてコントラストの強い点をとった。標定点の例として図-3に標定点領域5のグレイマップを示す。図中の●は標定点である。

図-3 標定点領域5のグレイマップ
(●は相互標定点)

(2) 左画像の標定点に対する右画像の対応点の近似座標を計算する。

両写真の印画紙上で主点を移写し、 κ_1, κ_2 の近似値を求め、写真座標系を回転して κ_1, κ_2 を消去した新しい写真座標系に変換した。すると左写真の任意点 $p_1(x_1, y_1)$ に対応する右写真点 $p_2(x_2, y_2)$ の近似座標 $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ は次式で計算される。この点を近似対応点と呼ぶ。

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - B \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

B は写真上の主点間距離である。

(3) 右側写真上で探索ウィンドウを決定する。

Kreilingは近似点から $\pm 2\text{mm}$ 以内に対応点があると仮定しているが、この実験のようにモニタを持たない処理系ではこれは危険なので、以下のようにウィンドウの大きさを決定した。

独立標定法で標定したとき、標定要素 $\varphi_1, \kappa_1, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2$ が微小であって、撮影基線が地上に平行であると見なし得るとき、近似点 $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ と真の対応点 (x_2, y_2) との差

$$\begin{pmatrix} \Delta E_x \\ \Delta E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 - B \\ y_1 - y_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

を角度要素を使って表わしてみよう。図-4のように相互標定を終えた段階で、モデルの標高は H で一定とする。 c は画面距離、 B_C はモデルの撮影基線、 B は写真上の撮影基線で、左右写真の回転行列を $D_{\varphi_1 \kappa_1}$ 、 $D_{\varphi_2 \omega_2 \kappa_2}$ とする。左写真の任意点 $p_1(x_1, y_1)$ と右写真の対応点 $p_2(x_2, y_2)$ のモデル座標はそれぞれ、

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} X_{p_1} \\ Y_{p_1} \\ Z_{p_1} \end{pmatrix} = D_{\varphi_1 \kappa_1} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ c \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} X_{p_2} \\ Y_{p_2} \\ Z_{p_2} \end{pmatrix} = D_{\varphi_2 \omega_2 \kappa_2} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_C \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

となる。回転行列を次のように成分で表わしておくと、

$$D_{\varphi_1 \kappa_1} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}, \quad D_{\varphi_2 \omega_2 \kappa_2} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

一般に p_1, p_2 の座標の関係は地表点 $P(X, Y, H)$ を媒介して次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_2}{c} &= \frac{\delta_{11}(X - B_C) + \delta_{21}Y + \delta_{31}H}{\delta_{13}(X - B_C) + \delta_{23}Y + \delta_{33}H} \\ \frac{y_2}{c} &= \frac{\delta_{12}(X - B_C) + \delta_{22}Y + \delta_{32}H}{\delta_{13}(X - B_C) + \delta_{23}Y + \delta_{33}H} \\ \frac{X}{H} &= \frac{d_{11}x_1 + d_{12}y_1 + d_{13}c}{d_{31}x_1 + d_{32}y_1 + d_{33}c} \\ \frac{Y}{H} &= \frac{d_{21}x_1 + d_{22}y_1 + d_{23}c}{d_{31}x_1 + d_{32}y_1 + d_{33}c} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

いま $H=c$ とおき、各角度要素は微小であるとして、Taylorの定理を使って式(6)を展開すると、

図-4 微小な標定要素の変動による対応点の移動

$$\left. \begin{aligned} x_2 &\doteq x_1 - B_C - y_1 d\kappa_1 + \frac{1}{c} (c^2 + x_1^2) d\varphi_1 \\ &\quad + y_1 d\kappa_2 + \frac{1}{c} \{c^2 + (x_1 - B_C) y_1\} d\omega_2 \\ &\quad - \frac{1}{c} \{c^2 + (x_1 - B_C)^2\} d\varphi_2 \\ y_2 &\doteq y_1 + x_1 d\kappa_1 + \frac{x_1 y_1}{c} d\varphi_1 - (x_1 - B_C) d\kappa_2 \\ &\quad + \frac{1}{c} (c^2 + y_1^2) d\omega_2 - \frac{1}{c} (x_1 - B_C) y_1 d\varphi_2 \end{aligned} \right\} (7)$$

が得られる。ところで印画紙上では B_C ではなく B を計測することになるので、 B_C と B の関係を求めておく。左主点 $(x_1, y_1) = (0, 0)$ の右写真上の対応点の x 座標 x_{2P} は式(6)から

$$\frac{x_{2P}}{c} = \frac{\delta_{11}(d_{13}/d_{33} \cdot c - B_C)}{\delta_{13}(d_{13}/d_{33} \cdot c - B_C)} + \frac{\delta_{21}(d_{23}/d_{33} \cdot c) + \delta_{31}c}{\delta_{23}(d_{23}/d_{33} \cdot c) + \delta_{33}c} \quad (8)$$

したがって、

$$B \doteq -x_{2P} \doteq B_C - c d\varphi_1 + c(1 + (B_C/c)^2) d\varphi_2 \quad (9)$$

となる。式(3)に式(7)および式(9)を代入して ΔE_x 、 ΔE_y は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_x &= -\frac{x_1^2}{c} d\varphi_1 + y_1 d\kappa_1 - y_1 d\kappa_2 \\ &\quad - \frac{1}{c} (c^2 + (x_1 - B_C) y_1) d\omega_2 \\ &\quad + \frac{x_1}{c} (x_1 - 2B_C) d\varphi_2 \\ \Delta E_y &= -x_1 d\kappa_1 - \frac{x_1 y_1}{c} d\varphi_1 + (x_1 - B_C) d\kappa_2 \\ &\quad - \frac{1}{c} (c^2 + y_1^2) d\omega_2 + \frac{1}{c} (x_1 - B_C) y_1 d\varphi_2 \end{aligned} \right\} (10)$$

B_C の代わりに B を用いて上式の上限をとると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_x &\leq \left(\frac{x_1^2}{c} + 2|y_1| + \frac{1}{c} |c^2 + y_1(x_1 - B)| \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{c} |x_1(x_1 - 2B)| \right) \Delta \\ \Delta E_y &\leq \left(|x_1| + \frac{|x_1 y_1|}{c} + |x_1 - B| + \frac{1}{c} (c^2 + y_1^2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{c} |y_1(x_1 - B)| \right) \Delta \end{aligned} \right\} (11)$$

ここで、

$$\Delta = \max(|\varphi_1|, |\kappa_1|, |\varphi_2|, |\omega_2|, |\kappa_2|)$$

である。今後式(11)の右辺は Δx_{2M} および Δy_{2M} で表わすことにする。

Δx_{2M} 、 Δy_{2M} が探索ウィンドウとして適当な大きさを与えるかを調べるため、左画像の6つの相互標定点領域の中心点の画素について右画像の対応点を目測で求め、近似対応点と比較した。標定点領域3、4、6の中心画素は山中にあって、正確な対応点を指摘するのは困難であって、3、4画素のずれがあるかも知れないが、これらの点を正しい対応点と仮定した。通常 Δ は 1° 程度であって 3° に到ることは稀であるので $\Delta = 1^\circ$ としたときの Δx_{2M} 、 Δy_{2M} を求めて、近似対応点と正しい対応点の誤差とともに表-3の左半分に示した。表-3によれば Δx_{2M} 、 Δy_{2M} は探索範囲として適当な大きさを示していることがわかる。そこで各点ごとにこれを計算して、近似対応点から $\pm \Delta x_{2M}$ および $\pm \Delta y_{2M}$ を探索ウィンドウとした。

(4) 標定点の対応点を探索する。

右画像の対応点を探索するには、左画像の標定点と右画像の対応候補点それぞれを囲む有限のパッチの類似度を調べて、それが最も高い候補点をもって対応

表-3 標定点領域中心画素の近似対応点の精度および対応点の計算機探索の結果
(地形欄のFは平地、Mは山地を示す)

領相 域互 標 定 点 番 号	地 形	左標定点領域 中心画集		右画像の 近似対応点(A)		目測による正 しい対応点(B)		A)-(B)		Δx_{2M} , Δy_{2M}		計算機探索に よる対応点(C)		C)-(B)		相 関 係 数
		行	列	行	列	行	列	行	列	行	列	行	列	行	列	
1	F	2,586	2,596	847	2,258	892	2,492	45	66	65	86	893	2,492	1	0	0.83
2	M	3,986	2,596	2,247	2,588	2,210	2,518	37	70	94	86	2,307	2,573	83	55	0.61
3	M	2,614	4,207	838	4,170	868	4,082	30	88	110	123	809	4,081	59	1	0.69
4	M	4,014	4,207	2,238	4,200	2,224	4,098	14	102	153	123	2,136	4,148	98	50	0.40
5	F	2,558	985	856	946	910	879	54	67	97	109	904	877	6	2	0.85
6	M	3,958	985	2,256	976	2,278	922	22	54	136	109	2,207	927	71	5	0.60

パッチの相関係数は次のように定義される。パッチの濃度値ないしそれらに演算を施した数値を並べた行列（濃度値行列と呼ぶ）を左右それぞれ $\mathbf{C}_1 (N \times N)$, $\mathbf{C}_2 (N \times N)$ として、それらの i, j 要素を F_{ij}^1, F_{ij}^2 で表わす。 N は行列の次元である。このとき相関係数 ρ は、

$$\rho = \sigma_{12} / \sqrt{\sigma_{11} \sigma_{22}} \quad (12)$$

で与えられる。ここに、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (F_{ij}^1 - \bar{F}^1)^2 \\ \sigma_{22} &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (F_{ij}^2 - \bar{F}^2)^2 \\ \sigma_{12} &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (F_{ij}^1 - \bar{F}^1) (F_{ij}^2 - \bar{F}^2) \\ \bar{F}^1 &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}^1, \quad \bar{F}^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

である。

次に Kreiling の探索手法を示すと以下のである。設定した探索ウィンドウの内部を隅なく探索するのは不経済であるから、近似対応点から出発して外側に螺旋的に探索していく。そして相関係数 ρ が初めに設定したある閾値 TH_1 を越えると、螺旋探索から最急勾配探索に移る。これは 1 つの候補点から他の点に移るとき、周囲の点全てを調べて相関係数が最大となる方向へ探索を進めるものであって、最後には必ず 1 つの極大点に達する。もしこの点で相関係数 ρ が、やはり初めに設定したある閾値 TH_2 ($TH_2 > TH_1$) を越えないときは、もとの螺旋探索に戻る。極大点で TH_2 を越えるか、探索ウィンドウ内をすべて探索し終えたとき終了する。著者のいくつかの予備実験によれば、画像のテクスチャが豊富で地形の比高による画像の歪が無視できる場合、 $TH_1 = 0.4$ 、 $TH_2 = 0.7$ 程度が良好な結果を示した。統計学的根拠はないが、田畑、道路、屋根の比高が無視できる宅地などで、多くの場合正しい対応点の近傍で $\rho = 0.4$ 付近から相関係数は凸関数となり、また ρ の極大値は 0.7 以上となることが認められた¹⁶⁾。正しい対応点周辺の相関係数の分布の例として、標定点領域 5 の標定点 5 について図-5 に示す。中心の○で囲んだ画素は目測による対応点である。相関係数は 21×21 画素のパッチから計算した。

図-5 正しい対応点付近での相関係数の分布の例
(標定点領域5の点5, 相関係数は100倍している。)

図には100倍した数字で示した。極大点を中心に近傍で凸関数になっていることがわかる。一般に山地では、樹木の存在と土地の起伏のため相互相関の極大値は小さく、しかも極大値の周辺では速かに減少すると考えられたが実際には両者の間に顕著な違いは認められなかった。これは平地、山地を問わずコントラストの強い特徴的な点を与えているので周囲の平均的な性質に影響されにくいためである。

この実験では、さらに探索を速めるために、段階を2つに分け、第1段階では 10×10 画素ごとに平均して1画素が 0.5 mm (地上 13 m) $\times 0.5 \text{ mm}$ の画像に変換して、上記の螺旋線および最急勾配探索を行った。このときの相関パッチは 10×10 画素とし、 $TH_1 = 0.4$ とした。その結果螺旋線探索はうまく機能するものの、最急勾配探索では相関係数の極大値が 0.5 程度しかとらない例がしばしば見られた。これは相関パッチが大きいため、標定点周辺のテクスチャが生かされないからである。しかしその場合でも極大点は正しい対応点であることがほとんどだったので最急勾配探索では閾値を設けないことにした。さらにこの極大点を通る行、列方向それぞれ相隣る3点の相関係数に2次曲線をあてはめ頂点の画像座標を計算した。第2段階はこの頂点からもとの画像上で最急勾配探索を行った。このときは 21×21 画素のパッチで、閾値 $TH_2 = 0.65$ とした。到達した極大点で閾値を越えなければ再び第1段階の螺旋線探索に戻り、越えていれば再び2次曲線をあてはめて頂点を求めた。第1段階の探索例を図-6に示す。○は近似対応点、△は螺旋線探索点、□は最急勾配探索点である。この例は図-5で示した点と同じ点であり、

図-6 螺線探索と最急勾配探索の例（標定点領域5の点5）
 (○は近似対応点, △は螺線探索点, □は最急勾配探索点, △が2つあるのは, 1度誤った方向に進んでから復帰したことを示す。)

やはり相関係数は100倍して表わした。△が2つあるのは, 一度誤った方向に進んだ後再び螺線探索に復帰したからである。

一般に長さ τ ごとに平均した信号から N 個の標本で相関をとったとき $1/2N\tau \sim 1/2\tau$ の周波数成分を使っている。第1段階では $0.1/\text{mm} \sim 1/\text{mm}$, 第2段階では $0.5/\text{mm} \sim 10/\text{mm}$ となるが, どの程度のパッチが最適かは, 画像の空間周波分布と雑音の状態さらには地形の起伏に依存して一概には決まらない。ここでの相関パッチは地物の配置から適当と考えて決定したが, 画像の空間周波数を計測しながら決めるようにするのが望ましい。この問題は地上格子点の標高を求めていく場合と全く同じであり, その報告と同時に論じる。

54点の対応点を計算機で探索する一方, グレイマップ上で目測で対応点を指摘したところ, 探索した点全部が目測での対応点の周辺に収束した。表-4にはこの両者から独立モデル法で求めた標定要素とともに, 参考のためステレオコンパレータで求めた標定要素を示した。なお, コンパレータでの測定点はこの実験で用いた標定点とは異なる。表-4によれば, 残存 y -視差の2乗平均値はコンパレータによる場合よりも1桁大きい, これは画像分解時の歪のためであろう。また目測と比べて, 計算機探索の方が約1画素減少しているのは, 2次曲線のあてはめ効果が大いことを示している。表-5には, 標定点の一部について, 目測と計算機探索各々によるときの画像座標や相関係数, 残存 y -視差などを一覧に示した。これらの y -視差に

表-4 各種の探索法によって得られた相互標定要素の比較

	計算機による探索 (54点)	目測による計測 (54点)	コンパレータを使った計測 (49点)
$\varphi_1(\text{rad})$	-0.019005 ± 0.00013	-0.018622 ± 0.00041	-0.020007 ± 0.000047
$\kappa_1(\text{rad})$	-0.013666 ± 0.00030	-0.012961 ± 0.00098	-0.012601 ± 0.000087
$\varphi_2(\text{rad})$	-0.005931 ± 0.00013	-0.006080 ± 0.00041	-0.007417 ± 0.000048
$\omega_2(\text{rad})$	-0.009202 ± 0.00014	-0.009574 ± 0.00046	-0.009581 ± 0.000044
$\kappa_2(\text{rad})$	-0.005597 ± 0.00031	-0.004768 ± 0.00101	-0.004799 ± 0.000095
y -視差の 2乗平均値	0.026mm (0.52画素)	0.071mm (1.4画素)	0.0053mm (0.16画素)

表-5 標定点の探索精度
(地形欄のFは平地, Mは山地を示す)

領域番号	点番号	地形	左画像座標		計 算 機 探 索 の 対 応 点				目 測 に よ る 対 応 点		
			行	列	行	列	y-視差 (mm)	相関係数	行	列	y-視差
1	1	F	2409	2505	720.818	2396.350	0.006	0.83	721	2399	-0.126
	2	F	2671	2372	980.227	2270.000	-0.027	0.68	981	2271	-0.069
	3	F	2773	2413	1080.288	2312.389	0.001	0.70	1081	2310	0.141
	4	F	2356	2606	664.579	2496.214	-0.019	0.90	665	2496	0.004
	5	F	2389	2664	695.857	2554.278	-0.005	0.88	696	2554	0.021
	6	F	2730	2635	1033.100	2532.179	-0.004	0.90	1033	2532	0.016
	7	F	2361	2772	664.700	2660.000	0.053	0.83	666	2659	0.118
	8	F	2546	2706	849.800	2597.875	0.061	0.83	700	2677	-0.014
	9	F	2396	2787	698.921	2676.400	0.009	0.68	852	2599	0.012
2	1	M	3954	2755	2174.875	2673.300	0.031	0.90	2179	2674	0.006
	2	M	3857	2695	2076.375	2612.929	-0.011	0.70	2076	2613	-0.006
	3	M	3805	2705	2032.900	2621.318	0.020	0.88	2032	2622	-0.008
	4	M	3789	2492	2025.577	2410.833	0.002	0.80	2026	2411	0.001
	5	M	4163	2753	2411.167	2676.750	-0.021	0.94	2411	2676	0.026
	6	M	4150	2690	2397.833	2614.000	-0.003	0.96	2398	2615	-0.049
	7	M	3912	2430	2135.750	2351.969	-0.004	0.80	2136	2352	0.002
	8	M	4063	2777	2310.682	2698.052	0.002	0.83	2310	2699	-0.041
	9	M	4168	2708	2419.979	2633.071	-0.051	0.90	2419	2633	-0.041
4	1	F	3889	4007	2118.929	3904.750	-0.012	0.96	2119	3905	-0.023
	2	F	3970	3995	2197.816	3893.955	-0.004	0.86	2198	3895	-0.056
	3	F	3917	4094	2142.250	3990.300	-0.011	0.84	2142	3989	0.060
	4	F	3819	4181	2043.000	4073.750	0.011	0.90	2043	4074	-0.003
	5	M	3798	4242	2017.976	4132.421	0.049	0.92	2018	4133	0.016
	6	F	3847	4027	2071.000	3923.441	0.000	0.85	2071	3923	0.026
	7	F	4014	4015	2238.750	3914.000	0.003	0.78	2239	3914	0.007
	8	M	3895	4102	2120.417	3998.042	-0.022	0.90	2121	3997	0.036
	9	F	3806	4138	2031.233	4031.389	0.015	0.83	2030	4032	-0.019
5	1	F	2330	770	679.846	658.180	0.014	0.68	680	658	0.028
	2	F	2363	787	713.269	676.340	0.007	0.89	714	680	-0.186
	3	F	2471	821	819.816	713.929	-0.014	0.82	820	708	0.308
	4	F	2318	923	665.833	812.167	-0.009	0.93	666	813	-0.048
	5	F	2446	916	792.971	808.500	-0.002	0.92	792	810	-0.080
	6	F	2491	962	836.136	855.833	0.003	0.96	836	858	-0.110
	7	F	2398	1172	738.917	1064.184	0.001	0.94	739	1064	0.019
	8	F	2442	1166	783.500	1060.100	-0.041	0.89	784	1059	0.026
	9	F	2599	1138	939.750	1035.500	-0.006	0.95	939	1035	0.025

は、山地、平地の差は見られず、またその相関係数は0.68～0.98の値を示したが、これにも山地平地の差、あるいはy-視差との関係も見られなかった。

(5) 任意に与えた標定点の対応点が探索できるかを調べる。

ここまで述べた方法では左画像にコントラストの良い標定点を与えてその対応点を探索した。しかしこれでは人間の目が介入するので、次に恣意的に与えた標定点を探索することができるか調べてみた。本節(3)で採用したのと同じ小領域すなわちそれぞれの左画像の

相互標定点領域の中心の画素を標定点にして、上記と全く同じ手続きで対応点を探索した。表-3の右半分には6点の標定点の探索結果とそのときの相関係数を示す。平地部では不十分な精度ながら正しい対応点の近傍に収束したが、山地部ではいずれの探索も誤った対応点に導かれた。山地部の点はテクスチャが極めて貧弱の上、地形起伏のため画面に変位が入ることで画像の相関が弱まること、また樹木は左右写真で樹冠の別の部分が写るため、濃度信号の上では雑音に似た性質の信号を含むことになって、更に画像の相関が弱まる

ことによると考えられる。これらに対するいくつかの改善を試みているが、2次元探索ではまだ成果を得ていない。これに対して地上座標系の格子点標高を求める段階では、探索ウィンドウを非常に限定できることもあって、不十分ながらも正しい探索が可能であった。

6. 結 論

この論文では、等高線の自動描画のための一連の処理のうち、空中写真の画像分解から自動相互標定までを実験に則して説明した。実体空中写真を画像分解し、画像座標系を較正してから自動的に相互標定点を探索する実験を行った結果、標定の自動化は充分実用性があることを示した。左画像にコントラストの高い特徴的な点を与えてこの対応点を探索する方法はうまく機能し、グレイマップ上で目測で指摘するとき以上の精度を出したが、一方標定点を任意に与えた場合、山地での探索は全く不可能であって、自動的といっても一部に人間の目の介入を必要としたことを注意しておく。

この実験では探索の誤りが起こらなかったが、一般に基準点座標に過誤が入ったとき、最小2乗法を適用するとその誤りが全体に配分されてしまう例はしばしば見られるので、実際には過誤を発見するアルゴリズムを付与しなければならない。むしろこのような自動対応点探索はオンライン処理時の補助手段として用いるか、あるいは種々の条件(撮影時期、位置、センサ)が異なるリモートセンシングデータの位置あわせに有効に応用されるであろう。

この研究は文部省科学研究補助金を使用したものである。データの作成に際しては、画像分解には京都大学食糧科学研究所の走査型微少濃度計 Scandig 3 を使用させて頂き、その際には森田雄平教授、相原茂夫助手に多大の御助力を賜わった。また写真座標の計測はすべてメトロ航業KKの協力を得た。以上各方面の御協力に対して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Thompson, M. Morris and E. M. Mikhail: Automation in Photogrammetry — Recent Developments and Applications 1972~1976, XIII International Congress for Photogrammetry, Helsinki, 1976
- 2) Case, James B.: Automation in Photogrammetry, XIV International Congress for Photogrammetry, Hamburg, 1980
- 3) 森忠次, 服部進, 内田修, 田辺広志: 画像相関を使った空中写真からの標高測定について, 昭和56年度土木学会中国四国支部年次学術講演概要
- 4) 森忠次, 服部進, 今井啓介, 小川一郎: 立体空中写真の自動標定について, 日本写真測量学会昭和56年度春期学術講演会発表論文集
- 5) Kelly, R. E. and P. R. H. McConnell: The Gestalt Photomapping System, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1977, pp. 1407-1417
- 6) Hobrough, G. L. and T. B. Hobrough: Image Correlator Speed Limits, Bildmessung und Luftbildwesen, vol 1, 1971, pp. 20-24.
- 7) Helava, U. V.: US-1 Universal Stereoplotter, XIII International Congress for Photogrammetry, Helsinki, 1976
- 8) Szangolies, H. K., W. Kunze, W. Tiedeken, H. Martin and W. Marckwardt: Topomat, XIII International Congress for Photogrammetry, Helsinki 1976
- 9) Keating, Terrence, J., Paul R. Wolf and Frank L. Scarpace: An Improved Method of Digital Image Correlation, Photogrammetric Engineering & Remote sensing, 1975, pp. 993-1002
- 10) Masry, S. E.: Digital Correlation Principles, Photogrammetric Engineering, 1974, pp. 303-308
- 11) Panton, Dale, J.: A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1978, pp. 1499-1512
- 12) Kreiling, W.: Off-line Correlation in General Purpose Computers, Symposium über den Einsatz digitaler Komponenten in der Photogrammetrie, Hannover, 1978
- 13) Konecny, G.: Digitale Prozessoren für Entzerrung und Bild Korrelation, Symposium über den Einsatz digitaler Komponenten in der Photogrammetrie, Hannover, 1978
- 14) Unruh, J. E. and E. M. Mikhail: Mensuration Tests Using Digital Images, XIV International Congress for Photogrammetry, Hamburg, 1980
- 15) Pratt, William K.: Digital Image Processing, Wiley, 1978, pp. 562-566
- 16) 森忠次, 服部進, 伊藤杉太郎: デジタル画像の対応点探索実験, 日本写真測量学会昭和55年度春期学術講演会発表論文集