分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化

Stereo Plotting from Aerial Photographs with Patch by Patch Correlation

森 忠次*・服部 進*・内田 修**

Chuji Mori, Susumu Hattori, Osamu Uchida

Abstract: This paper proposes a patch by patch correlation method for automatic stereo plotting from aerial photographs for the control of matching wanderings, where matching is made on all over a fairly large patch area rather than at every each point. Its effectiveness is evidenced in the experiments.

The structure of the algorithm is as follows;

- 1) A stereo image pair is subdivided to overlapping patch pairs, each consisting of about 250 by 250 pixels and 250 by 400 pixels for the left and right patches respectively. Matching process is done independently for each patch pair.
- 2) The grid points are allocated on the left patch and their conjugates are searched. At the start matchings are done coarsely using low frequency components of the images, converged step by step to fine details using high frequency components. In accordance with this coarse-to-fine process the grid points are disposed sparsely at the first step and their density is increased step by step.
- 3) It is essential in this method to pose the positional constraint on the matched points to keep the geometrical consistency.
- 4) Phase distortions of the images due to terrain reliefs are eliminated by iterative correlation.

要 旨：この論文は空中写真対のステレオマッチングで、マッチングの迷走を防ぐ手段としてパッチ単位ごとのマッチングを提案し、それが有効であることを実験で示した。アルゴリズムの主たる構造は次のようである。

- (1) 図化領域の左画像を約 250×250 画素、右画像を約 250×400 画素の重複するパッチにわけ、マッチングは各パッチで独立に実行する。
- (2) 左パッチに格子点を取り、その右画像上の対応点を探索するが、最初低周波域の粗いマッチングから始め、高周波域の細かいマッチングに収束させる3段階の過程をとる。格子点密度も最初は疎にし、しだいに密に配置する。
- (3) 対応点は位置の整合性を満たすよう制約条件を付け、探索幅を狭めると同時に迷走を防ぐ。
- (4) 相関を低下させる位相歪はくり返し相関によって除いていく。

1. 結 言

計算機の処理能力が高くなった近年では、ステレオマッチングを計算機でシミュレーションし、実体写真測量の自動化を実用しようとするようになってきた。実体視の機構自体の研究は、心理物理学や生理学の分野でなされていて近年その成果を数学的にモデル化す

ることが、人工知能の開発の1つの重要なテーマとして進められている。^{1), 2), 3), 4)}一方、写真測量学の分野では、より実用的な考えから、実体視のシミュレーションというよりも、面積相関による類似性の探索に基づいた2つの画像のマッチングが研究されてきた。^{5), 6), 7), 8)}面積相関では1つの画像上の点の対応点を見出すのに、この点のまわりに相関窓をとって前者を後者の中で動かし、最大相関点を見出そうとするものである。これまでに開発されたいわゆる自動図化機は、例外なく面積相関法によっている。この方法では相関窓の大きさが精度を決定するため、提案されたシステム

* 岡山大学

** アジア航測㈱

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 24, No 1, 1985

では、次の2つの点がうまく機能していない。1つは視準方向の違いによるいわゆる隠蔽 (occlusion) の部分で正しいマッチングができないこと。他の1つは、水面、草地などのテクスチャの乏しい場所でマッチングが迷走してしまうことである。この論文は主として後者に対する改良法を提示したものである。これまでの大多数の方法では、左画像上においた画像点の対応点をマッチングするのに各画像点の相対的位置を考慮に入れないでいわば各点ごとに行っていた。著者はこの点を改良することによりマッチングの迷走を防ぐことができると考えた。^{9), 10)} 著者は左右画像をいくつかの処理単位 (パッチと呼ぶ) の対に分け、左画像のパッチ上に設置した正方格子の格子点の対応点を位置の整合性を考慮しながらマッチングさせる方法をとったところ良好な結果を得ることができた。この報文はアルゴリズムの概要を紹介し、これによるいくつかの実験結果を示した。

2. パッチごとの相関法の構造

相関窓の大きさ以上の解像力で対応点を決定することはできないから、相関窓はできるだけ小さくするのが精度上好ましい。ところが小さな相関窓では窓内のテクスチャが不足して探索の迷走が起り易くなる。

迷走を起こさないマッチングと精度良いマッチングという要求は、相関窓の大きさ決定に対する相反する要求であり、1回の相関手続きで満足な結果を得ることはむづかしい。これを解決するのに、著者は最初低周波域で粗いマッチングを行い、しだいに高周波域の細かいマッチングに移る段階的過程が有効であることを示した。¹¹⁾ この過程において、地形起伏による投影の歪は相関を低下させるとしても、この影響が比較的少ない低周波域を迷走を防ぐとともに探索幅を狭めるのに使い、その後高周波域で細部のマッチングを行う。

一般にある段階の画像の画素幅を S とし、 $\ell \times \ell$ 画素の相関窓を考える。相関窓の幅は、 $L = S\ell$ である。面積相関ではおおむね $\frac{1}{2}S \sim \frac{1}{2}L$ の周波数帯を利用することになる。もとのデジタル画像の画素幅を s で表わすと、著者は、最初 $S = 4s$ の画素幅の画像で相関をとり、次に $2s$ 、 s と半分ずつ3段階に画素幅を小さくする過程をとった。相関窓の幅の画素数 ℓ は一定とする。これは、相関に用いる帯域を1オ

クターずつ高めていくことを意味する。このとき ℓ の大小为やはりマッチングの精度と安定性を左右するので、できるだけ小さな ℓ で定めたマッチングができるように緒言で述べたパッチごとのマッチングを考案して良好な結果を得た。

面積相関では、地形起伏による投影の歪が相関を弱める。このため大きな相関窓から小さな相関窓へ移る3段階の各段階で、1度マッチングした結果得られた対応点の位置を参照して、投影歪を消去するように右画像を再サンプリングする。次の相関は、この再サンプリング画像を使い、しだいに相関を高める手法をとった。この過程は対応点が収束するまで続ける。これをここではくり返し相関と呼ぶことにする。くり返し相関の有効性もすでに文献00で示した。

以上の方法は、現在のところ、最も秀れた自動図化機である Gestalt Photomapper¹²⁾ も採用されている手続きに比較的近いものになっていると思われるが、同製品のマッチングアルゴリズムが詳しく発表されていないため比較ができない。

隠蔽部分の処理については、ここでは取り扱っていない。そのため、ここで述べる手続きは、建築物や樹木などの比高の急変部分があり問題にならない宿尺 1 : 20,000 以下の中小縮尺画像を対象にしている。

3. アルゴリズムの解説

マッチングのアルゴリズムは、準備の段階である前処理の部分、相関計算の部分、および迷走の防止の部分の3つに分けられる。

3-1 マッチングのための前処理

(1) 画像の偏位修正——相互および対地標定を終えた写真対に対し、図-1のように撮影基線に平行なモデル平面 xy および uv 上に再投影し、画像の y -視差を消去し、1次元マッチングを可能にしておく。

(2) パッチへの分割——マッチング処理は一定の大きさのパッチごとに独立に行う。図化領域の原画像対を複数のパッチに分割し、左パッチは 255×255 画素、右パッチは 255×400 画素の大きさにとる。隣接するパッチどおしは160画素ずつずらして配置する。右パッチは、左パッチよりも u 方向に大きくとって探索幅の余裕をもたせた。これを図-2に示すが、図は便宜上少しずつパッチをずらして描いた。パッチの大きさや、重複の大きさは(4)で示す格子点配置から決ま

図-1 偏位修正

図-2 重複する左画像上のパッチ
(数字の単位は画素)

る。

(3) パッチのフィルタリング——低周波から高周波に移る各段階の処理でパッチをあらかじめ低域通過フィルタに通しておくのが便利である。左または右のパッチの画像を総称的に I_0 で表す。パッチ I_0 に低域通過フィルタを通した画像を I_1, I_2 で表わし、それに含まれる最高周波数を f_{c1}, f_{c2} とする。 I_0 の最高周波数は $f_{c0} = 1/2$ (1/画素) であるから、 I_1, I_2 のカット周波数の位置を1オクターブずつ下げて、 $f_{c1} = 1/4$, $f_{c2} = 1/8$ とする。

パッチ I_1, I_2 と I_0 の間に位相のずれが起こらぬよう次のようなフィルタを作る。 I_0 の画像座標系を mn として、これに対する周波数域の座標系を $f_x f_y$ で表わす。カット周波数 $f_{ck} = 1/2^{k+1}$ ($k=1, 2$) の理想低

域通過フィルタを $H_{Lk}(f_x, f_y)$ で表わすと、

$$\left. \begin{aligned} H_{Lk}(f_x, f_y) &= 1 \\ (|f_x| \leq 1/2^{k+1} \text{ かつ } |f_y| \leq 1/2^{k+1}) \\ &= 0 \\ (\text{その他}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

となる。 $H_{Lk}(f_x, f_y)$ をフーリエ変換して、フィルタ

$$h_{Lk}(m, n) = \alpha^2 \frac{\sin \alpha m \pi}{\alpha m \pi} \cdot \frac{\sin \alpha n \pi}{\alpha n \pi} \quad (\alpha = 1/2^k; k=1, 2) \dots\dots (2)$$

を得る。このフィルタは有限長でないので次のHanning窓¹³⁾

$$\left. \begin{aligned} h_{Hk}(m, n) &= (0.5 + 0.5 \cos(\alpha m \pi)) \cdot \\ &(0.5 + 0.5 \cos(\alpha n \pi)) \quad (k=1, 2; m, n = \\ &0, \pm 1, \dots, \pm 2^k) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

を掛けて有限長フィルタ $h_k(m, n)$ にする。すなわち

$$\left. \begin{aligned} h_k(m, n) &= h_{Lk}(m, n) h_{Hk}(m, n) \\ (k=1, 2; m, n=0, \pm 1, \dots, \pm 2^k) \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

このフィルタを表-1に示した。

実際の処理では画像の標本化定理¹⁴⁾から、メモリを節約するため、パッチ I_0, I_1, I_2 は含まれる周波数帯域に応じて画素幅 S の画像をそれぞれ、1, 2, 4画素ごとにサンプリングして縮約したパッチを使った。すなわち I_0, I_1, I_2 の画素幅をそれぞれ $S_0 = s$, $S_1 = 2s$, $S_2 = 4s$ としていることになる。今後縮尺したパッチと言えばその画素幅は上の値である。

(4) 格子点の設定——第3段階のパッチ I_0 の右パッチ上に8画素間隔の格子点をつくり、これらを(左)格子点と呼ぶ。各格子点に対応する右パッチ上の点を(右)対応点と呼び、右対応点の位置を定めるのが眼目である。また縮約したパッチ I_1, I_2 上にも8画素間隔で格

表-1 低域通過フィルタ

$h_1(m, n)$						
0.038	0.119	0.038				
0.119	0.373	0.119				
0.038	0.119	0.038				
$h_2(m, n)$						
0.000	0.001	0.003	0.004	0.003	0.001	0.000
0.001	0.010	0.023	0.030	0.023	0.010	0.001
0.003	0.023	0.056	0.072	0.056	0.023	0.003
0.004	0.030	0.072	0.094	0.072	0.030	0.004
0.003	0.023	0.056	0.072	0.056	0.023	0.003
0.001	0.010	0.023	0.030	0.023	0.010	0.001
0.000	0.001	0.003	0.004	0.003	0.001	0.000

図-3 左パッチ上の格子点配置
(数字の単位は画素)

子点を置きこれらの格子点はパッチ I_0 上で考えたとき図-3のように重なるようにする。図-3では格パッチの格子点を記号を変えて示した。図の数字単位は画素(画素幅は $S = s$)である。格子点数はパッチ I_0 , I_1 , I_2 に対して 24×24 , 12×12 , 6×6 である。マッチング終了後には, I_0 上の格子点の対応点が決定的されるが, 外周の対応点は信頼性が低いと判断して捨て, 内側の 20×20 点を図化に使用する。格子点番号を I_0 上の格子点に付け, P_{ij} で表わす。 m 方向に i , n 方向に j をとり, 左下すみの点を P_{11} とする。

3-2 相関の計算

最初はパッチ対 I_2 をマッチングさせる。その結果得られた格子点の x -視差を次の段階であるパッチ I_1 の格子点に初期値として与える。計測されていない格子点の x -視差は内挿して与えることになる。次にパッチ I_1 をマッチングさせる。この手続きをパッチ対 I_0 まで段階を追って行い, しだいに細部のマッチングに収束させる。相関の手続きは各段階でほぼ共通であるから, 第3段階のパッチ対 I_0 に関して説明する。

(1) x -視差の初期値の設定——第2段階のマッチングの結果確定した格子点 P_{ij} の右画像の x -視差(図-3の・○印) ($i, j = 1, 3, 5, 7, 23$) から第3段階の格子点の x -視差は次の順序で内挿する。

- $i, j = 2, 4, 6, \dots, 22$ の格子点を対角4点の平均値で与える。

- $i = 3, 5, 7, \dots, 23; j = 2, 4, 6, \dots, 22$ の格子点の x -視差および $i = 2, 4, 6, \dots, 22; j = 3, 5, 7, \dots, 23$ の格子点の x -視差を縦横4点の平均値として

与える。

- 格子点 ($i = 2, 4, \dots, 22; j = 1, 23$), ($i = 1, 23; j = 2, 4, \dots, 22$) については近傍の3点の x -視差を平均し, 周辺部は内側の x -視差に等しくおく。

なお第1段階から, 第2段階に移るときの初期値設定もこれに準ずる。

(2) 右画像の再サンプリング——格子点の x -視差を参照して右画像を再サンプリングし, 左右画像間の位相歪を除去する。再サンプリング後の右画像では対応点は正方格子となる。

(3) 左右画像の相関——相関窓と探索窓を設定し相関をとる。相関窓の巾 ℓ 画素は格子間の相互位置関係を保ちやすくするために, 2格子間隔をとり $\ell = 15$ とした。 $\ell = 15$ は約4オクターブの周波数帯を含むことになり, これまでに発表されている面積相関の相関窓としては極めて小さい。実験ではこれと寸法の異った相関窓を使った場合との比較を示す。

適当な探索窓の大きさ, すなわち探索範囲 K は第2段階でどの程度対応点位置が確定されているかに依存する。もし第2段階で迷走が起っていないとしても第2段階では $f_{c1} = 1/4$ 以上の高周波を含んでいないので, ± 1 画素の不確実性がある。しかしもっと一般に安全側に考え第2段階の相関窓に含まれる成分の最大波長 $\lambda = 2\ell$ の25%程度の位相歪は残っているとみなすと $K = 2 \times 15 \times 0.25 \div 7$ 画素程度の探索幅を設定すべきである。ここでは第1段階の最初を除いて, 各段階とも縮約したパッチ上で $K = 7$ 画素とした。

(4) 相関の計算——画像間の類似度の尺度としては, ①相関係数, ②濃度差の2乗和, ③偏差積和などが通常使われる。探索窓が大きときには, 探索窓内の濃度変動が大きいため, 局所的に正規化する相関係数が精度良い尺度になるが, ここでは探索窓を小さくしぼることができるため, どれをとっても大差はない。著者は偏差積和から計算した相関係数の近似値を使った。

計算法は x 軸方向1次元的に示せば充分である。 x 軸方向の濃度値列を左右それぞれ a_j, b_j ($j = 0, 1, 2, \dots$) で表わし, a_0, b_0 が当該格子点の相関窓および探索窓の先頭に来るよう座標原点をとる。このとき偏差積和 S_k と相関係数 ρ_k (k は位置遅れ) は次式で定義する。

$$S_k = \sum_{j=0}^{\ell-1} \Delta a_j \Delta b_{j+k}; \quad \rho_k = S_k / \left(\sum_{j=0}^{\ell-1} \Delta a_{j,2} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta a_j &= a_j - \frac{1}{\ell} \sum_{j'=0}^{\ell-1} a_{j'}; \quad \Delta b_j = b_j - \frac{1}{\ell+K-1} \\ &\sum_{j'=0}^{\ell+K-2} b_{j'} \end{aligned} \right\} (5)$$

(5) くり返し相関——相関を低下させる位相の歪を除く、相関を向上させるために、(2)で述べたのと同様に相関と再サンプリングの手続きを x -視差の値が収束するまでくり返す。計測した格子点の x -視差には微小な震動が含まれていて、このまま再サンプリングするとかえって相関の低下を招くことが多く、マッチングはしばしば迷走した。これを防ぐために再サンプリングの前の各格子点 P_{ij} の x -視差を、自らを含む、縦横5点の x -視差の平均値に置きかえるフィルタ操作が有効であった。

3-3 迷走の防止

マッチングの迷走を防ぐために、著者は以下の4つの方法を試みた。今のところ十分な効果を得ているのは(1)のみである。

(1) 対応点の整合性——対応点同志は位置的に矛盾のない整合性を満足しなければならないが相関窓が小さくなるにしたがって、対応点の整合性がくずれ易くなる。実験によれば一旦整合性がくずれると、くり返し相関の過程でマッチングが発散することが多かった。迷走防止のために次の2つの整合性を検査して、条件に触れた格子点の x -視差は周囲の格子点の x -視差の平均値とおきかえた。

- ・右対応点は、左格子点と x 軸方向に同じ順序で並んでいなければならない。

- ・格子点間の地形勾配が予想される最大勾配以下¹⁵⁾であること。この論文では45°以下とした。したがって探索幅もこれを満たすように設置すれば最大が格子間隔、すなわち縮約された画像で±8画素内ということが導かれる¹¹⁾。

(2) エッジの検出——各格子点に設定した相関窓に必要なテクスチャが含まれているかどうかを判断するには、通常窓内濃度値の分散を用いているが、分散の大小とマッチングの可能性とは直接結びつかない。ここでは、各段階のパッチの格子点近傍にエッジが存在するか否かでこれを判断した。エッジが存在しなければ格子点近傍は均質な画像であり地形も等勾配であると判断し、周囲の格子点の x -視差を内挿する。近傍の大きさは、各段階の格子間隔にほぼ等しくとり縮約し

た画像上±3画素とした。マッチングには、 y 軸方向のエッジだけが寄与するであろうから x 方向の2階微分の零交差点が存在するかでエッジを検出した。すなわち、縮約した左パッチの画像座標 (m, n) の濃度値を、 $D(m, n)$ としたとき、

$$G(m, n) = D(m+1, n) - 2D(m, n) + D(m-1, n) \dots \dots \dots (6)$$

が

$$\left. \begin{aligned} G(m+1, n) G(m, n) < 0, \quad |G(m, n)| \geq 1.0 \\ \text{あるいは} \\ G(m+1, n) G(m, n) < 0, \quad |G(m, n)| < 1.0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

であれば (m, n) でエッジが存在するとした。4-1で示すように濃度値はもともと整数値で与えられているから $|G(m, n)| < 1.0$ は0とみなしている。

実際には、実験に用いた画像ではどの段階においても全ての格子点近傍でエッジが存在したので、この判断基準は使わないのと同じであった。しかしこの問題については、帯域フィルタないし微分フィルタに関する本質的な考察が必要となるので以上にとどめる。

(3) エッジの強調——画像質の改善のためエッジの強調はよく行われる。また人間の目によるマッチングでもエッジの対応を利用していることが主張されている。そこでエッジを強調した画像がどの程度マッチングに有効であるかを調べた。エッジ強調画像を式(6)の $G(m, n)$ を使って、各段階の縮約したパッチに対し次式で定義する。

$$G'(m, n) = D(m, n) - \lambda G(m, n) \dots \dots \dots (8)$$

λ は適当な定数であり強調の程度によって変える。

(4) 相関係数による迷走の発見とフィードバック——通常マッチング精度を検査するのに使われる相関係数が迷走の判断に使えれば次の様なフィードバック系が考えられる。迷走の起こりにくい第1段階はそのまま実行し、第2、第3段階ではくり返し相関の途中で最大相関点 ρ_{max} がある閾値 ρ_T より小さくなれば x -視差の値をその段階の初期値にもどす。

4. 実験と考察

4-1 資料

ここで使う資料¹¹⁾は、1:25,000の写真対を50 μm 間隔にサンプリングして、0-3 D の濃度値を8ビットで表わした。50 μm の x -視差は比高2.1 m に相当する。対地標足の結果では基準点残差の平均2乗誤差は平面位置±1.68 m (14点)、標高±0.8 m (13点)

であった。

偏位修正後の画像対には ± 1 画素程度の y -視差が残存していた。これはサンプリング時のフィルム歪に起因する。 x 、 y 方向それぞれ1画素の歪があるとすると、これによって起きうる標高誤差は、よく知られた x -視差と比高の関係式から、

$$\Delta H = \frac{H}{b} \Delta(u-x) \leq \frac{H}{b} (|\Delta u| + |\Delta x|) \dots\dots(9)$$

$$= 4.6 \text{ m}$$

と評価される。ここで、 b ；写真上の撮影基線長(87 mm)、 H ；撮影対地高度(3,800 m)、 x 、 u ；左右の写真座標の横軸、 Δu 、 Δx ；写真座標の誤差。

マッチング結果の精度を評価するため、新たに写真から等高線を図化した。図化では、通常のように地上標高を追ったものと樹高を描いたものを2種類作成した。これは実験に使った写真の樹木の密集地では、その1本1本は分離されず、マッチングは樹木の頂点部でなされると考えられるためである。等高線間隔は上記の標高誤差を考慮して10 mで描いた。図-4、5、6に、左写真の図化領域と、等高線図を示した。図-5は樹高の等高線であり、20, 40, 60, ... (m)を実線、中間を破線で描いた。図-6は地上高の等高線であり、20, 40, 60, ... (m)を太線、10, 30, 50, ... (m)を細線で描いた。さらに樹木のための地上が見えない部分を破線で書き込んだ。図は1：10,000で描いたものを約 $\frac{2}{3}$ に縮めている。図化領域は約800×1,200 mであって、山地部は隠蔽部分はほとんどなく、均質で白色雑音に近い濃度分布を示すところが多く迷走が起り易い。

マッチング結果を検照するために1つのパッチを選

図-4 図化領域の左写真
(約1,000m×1,200m, わくはパッチAを示す)

図-5 樹上等高線
(パッチAをわくで囲った)

びその位置を図-4、5に示し、これをパッチAと呼ぶ。図-5のパッチAは、投影の関係で正方形にならない。パッチAは比較的テクスチャの乏しい山林部と、豊富な伐採地の部分が混在する。樹木は密集していて、目視でやっと地表が観測できる程度である。

この論文では、各対応点のマッチング精度を画素単位で検照することはせず等高線同士を比較するにとどめた。これは次の理由による。

- 実験にイメージディスプレイが使えず、画像の出力はすべてラインプリンタで行った。このため解像度が低く、対応画素を厳密に決定することができなかった。
- 面積相関は点の対応でなく、本質的に面の対応であって、高い精度が望めない。
- 画像の残存 y -視差が大きく、精度を落としている。

4-2 基本的なマッチングの実験

(1) 準備——図化領域は4×6個のパッチが覆う。1つのパッチで図化に用いる格子点は20×20点であるので図化領域には80×120点の格子点が含まれる。

図-6 地上等高線

図-7 $\ell = 15$ の相関窓による描画

1つのパッチの図化に使う領域は地上約200m×200mであり、その中に生ずる最大比高 ΔH は約100mであるので、パッチ内の最大 x -視差 Δpx は

$$\Delta px = \frac{b}{H} \Delta H = 2.3 \text{ mm} = 46 \text{ 画素 (10 上)}$$

である。したがって第1段階の最初には、縮約した画像で ± 7 画素($K=15$)、すなわち縮約しない画像上では、53画素とった。

(2) マッチング結果——パッチごとの相関法が有効であるかを見るため、相関窓の幅を $\ell=15$ 、探索幅を $K=7$ として実行した。最初格子点の整合性を考慮しなかったところ、対応点の位置の逆転が起こり処理は中断した。これを考慮して実行した結果が図-7である。格子点は1:10,000図上約1mm間隔で配置される。等高線は格子点のつくる四角形内を線型内挿して描画した。各段階のくり返し相関の回数は5回としたが実際には3回程度で収束し、4回目と5回目の x -視差の最大変動量は各パッチとも2画素以内であった。

図-5、6の等高線図と比較してみると、おおむね、樹高に近いところを追っていて、比較的良好な結果が

得られている。図の右下方の急勾配部分(図-5の黒い矢印)では両者の中間部を描いている。この部分はこのぎりの歯のように伐採あとがあるが、このマッチング法ではするどい等高線の変化に追従できず平均的な高さとなっている。小さな迷走が左下隅および平地部(図-5の白い矢印)に見られるが、平地部分の迷走は標高値としては、2m以内(1画素内の x -視差)の小さなものである。

マッチングの精度を判断するには通常は相関係数が使われ、最大相関係数 ρ_{max} がある閾値 ρ_T より小さいとき信頼性がないと判断することが多い。図-7の実験結果から相関係数の分布を調べてみると、パッチAでは各段階の5回目のくり返しの時点で図-8のようであった。第3段階の図では全格子点のうち内側の20×20点についての結果である。 ρ_{max} が1.0を越えるものが少数あったがこれは計算式(式(5))が近似式であることによる。

一般には各段階を追うごとにしだいに雑音が卓越し、相関係数は小さくなるがこの例では第3段階でも比較的大きな相関係数を示している。小さい相関係数は散

図-8 最大相関係数の頻度分布

図-9 探索幅 $K=15$ の場合

乱して現われるが図-5, 6, 7の等高線図と相関係数の値を比較しても、位置精度との関係は認められなかった。ただ大きな迷走を生じた場合には0に近い異常に小さい値がまとまって現われるのが認められた。

4-3 パラメータの比較

(1) 探索幅 — 迷走が起こっても回復するために広い探索幅をもたせることが考えられる。図-9は図-7と同じ条件で探索幅を全過程通じて $K=15$ とした場合

図-10 相関窓 $l=7$ の場合

である。しかし一部にむしろ新しい迷走が起っている以外に変化はなかった。

(2) 相関窓の幅 — 図-7では2つの格子間隔を含むように $l=15$ とした。これ以下では、隣接する相関窓との共通部分がなくなるので、不安定なマッチングになることが予想される。図-10は $l=7$ としたときのマッチング結果であるが、多くの点で迷走が起っているのがわかる。しかし3オクターブしか含まない相関窓でも全くのでたらめの結果を与えておらず、多数の格子点間の整合性を考慮したマッチングが有効であることを示している。

逆に相関窓の幅を上げ、 x 方向 $l_x=31$ とし、 y 方向は位相がそろっているので小さく $l_y=7$ としたとき(すなわち図-7の場合と面積はほぼ同じ)のマッチング結果を図-11に示した。相関窓を x 軸方向に2倍の拡大をしたにも拘らず解像力の低下はわずかしき見られないのが注目される。いいかえると、探索窓を小さくしてもここで述べた面積相関法ではそれに応じた解像力を得ることは期待できないと言え、安定性の点でやや大きい相関窓の方がむしろ望ましいと考えられる。

図-11 相関窓 $\ell_x = 31$, $\ell_y = 7$ の場合

図-12 相関係数によるフィードバックを行った場合
($\rho_{max} < 0.1$)

4-4 エッジ強調の効果

画像のエッジを強調することでマッチングが改善されるかを見るため式(8)で $\lambda = 1$ として（他の条件は図-7の場合と同じ）試みたところ、図-7とほとんど同じ画像が得られた。ただ広い探索範囲 ($K = 15$) を与えても図-9のような迷走は現われず、適当なエッジ強調は安定性の面で有効のようである。 λ を極端に大きく ($\lambda = 10$) したところ、図-10 とほぼ同じ結果を得た。これは高周波部分しか利用しないことになって小さな相関窓をとるのと同じ効果になったためである。

4-5 相関係数による迷走判断の試み

結論的に言えばこの方法は全く有効でなかった。図-12に $\rho_T = 0.1$ とし、他は図-7と同じ条件で実行したときの結果を示した。多くの箇所では劣化が起きている。相関窓の大きさ、探索範囲、 ρ_T を変えて実験したところも同様であり改善は見られなかった。これはパッチ単位ごとのくり返し相関法が個々の点でマッチングを行うというよりは、パッチ全体でマッチングしているからであって、個々の x - y 視差の値を周囲と独

立に変更するには、相関係数よりもっと確度のある信頼性基準を使う必要がある。

5. 結 論

この論文では多数の格子点を配置したパッチ単位でマッチングを実行する方法が小さな相関窓でも迷走を防ぎ、比較的精度良いマッチング結果を与えることを示した。マッチングは低周波域の粗いマッチングから高周波域の細かなマッチングまで帯域を1オクターブずつずらして3段階で行う。この間、画像の位相歪はくり返し相関の過程で消去する。迷走の防止には対応点間の位置の整合性を配慮するのが効果的であり、画像のエッジを多少強調するのが安定性の面で効果が見られた。

しかしこの方法は大幅縮尺のデジタル画像を対象とするときには充分でない。それは隠蔽部の解決策を全く含んでいないことである。このためには画像のエッジ間の対応づけを考える必要がある¹⁶⁾。また迷走を発見し、再度マッチングを行うフィードバック系を入れる

ことにも成功していない。ここでは相関係数による迷走の発見を試みたがうまく機能しなかった。

参 考 文 献

- 1) Marr, D. and T. Poggio; A Computational Theory of Human Stereo Vision, Proceedings of the Royal Society of London, Biological Science 204, pp. 301–328 (1979)
- 2) Marr, D. and E. Hildreth; Theory of edge detection, Proceedings of the Royal Society of London, Biological Science 207, pp. 187–217 (1980)
- 3) Marr, D. and T. Poggio; A Theory of Human Stereo Vision, A. I. Memo No. 451, MIT Artificial Intelligence Lab., 1977
- 4) Grimson, W. E. L.; A Computer Implementation of a Theory of Human Stereo Vision, A. I. Memo No. 565, MIT AIL, 1980
- 5) 森 忠次, 服部 進, 今井啓介, 小川一郎; 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, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 20, No. 4, 1981, pp. 4–13
- 6) 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等高線自動図化の一方法—偏位修正と標高ファイルの作成, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 21, No. 2, pp. 4–14
- 7) Konecny, G. and L. Page; Correlation Techniques and Devices, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 3, 1981, pp. 323–333
- 8) Panton, D. J.; A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 3, 1981, pp. 323–333
- 9) Mori C., S. Hattori and S. Hamate; Off-Line Stereo Plotting by Means of Image Correlation, Memoirs of the School of Engineering, Okayama University, Vol. 17, No. 1, 1983, pp. 41–60
- 10) 森 忠次, 服部 進; くり返し相関によるステレオマッチング, 日本写真測量学会昭和59年度年次学術講演会発表論文集, pp. 43–48
- 11) 森 忠次, 服部 進, 内田 修; 面積相関法による空中写真のステレオマッチングの改善, 土木学会論文報告集, 投稿中。
- 12) Kelly, R. E. and P. R. H. McConnell; The Gestalt Photomapping System, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1977, pp. 1407–1417
- 13) Oppenheim, A. V. and R. W. Schaffer; Digital Processing, Prentice-Hall, pp. 237–249
- 14) Papoulis, A.; The Fourier Integral and Its Application, Electronic Science Series, McGraw-Hill, 1962, pp. 50–52
- 15) 森 忠次, 服部 進, 内田 修; 投影歪による画像相関の低下に関するスペクトルの考察, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 22, No. 4, 1983, pp. 33–39
- 16) 大田友一, 金出武雄; 走査線間の整合性を考慮した動的計画法による対応点探索, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料 29, 1984