

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

IMPROVEMENT OF STEREO MATCHING OF AERIAL PHOTOGRAPHS
USING COARSE-TO-FINE AREA CORRELATION

森 忠次*・服部 進**・内田 修***

By Chuji MORI, Susumu HATTORI and Osamu UCHIDA

This paper treats an improvement of stereo plotting from small or middle scale aerial photographs. The method proposed is based on Pantan's one, in which a typical area matching scheme is used for practical utility. But the authors' experiment shows Pantan's method does not function well because of the following contradictory neck ; A small window is required for precise matching and simultaneously a large window is required for stable matching to prevent wandering of search. To solve this problem this paper proposes a multi-stage matching procedure from coarse matching using large correlation windows to fine matching using small windows. Perspective distortions due to terrain relief, which deteriorate correlation, are eliminated by changing the form of search windows in accordance with measured x -parallaxes.

1. 緒 言

実体視のシミュレーション、すなわち計算機によるステレオマッチングは写真測量の研究における大きな目標の1つである。ステレオマッチングの自動化によって、等高線の描画、数値地形モデルの製作、微分偏位修正による写真地図の製作などが高速に実行できる。

人間の実体視能力を忠実にシミュレーションした方法はまだ研究の途上にあり、最近は人工知能の分野で注目すべき進展がみられている¹⁾。しかし、空中写真を扱う分野では、実用性の観点から、もっぱら面積相関によるマッチング法が研究されてきた^{2),3)}。この方法は、2枚のステレオ画像上において、左画像の点に対して、右画像上にこの対応点を見出そうとすると、面積相関法では左画像の点を中心とした有限の大きさの相関窓をとり、これを右画像上に定めた探索窓の中で動かして最大相関点を捜してこれを対応点とするものである。

面積相関によるマッチングでは、比高の急変によって片方の画像に写っている地物が他方に写らない、いわゆ

る隠蔽 (occlusion) の部分で正しいマッチングができない。したがって面積相関は建築物、樹木等による隠蔽部の寸法が問題とならない中小縮尺の空中写真に適用が限定される。しかし大縮尺画像でも細部のマッチングに至る前処理の段階では有効に使えるであろう。

いわゆる自動化機として、Hobrough が Stereomat⁴⁾を開発して以来約 20 年間にいくつかの機種が試作されていて、一部は実用に供されている。たとえば主要なものとして、Gestalt Photo Mapping System⁵⁾(カナダ)、Topomat-Oromat System⁶⁾(東独) などがある。またこのようなハードウェア開発の基礎として、汎用の画像処理システムを使ったマッチングの研究も Sharp 以来いくつかなされている⁷⁾。これらは、例外なく面積相関を使ったマッチングシステムを採用しているが、現在のところ精度、信頼性、適用範囲において十分満足できる技法とはいいがたく、各システムは恣意的に作られている部分が多い。

中小縮尺の画像のマッチングでは、対応点探索の際の迷走をどう防ぐかが問題の中心となる。一般に、樹木密生部分や水面では画像は白色雑音に近い濃度分布をもち、迷走が起こりやすい。この点で最近 Pantan が発表したシステムは、迷走防止とマッチングの精度向上のため、きめ細かな制御を組み込んでいる。さらに処理速度

* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科
(〒700 岡山市津島中3)

** 正会員 工修 岡山大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 工修 アジア航測(株)(〒154 世田谷区弦巻5-2-16)

向上を図るため、処理の流れ全体をマイクロプロセッサに組んでハードウェア化した^{8)~12)}。彼のシステムは、これまでに発表された標準的な面積相関の技法をほぼすべて含んでいるものである。しかし、これを著者が日本の空中写真を用いて追試したところ、多くの点でうまく機能せず、よいマッチング結果を得るためには、基本的な改善が必要であった。そこで、Pantonの方法を基礎として、理論的、実験的に考察を加え従来の手法の限界を明らかにするとともに、新しい手法を提示した。この論文ではその経過と実験の結果を述べる。

2. Pantonのマッチングアルゴリズムの概要

地形の再現は、地表上の多数の点の三次元座標を求めることを基礎とする。これらの点は、地上、モデル上、左右画像上のいずれかにおいて組織的に位置し、一定の座標系によって表示しなければならない。Pantonはこの点を左画像上の格子点に置き、その対応点を右画像上に順次見出す方法でマッチングを行った。Fig.1にマッチングの概要を示す。陰画の位置には傾いた撮影時の画像、陽画の位置には直角撮影に直した画像（偏位修正画像とよぶ）を描いてある。ここでは、格子を左の偏位修正画像上に置き、その座標を xy および uv で表わした。このとき、左右画像の対応点 $p_1(x,y)$, $p_2(u,v)$ においては、 $y=v$ となるので、マッチングは u 方向一次元的に行え、計算機処理のうえで非常に都合がよい。

Pantonのマッチングの概要は Fig.2の格子点配置を参照して次のようである。

- 1) マッチングの順序 x —一定の線上で y の増加する方向の点を順次マッチングさせ、1本の線上の点で処理が終わると x の増加する線上の点へ進む。Fig.2の黒丸はすでに対応点が決定された既探索点である。
- 2) 近似対応点の予測 格子点 $p_{1ij}(x_{ij}, y_{ij})$ にマッチングする対応点 $p_{2ij}(u_{ij}, v_{ij})$ を求める前に、近似対

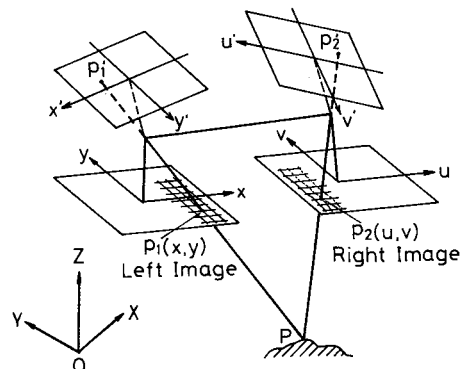


Fig.1 Scheme of Stereo Matching.

応点 $\hat{p}_{2ij}(\hat{u}_{ij}, \hat{v}_{ij})$ を予測する。ここに、添字 ij は格子点番号を表わす。Pantonは \hat{p}_{2ij} は近傍の既探索点での地形勾配を外挿して求めた。しかし実験によるとこの方法は過去の mismatching が大きく影響を与えがちであったので、著者は次の予測式を使った。

$$\left. \begin{aligned} u_{ij} &= x_{ij} + w_1 p_{x,i,j-1} + w_2 p_{x,i-1,j} + w_3 p_{x,i-1,j-1} \\ p_{xij} &= u_{ij} - x_{ij}, \quad w_1 = w_2 = 0.4, \quad w_3 = 0.2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

式(1)は周囲3格子点の x -視差 p_x の平均値（すなわち標高の平均値と等価）を与える。重み w は点 p_{1ij} と既探索点との距離に応じて減少させた。

3) 相関窓の設定 格子点 p_{1ij} のまわりに $L \times L$ 画素の相関窓をとる。 L の決定法については、3.(2)で述べる。

4) 探索窓の設定 近似対応点の周りに、探索範囲 $\pm T$ 画素の探索窓を設定する。Pantonは T の与え方を定めていないが、 T の大きさは地表勾配によって定められるはずのものである。地表勾配とこれによる投影ひずみ (x -視差に相当する) の関係式は、森、服部が導いた¹⁴⁾。それによると右写真の u 方向の格子間距離

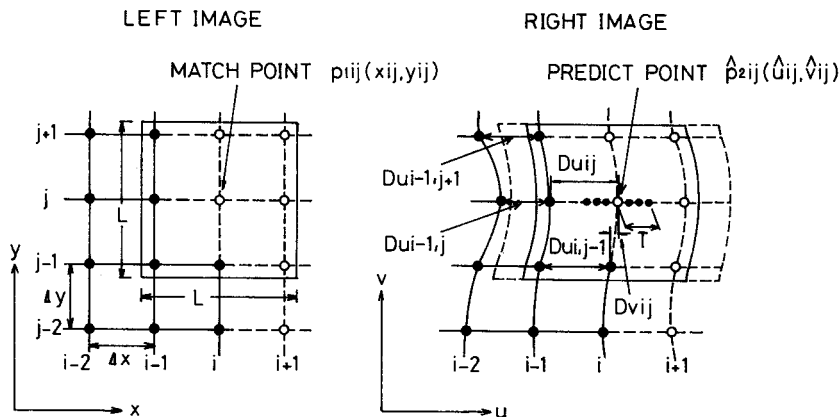


Fig.2 Grid Points and Their Conjugates.

D_{uij} および、 v 方向の格子点のずれ D_{vij}

$$D_{uij} = u_{ij} - u_{i-1,j}, \quad D_{vij} = v_{ij} - v_{i-1,j}$$

と、地形勾配の関係は、

$$|D_{uij}/\Delta x - 1| \leq u_\tau \text{ かつ } |D_{vij}/\Delta y| \leq v_\tau \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし $u_\tau = b \nabla / (c - r \nabla)$ である。ここで Δx , Δy は左画像上の格子点間隔、 b は写真上の撮影基線長、 c は画面距離、 $\nabla = \sqrt{(\partial Z / \partial X)^2 + (\partial Z / \partial Y)^2}$ は推定地表最急勾配、 $r = \sqrt{x_{iU}^2 + y_{iU}^2}$ は左写真点 p_{iU} の主点からの距離である。さらに格子点の位置の整合性がくずれないように、

$$D_{uij} \geq 0 \dots\dots\dots (2')$$

の制限を加える必要がある。ここでは $\nabla = 1.0$ (勾配 45°) とした。 $u_\tau \approx 0.8$ になるので、近似対応点の予測精度が悪くとも近似対応点のまわりに $u_{ij} \pm \Delta x$ の範囲を探索すればよいといえる。

5) 投影ひずみの影響緩和法 地形起伏による投影ひずみは相関を低下させ、細部のマッチングの精度をおとす。この影響を緩和するため、Panton は右写真の探索窓の形を相関窓に適合するよう変形させて相関を向上させることを提案した。これをここでは適合窓の形成とよぶ。これについては 3.(3) で論議する。

6) マッチングの実行 左右画像濃度の相関係数 $\rho(\tau)$ (τ は探索窓内で動く) を計算して、その最大点を対応点とする。マッチングの規準としては、使用例は少ないが、「差の 2 乗和」、「差の絶対値和」などが使われることもある。なお、面積相関によるマッチングではどの手法でも結果にほとんど差がみられないことが報告されている¹⁵⁾

7) 信頼性の判断 マッチングが正しく実行されたかを事後に判断するため、Panton は 5 つの信頼性基準を提案した。これについては 3.(4) で述べる。

3. Panton の方法の実験的検討

Panton は、相関窓の大きさ、信頼性基準など多くの閾値を外からパラメーターとして与えるようにしているが、パラメーター指定の基準と結果の信頼性や安定性が不明である。また適合窓の形成法も明確に示していない。そこで 2. に示した各項目中の主要点について理論的ないし実験的検討を加えて^{16), 17)}、その有効性を考察した。最初にまず実験資料を説明する。

(1) 実験資料

Zeiss 社製カメラ RMK 15/23 で撮影した 1 : 26 000 実体空中写真対を $50 \mu\text{m}$ (1 画素幅は地上 1.2 m) 間隔で分解し、さらに Fig. 1 に示した偏位修正画像に再サンプリングした画像を実験に使った。濃度値は、0~3 D を 8 bit で計測した。画像データの詳細は文献 2) を参照されたい。画像の分解はドラム走査型微小濃度計

(Joyce Loebel 社製 Scanding-3; 京都大学食糧科学研究所所有)で行っているが、構造上フィルムをドラム面に圧着できないことによって生じられる不規則変形があって、偏位修正画像には、 ± 1 画素程度の縦視差があった。補注に縦視差による位置誤差の大きさの評価を示した。これによると、XYZ 各方向にそれぞれ最大 1 m, 3 m, 5 m の地表の位置ずれが生じる可能性がある。

図化領域 (1 km \times 1 km) の左写真を Fig. 3 に示した。地形の最大勾配は約 30° であり、山地部分は均質で白色雑音に近い濃度分布を示すところが多い。黒枠で囲った小領域 (デジタル画像上で 135 \times 135 画素) はマッチング精度の検査に例として用いた領域で「領域 A」とよぶ。

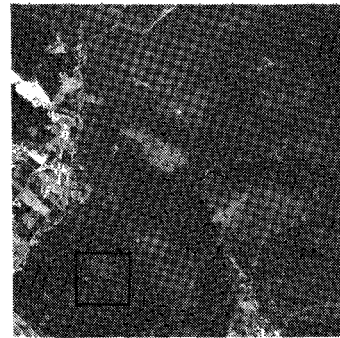


Fig. 3 Left Photograph of Test Area; The enclosed sub-area (referred to 'Area A') is used for check of matching performance.

写真の標定は、1 : 10 000 地形図 (標高のみは 1 : 2 500 地形図を使用) の原図に合うように実行し、基準点残差の 2 乗平均値は、平面位置 $\pm 1.68 \text{ m}$ (14 点)、標高 $\pm 0.8 \text{ m}$ (13 点) という結果を得た。

樹木上面を地表と考えて等高線描画した地形図を新しく作成し、マッチング結果の検証にはこの地形図を用いた。この理由は、分離画素が地上 1.2 m であるため、樹木の 1 本 1 本は分離不可能であって、ステレオマッチングは樹高面でなされると考えられるからである。この等高線図を Fig. 4 に示す。原縮尺は 1 : 10 000 であって、等高線間隔は上記のフィルムひずみによる誤差を考慮して 20 m とした。点線は間曲線である。なお、 x -方向 1 画素のずれは比高 2.2 m に相当する。

実験では格子間隔を $\Delta x = \Delta y = 9$ 画素 (地上 11.7 m) とした。これは地形の再現には十分な密度であり、実験領域内には、90 \times 90 点の格子点が含まれる。

Panton の方法のなかで再検討する項目として、ここでは次の 3 点を取り上げる。1) 相関窓の幅 L の決定法。2) 投影ひずみの影響の緩和法。3) マッチングの信頼性の判断。

(2) 相関窓の幅 L について

相関窓の大きさは面積相関法で最も大きな影響を与えるパラメーターである。一般に小さな相関窓では、マッチングは不安定になり、迷走が起りやすく、逆に大きな相関窓では、地形勾配による投影ひずみのために正確な対応を見出しにくい。著者らはこれまでに、幅 L の相関窓は $1/(2L)$ 以上の高周波を通過させるハイパスフィルターになること、一定の投影ひずみであれば高周波成分ほど相関が低下すること、相関窓の幅と投影ひずみ量は相乗的に相関を低下させることを解析的に示し

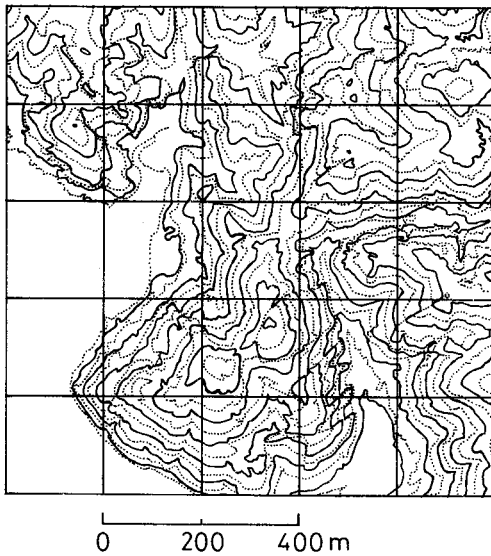


Fig. 4 Contour Map of Top Surface of Trees ; Contour interval=20 m.

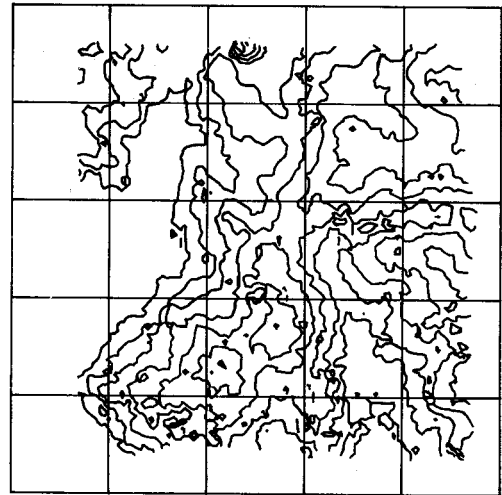


(a) $L=11$ pixel

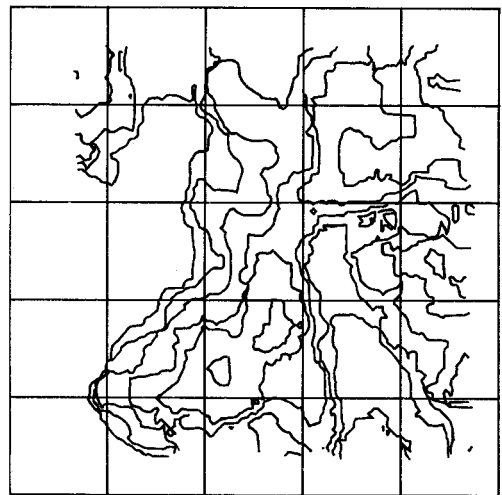
た¹⁴⁾。しかし一般的に適切な L の値を前もって決定することは、地形の起伏、画像濃度値の分布が複雑なため困難である。

実験では $L=20$ (画素) 以下では迷走が激しく、 $L=50$ 以上では投影ひずみの影響が現われた。4. で述べる多段階の繰返し相関の実験で使う相関窓 $L=11$, $L=21$, $L=63$ (画素) について、適合窓の形成を行わずマッチングを実行したところ、それぞれ Fig. 5 (a), (b), (c) に示した結果を得た。(a) は顕著な迷走が起っている例であり、(c) は投影ひずみのため、細部のマッチングができていない例である。(b) ではほぼ正しいマッチングができていているものの震動が激しく、小さな迷走が各所にみられる。

Panton は L の最小許容値を見出すのに相関窓内の濃



(b) $L=21$ pixel



(c) $L=63$ pixel

Fig. 5 Contour Maps Plotted through Stereo Matching with Different Correlation Window sizes $L \times L$: Contour interval=20 m.

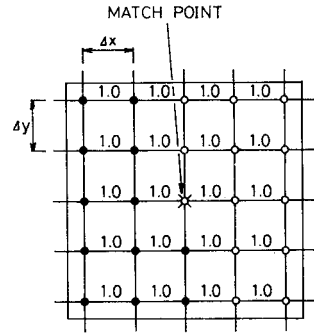
度分布の標準偏差 σ がある閾値 σ_T を越えるまで L を増加させた。ただし σ_T の与え方は示していない。幅 L の相関窓はほぼ $1/(2L)$ 以上の高周波を通過させるので、 σ^2 は $1/(2L)$ 以上の高周波成分の分散である。4. で示すように、小縮尺画像では、画像の高周波部分はマッチングにほとんど関与せず、雑音として働く。雑音量が場所によらず一定と仮定できれば σ_T で L を規定する方法は信号対雑音比から L を決定していると解釈できるので一見合理的である。しかし雑音量は前もって知ることができないので、 σ_T は試行錯誤的に与えねばならない。ところが実験によれば、迷走の起こりやすい山地部では、濃度分布は白色雑音に近く、 L の増加に伴う σ^2 の増加率は小さく σ_T の設定が微妙であるうえに、 L が 10~100 画素以上の値に広がってしまい、適切な σ_T を試行錯誤的に与えるのは実際には困難であった。著者は L の最小許容値を見出す方法をとらず、最初は大きな相関窓を使って粗いマッチングを行い、次に小さな相関窓を使って細部のマッチングを行う多段階の手続きをとった。信号対雑音比は、事後的に L の妥当性をみるために使った。

(3) 投影ひずみの影響緩和法について

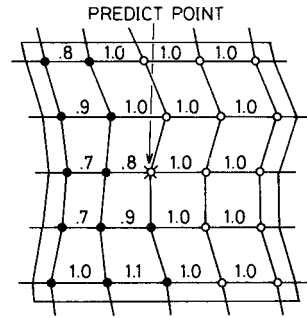
Panton は、投影ひずみによる相関の低下を防ぐため、適合探索窓の形成を提案した。しかし彼は、探索窓の中に含まれる未探索点の x -視差をどう予測するかを示していない。ここでは次の 3 方法を検討した。これらの方法において窓内の画素の再サンプリングには、線形内挿を使った。

- a) 正方窓——窓形成を行わず正方形の窓とする。
- b) 標高等置窓——マッチングさせる格子点以外の未探索点の標高を 1 つ左の点の標高に等しくおく (Fig. 6(b)).
- c) 勾配等置窓——マッチングさせる格子点以外の未探索点の勾配を 1 つ左の点の勾配に等しくおく (Fig. 6(c)).

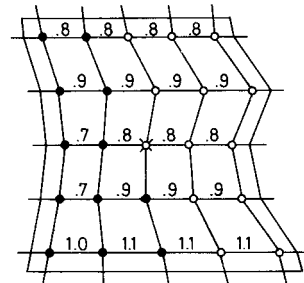
結論的にいえば、これらの中で正方窓以外は、迷走が出る事が多く、出ない場合でもマッチングの精度を上げることはできなかった。一例として Fig. 7 に $L=63$ のとき、勾配等置窓を使ったマッチング結果を示した。Fig. 5 (c) と比較して、かえって精度が落ちているのがわかる。また標高等置窓でも Fig. 7 ほど劣化しないものの多くの迷走が発生した。これは、1) 探索窓内に、マッチングの誤りのある点が含まれると適合窓の形成に著しい悪影響を及ぼすこと、2) 一般にわが国の地形では、平地と山地の移行部分などで勾配が不連続に変化するため、未探索点の x -視差を既探索点の x -視差からよい精度で予測することはできないことなどのためであると考えられる。著者は 1 回のマッチング処理で投影ひずみの



(a) Correlation Window



(b) Search Window : Constant Height



(c) Search Window : Constant Slope

Fig. 6 Shapes of Adaptive Search Window.

影響を緩和するのは困難であると判断し、次のような繰返し相関の手続きをとった。まず 1 回目のマッチングでは正方窓を使い、次に得られた格子点の x -視差の値を使って、探索窓の形成を行い、再度マッチングする。 x -視差の値が収束するまで繰返し、マッチングの精度を上げる。また、誤った対応点が窓形成に与える悪影響を緩和するため、1 回目のマッチングで得られた x -視差の震動をフィルタリングして 2 回目のマッチングを行った。この具体的な方法は 4. で示す。

(4) 信頼性基準について

正しいマッチングが行われているかを判断するのに、Panton は次の 5 つの信頼性基準を示した。

- (イ) 最大相関係数の値が閾値を超えないとき信頼性なしとする。(ロ) 相関窓を前もって与える最大値まで



Fig. 7 Contour Map Plotted through Stereo Matching with Adaptive Search Window (c); Contour interval=20 m.

大きくしても窓内の濃度値の標準偏差が閾値を超えないとき信頼性なしとする。(ハ) 最大相関点が探索窓内の端点に来るときは信頼性なしとする。(ニ) マッチングの結果から計算した地形勾配が許容値を越えているとき信頼性なしとする。(ホ) 最大相関点近傍の相関係数列の勾配が閾値に達しないとき信頼性なしとする。

このうち (イ) は、信頼性基準として最も普通に用いられる。しかし相関係数は 2 信号の一致度を示すが、周波数帯域ごとの一致度を表わさない。そのため、相関窓を小さくすれば雑音が卓越して正しい対応点での相関係数は下がり逆に大きな相関窓では上がる。したがって一般にマッチングの信頼性の基準としては使えない。しかも小さい相関窓では、誤った探索点で相関係数が大きくなる可能性が高くなる。たとえば明らかに迷走を起こしている Fig. 5 (a) ($L=11$) と、比較的正しいマッチングができていると思われる Fig. 5 (b) ($L=21$) の領域 A 部分で最大相関係数の分布を調べてみると、Fig. 8 のようになり、後者の方が大きな相関窓を使っているにもかかわらず、両者の違いはほとんどない。

(ロ) の窓内標準偏差は、安定性と密接に関係していて、小さい閾値では迷走が発生した。しかし画像の濃度分布特性は、画像ごとにまちまちであるうえ、2. で示したように適切な閾値を実験的に与えるのは難しかった。

(ハ)、(ニ) は投影ひずみの制限値 (式 (2)) を満足しているかを検査するのと等しく、むしろマッチングの制御に使うべきである。また (ホ) については一般に安定したマッチングほど相関係数列の勾配は緩やかになり、一方不安定なマッチングほど頂点のはっきりした形を示す傾向があって、むしろ信頼性は逆転した関係になることが多かった。

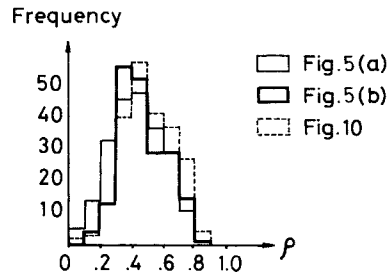


Fig. 8 Histogram of Maximum Correlation Coefficients in Area A.

著者は (イ)、(ロ) の代わりに、マッチングが終了した時点で、得られた格子点の x -視差を使って、左右画像の位相差を除去するように右画像を再サンプリングしたとき、どの程度両画像の位相が一致しているかを調べることで、マッチングの精度を評価することにした。

左右画像の座標系を、共通の xy 座標で表わす。左、右写真の点 (x, y) の濃度値をそれぞれ $D_1(x, y), D_2(x, y)$ で表わし、その構造を次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} D_1(x, y) &= D(x, y) + b_1 \\ D_2(x, y) &= D(x - p_x(x, y), y) + b_2 + \nu(x, y) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$D(x, y)$ は、平均 0 の両画像に共通の画像関数、 $p_x(x, y)$ は x -視差、 b_1, b_2 はバイアスで局所的には定数とみなせる。 $\nu(x, y)$ は平均 0、分散 σ^2 の白色雑音である。 $M \times M$ 画素の領域でマッチング精度を調べるときを考える。まず b_1, b_2 を領域の平均値で推定する。マッチングが正しく行われていれば、再サンプリング画像で

$$\hat{\nu}(x, y) = -(D_1(x, y) - b_1) + (D_2(x, y) - b_2) \dots\dots (4)$$

は、雑音 $\nu(x, y)$ に等しい。このとき $D_1(x, y) - b_1$ と $\hat{\nu}(x, y)$ は無相関になると予想される。これをみるには、両信号のコヒーレンスを調べればよい¹⁸⁾。

まず両者の x 方向の自己および相互相関関数 $C_{11}(\tau), C_{\nu\nu}(\tau), C_{1\nu}(\tau)$ を計算する。便宜上座標点を領域 A の左下隅に移動すると、たとえば $C_{1\nu}(\tau)$ については、

$$\left. \begin{aligned} C_{1\nu}(\tau) &= \frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} (D_1(x, y) - b_1) \cdot \hat{\nu}(x + \tau, y) \quad (N > \tau \geq 0) \\ C_{1\nu}(\tau) &= \frac{1}{M^2} \sum_{x=\tau}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} (D_1(x + \tau, y) - b_1) \cdot \hat{\nu}(x, y) \quad (-N \leq \tau < 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

で求める。ここに、 N は最大位置遅れである。

次にこれらのフーリエの変換から、スペクトルおよび、相互スペクトル $S_{11}(f), S_{\nu\nu}(f), S_{1\nu}(f)$ を計算する。たとえば $S_{1\nu}(f)$ については、

$$S_{1\nu}(f) = \sum_{\tau=-N}^{N-1} C_{1\nu}(\tau) e^{-\frac{2\pi i f \tau}{M}} \dots\dots (6)$$

で求められる。なお N が有限値であることによる打ち

切り効果を和らげるため、スペクトルの計算には Parzen フィルター¹⁹⁾を施した。左右画像のコヒーレンスは

$$\text{Coh}(f) = |S_{1\nu}(f)| / \sqrt{S_{11}(f) S_{\nu\nu}(f)} \dots\dots\dots (7)$$

で定義される。コヒーレンスはスペクトル間の相関の強さを表わし、マッチングが正しければ $\text{Coh}(f)=0$ に近づくことと予想される。

4. 繰返し相関によるマッチング

3.(2), 3.(3)の結果から次のように判断した。

Pantonの方法は1回のマッチング手続きによって、対応する点を探索しようとするものであるが、このとき迷走しない安定したマッチングと、細部の高精度のマッチングとはトレードオフの関係にあり、達成不可能である。すなわち、安定したマッチングには、相関窓を大きくして雑音の少ない低周波領域を多く含んだものを使う必要があるがこのとき細部のマッチングは犠牲になる。一方精度よいマッチングには高周波域が必要であるが、迷走が起りやすい。そのため著者は次のような多段階の繰返しマッチングの手続きを考案した。この節では、各段階の諸量を添字を付けて区別する。

1) 偏位修正したステレオ画像 (I_0 とよびその画素幅を s_0 とする) を約1オクターブずつずらして高周波を除去した画像 I_1, I_2, \dots, I_n に分ける。ここでは高周波の汨波に移動平均を用いた。長さ s の移動平均は、おおむね $1/(2s)$ 以上の高周波を汨波する。1オクターブずつずらして汨波するには、画像 I_1, I_2, \dots, I_n に対し、おのおのの移動平均幅を s_1, s_2, \dots, s_n としたとき、 $s_1=2s_0, s_2=2s_1, \dots$, とすればよい。実際には、平均の対称性を考えて、 s_i は奇数とし、 $s_1=3, s_2=5, s_3=9$ 画素とする。各画像 $I_i (i=1, 2, \dots, n)$ 上で、 x, y 方向それぞれ s_i 画素ごとに l 個取り出して相関窓の行列をつくる。このとき画像 I_i で使う相関窓 L_i は $L_i = s_i l$ となり、マッチングには $1/(2s_i) \sim 1/(2s_i l)$ の周波数域、すなわち $\log_2 l$ オクターブの帯域を利用することになる。 l の大きさについては後述する。

2) 最初は画像 I_n を使い低周波域で粗いマッチングを行う。近似対応点の予測には式(1)を使う。1度のマッチングでは投影ひずみの影響で細部のマッチングができていないので、得られた格子点の x -視差の値を参照して適合探索窓の形成を行い再度マッチングする。ただし、マッチングで得られた時点の x -視差には高周波の振動が含まれているので、これを除去するため次のフィルタリング操作を施す。

$$p_{xij} \leftarrow \frac{1}{9} \sum_{m,n=-1}^1 p_{x_i+m, j+n} \dots\dots\dots (8)$$

p_{xij} は i, j 格子点の x -視差である。さらにマッチング

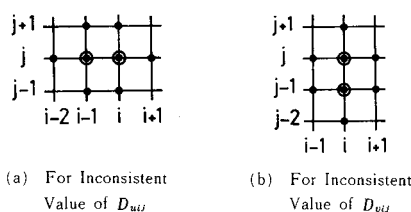


Fig. 9 Correction of Inconsistent x -parallaxes ; x -parallaxes of inconsistent points are replaced by the mean of those of surrounding points and themselves.

の過程で式(2), (2')が成り立っていることを確認する。もし格子点 i, j で式(2), (2')が成立していなければ次の平均化処理をする。すなわち D_{uij} が満たさないときは Fig. 9 (a) の8点, D_{vij} が満たさないときは Fig. 9(b) の8点を取り、その x -視差の平均値を、それぞれ $p_{xij}, p_{x_{i-1,j}}$ および $p_{x_{i+1,j}}, p_{x_{i,j-1}}$ の x -視差として与える。前者の操作がないときは、適合窓の形成でかえってマッチングが劣化してしまうことが多かった。また 45° 勾配の制限式(2')が破たんすることは、探索幅をあらかじめ制限しているためほとんど生じなかった。しかし後者の操作がないと、実験では $l < 35$ の小さな l については式(2')の破たんが生じ、再サンプリングの処理が中断した。他方 $l > 35$ については、式(2')だけでなく 45° 勾配の制限式(2)が破たんすることもなかった。繰返しのマッチングは x -視差が十分収束するまで続ける。

3) 画像 I_n で x -視差が収束すれば、画像 I_{n-1} に移り、 x -視差が収束するまで2)と同じ操作を繰り返す。順次 I_{n-1}, \dots, I_1, I_0 でのマッチングを行い精度を上げる。2段階目からのマッチングでは、探索範囲は小さく ± 3 画素に固定する。

4) 式(7)で位相の収束性を検査してマッチングを終える。

実験では最初3段階のマッチングとした。このとき第1, 第2段階は第3段階に用いる偏位修正画像 I_0 に $5 \times 5, 3 \times 3$ 画素の移動平均を施したものである。しかし、条件を同じにして、2段階のマッチングとしてもほとんど同じ結果を得た。2段階のマッチングでは、第1段階に 3×3 画素の移動平均画像を使う。これは低周波域では迷走が起りにくいことを意味している。以下では、2段階のマッチングとして述べる。

相関窓の行列の次元 l は、第1, 第2段階に共通して $l=21$ とした。すなわち、 $L_1=63, L_0=21$ になる。これは第2段階で相関窓が x, y 方向それぞれほぼ2格子点(格子間隔9画素)をおおう大きさである。格子間隔(9画素)以上の高周波の投影ひずみは、繰返し相関の過程でも除去されなくて雑音が卓越するであろうから、

$L_0=21$ という値は安定性の面からやや小さいと考えられる。3. で述べた方法でも、 $L=21$ は、やや不安定な結果を示した。しかし、繰返し相関によれば、ごく小さな迷走を除いて、安定して収束した。また実験によれば4格子点をおおう $l=35$ でも結果にあまり差がなかった。ただし $l=21$ に比べて少し等高線がなめらかになり

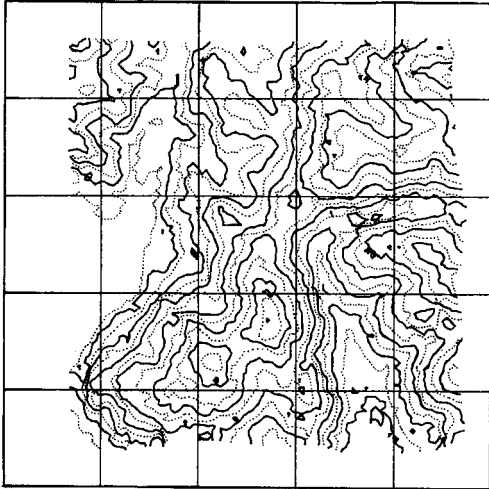


Fig. 10 Contour Map Plotted through Stereo Matching by Iterative Correlation ($l=21$); Contour interval=20 m.

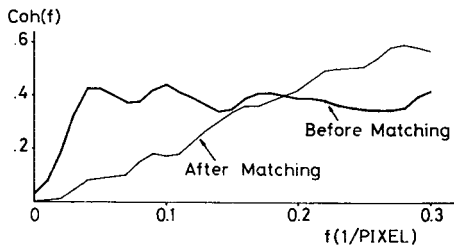


Fig. 11 Coherence $Coh(f)$ of Grey Levels of the Left Image $D_1(x,y)-b_1$ and Noise $\hat{v}(x,y)$ before and after Matching.

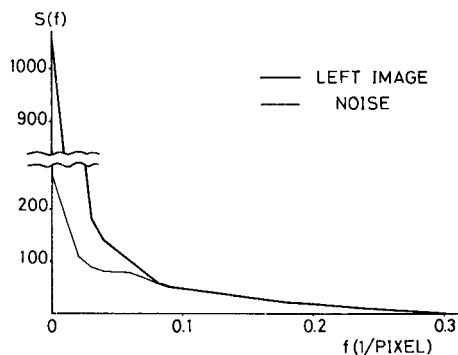


Fig. 12 Spectral Distribution of Grey Levels of the Left Image and Noise.

後述するような小さな迷走も起こらなかった。これは、 l の広い範囲にわたってアルゴリズムが安定して働くことを意味する。

第1段階では x -視差の収束に3回の繰返しマッチングが必要であったが、第2段階では1回の処理でほとんど収束した。第1, 第2各段階で3回ずつマッチングを行い、その最終結果から得られた等高線図を Fig. 10 に示す。領域Aで、相関係数の分布を調べてみると、第1段階の終わりでは、すべて0.8以上の値をとった。また第2段階の終わりでの分布 ($l=L_0=21$) を Fig. 8 に示したが、Fig. 8の他の2つに比べて相関係数はやや高い値を示しているものの、有意の差があるほどではない。Fig. 4, Fig. 10を比較すると、よく一致しているが Fig. 10にはまだ小さな迷走がみられる。これを防ぐには、①第2段階のマッチングの実行時に、第1段階のマッチングを同時に行い、小さな相関窓による迷走を監視する、②第2段階のマッチングで相関係数が極端に小さくなれば、そこだけ相関窓を広げて、信号対雑音比の低下を防ぐ、などの方法が考えられる。

Fig. 10の収束性をみるため、領域Aで左画像 $D_1(x,y)-b_1$ と雑音 $\hat{v}(x,y)$ のコヒーレンス $Coh(f)$ を計算すると Fig. 11 のようであった。Fig. 11には領域Aの中心同士を目測で合わせたときのマッチング前後のコヒーレンスを描いた。マッチング後には、格子点間隔以下の低周波域 $f \leq 1/(2 \times 9) = 0.06$ での低周波部でコヒーレンスが十分小さくなっていて、 x -視差は正しく測定されていることがわかる。

また左画像 $D_1(x,y)-b_1$ と雑音 $\hat{v}(x,y)$ のスペクトル $S(f)$ を Fig. 12 に示した。画像のスペクトルは低周波部に集中しているが、雑音はかなりよく白色化されている。 $f \geq 0.08$ では信号と雑音が同じ大きさであることがわかる。格子間隔以上 ($f \geq 0.06$) では位相の収束性が悪いことが予想されるが、そればかりでなく、樹木の上部では視準方向の違いのために雑音化されるからである。3.(2)で $L=20$ 以下では迷走の激しいことを述べたが、 $f > 1/(20 \times 2) = 0.025$ では信号対雑音比が急激に低下するのがわかる。

5. 結 び

従来からのステレオマッチングの手法を集成し、フィードバックや制御を行うための判断をも折り込んだものとしてPantonの提案した処理システムがあるが、本文で示したように、森林に代表されるような高周波雑音が多くて一様なテクスチャの場所ではマッチングの迷走が起り、これを防止しようとすると、山地においては投影ひずみの存在が隘路となる。以上の主要な難点を改善する方法として、低周波域で粗いマッチングから

始め、しだいに高周波域でのマッチングに移り、相関低下の原因となる投影ひずみは各処理段階で順次除去するという、繰返し相関の手続きが有効であることを示した。ただし、ここで示した手法でも、小さな相関窓による高周波域のマッチングで、まだ小さな迷走が起こる。これを防ぐには、低周波域のマッチングを同時に実行して、高周波域での迷走を監視する構造が必要である。

中小縮尺の空中写真あるいは地上走査データを用いて、領域全体のステレオマッチングを行うときには、本文で示した方法を基礎にしてハードウェア化すれば実用に近づくであろう。また、この方法は、撮影の場所と時刻を異にする記録の画素間の対応を見出すにも利用できる。一方では、比高急変物体（高層建築物など）を写した大縮尺写真（1：10 000以上くらい）に対しては隠蔽部処理の問題を解決しなければならない。この方面の新しい試みが行われていることを付言しておく。

最後に、画像分解にあたっては、京都大学食糧科学研究所 森田雄平教授、相原茂夫助手に、また、写真の標定および図化作業には、アジア航測（株）にお世話になったことに対し、御礼を申し上げる。

補注 フィルムひずみによる位置誤差の評価

Fig. 13 に示したように鉛直等高度撮影の空中写真対を考える。写真点 $p_1(x, y)$ 、 $p_2(u, v)$ の地上座標 $P(X, Y, Z)$ は、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{B}{x-u} \begin{bmatrix} x \\ y \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。B は撮影基線長、c は画面距離である。左右画像にフィルムひずみがあるとき、直線 $\overline{O_1p_1}$ 、 $\overline{O_2p_2}$ は交わらない。このとき、P の座標を

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{B}{x-u} \begin{bmatrix} x \\ (y+v)/2 \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)'$$

で与えることにする。フィルムひずみのためものと写真

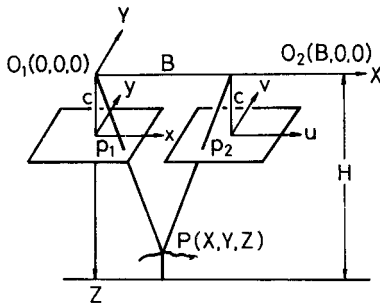


Fig. 13 Stereo Photographs Taken Vertically at the Same Height.

座標 (x, y) 、 (u, v) が $(x+dx, y+dy)$ 、 $(u+du, v+dv)$ と観測されたとき、生じる地上座標の誤差 (dX, dY, dZ) は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} dX &= \frac{-Bu}{(x-u)^2} dx + \frac{Bx}{(x-u)^2} du \\ dY &= \frac{B(y+v)/2}{(x-u)^2} (du-dx) + \frac{B}{2(x-u)} (dy+dv) \\ dZ &= \frac{Bc}{(x-u)^2} (du-dx) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

実験に使った画像では dy, dv は ± 1 画素（画素幅 $p = 0.05 \text{ mm}$ ）程度であり、 dx も同程度と仮定する。すなわち $|dx|, |dy|, |du|, |dv| \leq p$ とする。また、実験に使った写真は $x-u \approx sB$ (s : 写真縮尺) $= 87 \text{ mm}$ 、 $30 < x < 80 \text{ mm}$ 、 $-65 < y, v < -20 \text{ mm}$ 、 $c = 152.90 \text{ mm}$ であるから、

$$\begin{aligned} |dX| &\leq \frac{B}{(x-u)^2} (|u| + |x|) \cdot p \leq 1.3 \text{ m} \\ |dY| &\leq \left(\frac{B|y+v|}{(x-u)^2} + \frac{B}{|x-u|} \right) \cdot p \leq 3.2 \text{ m} \\ |dZ| &\leq \frac{bc}{(x-u)^2} \cdot 2p \leq 4.6 \text{ m} \end{aligned}$$

すなわち、Y 方向には最大 3.2 m、Z 方向には最大 4.6 m の誤差が生じる可能性がある。

参考文献

- 1) Marr, D. and Poggio, T. : A Theory of Human Stereo Vision, AIM 451, Artificial Intelligence Lab., MIT (1977)
- 2) 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, pp. 4~13, 1981.
- 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, 1982.
- 4) Hobrough, G.L. : Automatic Stereo Plotting, Photogrammetric Engineering, Vol. 25, pp. 763~769, 1959.
- 5) Kelly, R.E. and McConnell, P.R.H. : The Gestalt Photomapping System, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 43, No. 11, pp. 1407~1417, 1977.
- 6) Szangolies, H.K., Kunze, W., Tiedeken, W., Martin, H. and Marckwardt, W. : Topomat, X III International Congress for Photogrammetry, Helsinki 1976.
- 7) Konecny, G. and Page, D. : Correlation Techniques and Devices, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 3, pp. 323~333, 1981.
- 8) Panton, D.J. and Murphy, M.E. : 1975 a Digital Cartographic Study and Benchmark, First Interim Technical Report, U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, October 1975.

- 9) Panton, D.J. and Murphy, M.E. : 1975 b Digital Cartographic Study and Benchmark, Second Interim Technical Report, U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, December 1975.
- 10) Panton, D. J. and Murphy, M. E. : 1976 Digital Cartographic Study and Benchmark, Third Interim Technical Report, U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, September 1976.
- 11) Panton, D. J. and Murphy, M. E. : 1977 Digital Cartographic Study and Benchmark, Fourth Interim Technical Report, U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, July 1977.
- 12) Panton, D. J. : A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 3, pp. 323~333, 1981.
- 13) 文献 8) 第 5 節
- 14) 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, pp. 33~39, 1983.
- 15) Ehlers, M. : Increase in Correlation Accuracy of Remote Sensing Imagery by Digital Filtering, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 3, pp. 415~420, 1982.
- 16) 森 忠次・服部 進・内田 修・岸根泰三：空中写真からの等高線自動図化法と処理プログラム（Ⅱ），Research & Development, Okayama University Computer Center, Vol. 2, No. 2, pp. 23~52, 1984.
- 17) 森 忠次・服部 進・岸根泰三：Panton の方法に基づく自動図化法の精度向上，土木学会中国四国支部第 35 回学術講演会一般講演概要集，昭和 58 年 5 月.
- 18) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，pp. 63~66, 1977.
- 19) 文献 18)，pp. 190.
- 20) 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.

(1984. 6. 18・受付)