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

Spectral Characteristics on Deterioration of Image Correlation due to Projective Distortions

森 忠次*, 服部 進*, 内田 修**

Chuji Mori, Susumu Hattori*, Osamu Uchida***

Abstract: Projective distortions due to terrain reliefs considerably deteriorate image correlation in stereo matching. This paper covers the derivation of the relationship between the ensemble mean of sample cross-covariances, usually used as a matching criterion, and projective distortions, in terms of correlation window size and a power spectral distribution of image densities, and further discusses their effects on correlation mathematically. In addition a simple correlation test is appended to verify the validity of the discussion. The main results obtained through the discussion are as follows:

- A correlation window works as a high-pass filter cutting off the lower frequency components of spectrum, wavelength of which is shorter than a half of window size.
- Projective distortions distort the higher frequency components and deteriorate correlation. Hence, for obtaining precise matching performance, recursive correlation procedure accompanied with step-by-step corrections of distortions will be essential in any practical matching strategy.
- At the corners of the film exposed by a wide-angle camera, it may occur that a projective distortion caused by more than 45° slopes exceeds an allowable limit.

概要: 空中写真測量の窮極の目標は、実体視の自動化であり、その手段として画像相関法が研究されている。このとき地形勾配にもとづく投影歪は、実体画像の相関を低下させる大きな要因である。この論文は標本相互共分散を相関の標準としたときに、これと投影歪、相関窓の大きさ、画像濃度値のスペクトル分布がどのようにに関連するかを画像濃度値のモデル化を行い、定量的に導いて、相互的な影響を論じたものである。また議論の正当性を評価するため、相関性の実験を付け加えた。

1. はじめに

画像相関は、実体空中写真画像の対応点を自動的に見出し、微分偏位修正をしたり、数値地形モデルを作成するためのほとんど唯一の手法として使われている^{1), 2)}。その典型的な方法は、左画像上の任意点 p_1 の右画像上の対応点 p_2 を見出すのに、 p_1 を囲む有限の相関窓をとり、これを右画像上に定めた探索窓内を動かして最大相関点を探索するもので、いわゆる面積

相関法である。このとき相関窓の大きさは対応点探索の精度や安定性を左右する大きな要因である。一般に地形が平坦であれば、相関窓は大きいほど好ましいことは自明であるが、地形に起伏があるときは左右画像に相対的な位置歪(投影歪)が入り相関を弱めるため、位置の同定は困難になる。そのため自ずから相関窓の大きさは制限されて、地形の起伏状態と画像の濃度パターンから適切な大きさを判断する必要がある。この報文では、正方形の相関窓を使って対応点の探索をおこなうとき、画像濃度の分布、地形起伏、相関窓の大きさが、お互いにどの程度探索に影響するかを、画像濃度値のスペクトル分布の観点から理論的、定量的に示すとともに³⁾、さらに実際の空中写真画像から求めた統計量を使った相関性の簡単な検討から議論の裏づけを行っている。この論文の目的は具体的な対応点探索

* 岡山大学 Okayama University

** アジア航測(株) Asia Air Survey Co., Ltd.

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 22, No. 4, 1983

の手法を論じるのではなく、面積相関に投影歪がどのように作用するかを考察し、有効な探索法を構成するための基礎知識を得ることである。

相関の尺度としては通常の標本相互共分散（以後は混乱のない限り共分散と言う）を用いた。それは共分散が画像のマッチングに最も普通に使われるためと、数学的に好ましい性質を持っていることによる。周知のように相関関数ないし共分散関数とパワースペクトルの間には密接な関係があり、かつエルゴード性の仮定を許すときには、共分散関数は標本共分散から推定される。この論文でもこの性質を利用する。

第2節では解析のために画像濃度値のモデル化をおこない、第3節では起こり得る投影歪の大きさを評価する。第4節で、投影歪と共分散の平均値との関係式を導き、最後の第5節でその関係式の正当性を実験で示した。

2. 画像濃度値のモデル化

図-1に面積相関の概念図を示す。内部、外部の標定要素が与えられているとき、探索は epipolar 幾何を用いて1次元におこなうことができる。図-1はこの場合であって xy は左右画像に共通の epipolar 座標系である。相関窓を簡単のため $L \times L$ の正方形にとり、探索範囲を $\pm T/2$ とする。

$p_1(x, y)$, $p_2(x, y)$ の濃度値を $D_1(x, y)$, $D_2(x, y)$ で表わすと、共分散 $C_e(x, y, \tau_x, L)$ は次式で定義される。

$$C_e(x, y, \tau_x, L) = \frac{1}{L^2} \iint_{-L/2}^{L/2} (D_1(x + \xi, y + \zeta) - \bar{D}_1(x, y)) \cdot (D_2(x + \tau_x + \xi, y + \zeta) - \bar{D}_2(x + \tau_x, y)) d\xi d\zeta \quad (1)$$

図-1 1次元面積相関

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}_1(x, y) &= \frac{1}{L^2} \iint_{-L/2}^{L/2} D_1(x + \xi, y + \zeta) d\xi d\zeta \\ \bar{D}_2(x, y) &= \frac{1}{L^2} \iint_{-L/2}^{L/2} D_2(x + \xi, y + \zeta) d\xi d\zeta \end{aligned} \right\}$$

τ_x は x - 軸方向の位置遅れである。共分散の挙動を知るためには濃度値の内部構造が必要である。フィルムは適正に露光されていると仮定して $D_1(x, y)$, $D_2(x, y)$ を次のようにモデル化する。

$$\left. \begin{aligned} D_1(x, y) &= D(x, y) + b_1 \\ D_2(x, y) &= D(x - p_x(x, y), y) + b_2 + \nu(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $D(x, y)$ は平均値からの濃度値の偏差であり、平均0、自己相関々数 $R(\tau_x, \tau_y)$ の定常確率場からの標本であるとする。すなわち、集合平均を E で表わすと、

$$\left. \begin{aligned} E(D(x, y)) &= 0 \\ R(\tau_x, \tau_y) &= E(D(x, y) D(x + \tau_x, y + \tau_y)) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

b_1 , b_2 はバイアスであって、局所的には定数とみなせる。 $\nu(x, y)$ は平均値0、分散 σ^2 をもった白色雑音とする。 $p_x(x, y)$ は点 $p_1(x, y)$ の x - 視差であり、平坦な地形では画像全域で一定である。なお $D(x, y)$ の平均が0であることからその自己共分散関数 $C(\tau_x, \tau_y)$ は $R(\tau_x, \tau_y)$ に等しい。

3. 地形勾配と投影歪

地形勾配とそれに起因する投影歪の関係は Panton⁴⁾ が簡略な式を発表しているが、ここで厳密な式を導いておく。図-2に示すように同一高度で鉛直撮影された実体空中写真対について考える。左写真上の点 $p_1(x, y)$ と右写真上の点 $p_2(u, v)$ が対応していて、 p_1 での微少ベクトル (dx, dy) が p_2 では (du, dv) に

図-2 地形勾配による投影歪

対応するとする。地表面 $Z = Z(X, Y)$ 上の点 $P(X, Y, Z)$ を媒介して、 $p_1(x, y)$ 、 $p_2(u, v)$ には次の関係がある。

$$\frac{X}{x} = \frac{Y}{y} = \frac{Z}{c} \quad (4)$$

$$u = \frac{X-B}{Z} c ; \quad v = y = \frac{Y}{Z} c \quad (5)$$

B は撮影基線長、 c は画面距離である。式(4)を X 、 Y に関して全微分して整理すると、

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \end{pmatrix} = \frac{1}{\frac{x}{c} \frac{\partial Z}{\partial X} + \frac{y}{c} \frac{\partial Z}{\partial Y} - 1} \begin{pmatrix} \frac{y}{c} \frac{\partial Z}{\partial Y} - 1 & -\frac{x}{c} \frac{\partial Z}{\partial Y} \\ -\frac{y}{c} \frac{\partial Z}{\partial X} & \frac{x}{c} \frac{\partial Z}{\partial X} - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{Z}{c} dx \\ \frac{Z}{c} dy \end{pmatrix} \quad (6)$$

次に式(5)の第1式を X 、 Y に関して全微分すると、

$$\begin{aligned} du &= \frac{Z - (X-B) \frac{\partial Z}{\partial X}}{Z^2} c dX \\ &\quad - \frac{X-B}{Z^2} \frac{\partial Z}{\partial Y} c dY \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)を式(7)に代入して、 Z のかわりに撮影高度 H を使えば次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= 1 - \frac{\frac{\partial Z}{\partial X}}{\frac{X}{B} \frac{\partial Z}{\partial X} + \frac{Y}{B} \frac{\partial Z}{\partial Y} - \frac{H}{B}} \\ &= 1 - \frac{\frac{\partial Z}{\partial X}}{\frac{x}{B_p} \frac{\partial Z}{\partial X} + \frac{y}{B_p} \frac{\partial Z}{\partial Y} - \frac{c}{B_p}} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= - \frac{\frac{\partial Z}{\partial Y}}{\frac{X}{B} \frac{\partial Z}{\partial X} + \frac{Y}{B} \frac{\partial Z}{\partial Y} - \frac{H}{B}} \\ &= - \frac{\frac{\partial Z}{\partial Y}}{\frac{x}{B_p} \frac{\partial Z}{\partial X} + \frac{y}{B_p} \frac{\partial Z}{\partial Y} - \frac{c}{B_p}} \end{aligned} \quad (8)$$

B_p は写真上の撮影基線長である。 $\partial u / \partial x$ は左画像を基準にしたときの x -軸方向の伸縮歪をあらわし、 $\partial u / \partial y$ は y -軸に沿うずれ歪をあらわす。

$$\left. \begin{aligned} s &= ((\partial Z / \partial X)^2 + (\partial Z / \partial Y)^2)^{1/2} \\ r &= (x^2 + y^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

とにおいて投影歪の上限を求めると次式を得る。

$$\left| \frac{\partial u}{\partial x} - 1 \right|, \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \leq s B_p / (c - r s) \quad (10)$$

第5節に示す実験例のデータについて式(10)を評価すると、撮影カメラ RMK 15/23、 $B_p = 87 \text{ mm}$ であるから、左写真上、主点から $r \text{ mm}$ の位置にある点の最大投影歪の値は図-3 になる。

議論を簡単にするために、今後地形起伏の空間周波数は相関窓の大きさ L に比べて十分に低いと仮定する。すなわち、

$$\partial u / \partial x = a, \quad \partial u / \partial y = b \quad (a, b: \text{定数}) \quad (11)$$

図-3 起きうる最大投影歪
地形勾配は度で表わし、() 内に s の値を示した

4. 投影歪による画像相関の低下

図-1 に戻ろう。 $D_1(x, y)$ 、 $D_2(x, y)$ がおのおのの定常であっても、投影歪が入ると結合定常でないの取扱いが困難である。ここでは確率過程の直交展開を使って、共分散 $C_e(x, y, \tau_x, L)$ の平均値を計算し、投影歪がこれに与える影響を論じる。

$D(x, y)$ を次のようにフーリエ級数展開する⁵⁾。

$$D(x, y) \sim \hat{D}(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} r_{mn} e^{j2\pi f_0(mx+ny)} \quad (12)$$

f_0 は微少振動数であって、小さくとればとる程 $D(x, y)$ と $\hat{D}(x, y)$ の 2 乗平均誤差は 0 に近づく。係数 r_{mn} は確率変数で、

$$r_{mn} = \iint_{-\infty}^{+\infty} D(x, y) \frac{\sin \frac{f_0}{2} x}{\pi x} \cdot \frac{\sin \frac{f_0}{2} y}{\pi y} \cdot e^{-j2\pi f_0(mx+ny)} dx dy \quad (13)$$

($m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

で与えられ次の直交性を持っている。

$$\left. \begin{aligned} E(r_{mn}) &= 0 \quad (m \neq 0 \text{ or } n \neq 0), \\ E(r_{00}) &= E(D(x, y)) = 0 \\ E(r_{kl}^* r_{mn}) &= 0 \quad (k \neq m \text{ or } l \neq n) \\ E(|r_{mn}|^2) &= \int_{(m-\frac{1}{2})f_0}^{(m+\frac{1}{2})f_0} \int_{(n-\frac{1}{2})f_0}^{(n+\frac{1}{2})f_0} S(f_x, f_y) df_x df_y \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで * は複素共役を示す。 $S(f_x, f_y)$ は $D(x, y)$ のパワースペクトルであり、周知のように自己相関関数 $R(\tau_x, \tau_y)$ のフーリエ変換で与えられる。

$$S(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} R(\tau_x, \tau_y) e^{-j2\pi(f_x\tau_x + f_y\tau_y)} \cdot d\tau_x d\tau_y \quad (15)$$

いま図-1 の左右の原点が正しく対応するとすれば式(2)の第2式は次のように書ける。

$$D_2(x, y) = D(ax + by, y) + b_2 + \nu(x, y) \quad (16)$$

このとき共分散の期待値 $E(C_e(x, y, \tau_x, L))$ は、式(2)の第1式と式(16)を式(1)に代入し、 $x = 0, y = 0$ で評価して得られる。

$$E(C_e(0, 0, \tau_x, L)) = \frac{1}{L^2} \iint_{-L/2}^{L/2} E(D(\xi, \zeta) \cdot D(a\xi + a\tau_x + b\zeta, \zeta)) d\xi d\zeta \quad (17)$$

$$- \frac{1}{L^4} \iiint_{-L/2}^{L/2} E(D(\xi_1, \zeta_1) D(a\xi_2 + a\tau_x + b\zeta_2, \zeta_2)) d\xi_1 d\xi_2 d\zeta_1 d\zeta_2$$

式(17)は a, b, τ_x, L の関数であるから、更めて $E_c(a, b, \tau_x, L)$ と書くことにする。これを式(12)に従って展開して r_{mn} の直交性を使えば、

$$E_c(a, b, \tau_x, L) = \frac{1}{L^2} \iint_{-L/2}^{L/2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E(|r_{mn}|^2) \exp(j2\pi m f_0((a-1)\xi + a\tau_x + b\zeta)) d\xi d\zeta \quad (18)$$

$$- \frac{1}{L^4} \iiint_{-L/2}^{L/2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E(|r_{mn}|^2) \cdot \exp(j2\pi f_0(m(a\xi_1 - \xi_2) + mb\zeta_2 + n(\zeta_2 - \zeta_1))) d\xi_1 d\xi_2 d\zeta_1 d\zeta_2$$

積分と総和の順序を交換して極限操作を行えば、

$$\left. \begin{aligned} E_c(a, b, \tau_x, L) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} S(f_x, f_y) \cdot Q(a, b, L, f_x, f_y) e^{j2\pi f_x a \tau_x} df_x df_y \\ Q(a, b, L, f_x, f_y) &= \text{sinc}(2\pi(a-1)f_x \frac{L}{2}) \cdot \text{sinc}(2\pi b f_x \frac{L}{2}) - \text{sinc}(2\pi a f_x \frac{L}{2}) \\ &\cdot \text{sinc}(2\pi f_x \frac{L}{2}) \text{sinc}(2\pi(b f_x + f_y) \frac{L}{2}) \cdot \text{sinc}(2\pi f_y \frac{L}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここで $\text{sinc } x = \sin x / x$ である。

とくに平坦地形の場合 ($a = 1, b = 0$) を考えると、

$$Q(1, 0, L, f_x, f_y) = 1 - \text{sinc}^2(2\pi f_x \frac{L}{2}) \text{sinc}^2(2\pi f_y \frac{L}{2}) \quad (20)$$

はよく知られたハイパスフィルタであって、概ね $1/(2L)$ 以下の周波数をろ波する。したがって L が小さいと、 $E_c(1, 0, \tau_x, L)$ は鋭い峰を持った関数になりマッチングは鋭敏になる。しかし、一方共分散の分数は大きくなって、マッチングは不安定になることが予想される。濃度値が正規分布すると仮定すれば、これは定量的に証明できる⁶⁾。

平坦でない地形については、フィルタ Q の挙動は複雑になるが、式(19)における Q の第2項は a, b に関しあまり変化しないので第1項のみを考えればよい。 sinc 関数のフーリエ変換は図-4に示す箱型関数である。すなわち、

図-4 箱型関数

$$P_l(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(2\pi l \tau f) e^{j2\pi \tau f} df \quad (21)$$

Q の第 1 項の $E_c(a, b, \tau_x, L)$ に対する寄与を考えると、

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(2\pi(a-1)f_x \frac{L}{2}\right) \text{sinc}\left(2\pi b f_x \frac{L}{2}\right)$$

$$\cdot S(f_x, f_y) e^{j2\pi \tau_x f_x} df_x df_y$$

$$= P_{|a-1|L/2}(\tau_x) \circledast P_{|b|L/2}(\tau_x) \circledast R(\tau_x, 0)$$

(22)

となる。 $\circledast$ はたたみ込み積分を表わす。これは、自己相関々数に長さ $|a-1|L/2$ および $|b|L/2$ の移動平均を 2 重に施したのと同じであり、地形勾配が大きくなると共分散の期待値は頂点の低いなどかな関数となって、正しい対応点を探索できなくなる。

フィルタ Q の形状を $f_y=0, b=0$ について図-5 に示した。 a の値が 1 から離れるにつれて、第 1 項によるスペクトル歪の効果が大きくなり、 $a=0$ または $a=2$ に近づくとう有効な周波数成分がなくなり、投影歪の許容限界になる。なお $a=0$ なら $Q=0$ であり、 x -方向の地形勾配のため画像が不連続になる限界値である。したがって、図-3 を参照すれば、起こりうる最大地形勾配を 45° とすれば、図-3 より、写真上 $r \geq 100\text{mm}$ では投影歪が急激に大きくなり、許容の限界を越える恐れがあり、使用しないのが望ましいと云える。

投影歪による相関の低下は無視することはできないが、相関の計算の最初には地形情報は何も与えられな

図-5 フィルタ $Q(a, b, L, f_x, f_y)$ のプロフィール

いから平坦地形を仮定せざるを得ない。したがって 1 回の相関で良い結果を得ることは期待できないので、徐々に投影歪を修正するくり返し相関が必要になる。スペクトル歪は投影歪の増加で急速に増加するから、最初の相関では画素の粗い画像を使い、低周波のみを利用するのが効率的である。式(19)で相関窓の大きさと周波数は相乗の関係にあるから、フィルタ Q の効果を同じに抑えるためにはくり返しの過程で相関窓を常に同じ画素数にとり、画素をしないで小さくすればよい。

5. 実験例

実体空中写真の分解画像から自己相関々数を推定し、投影歪の共分散への影響を実験的に確認した。

実験に用いた空中写真画像は、RMK 15/23 で撮影した縮尺 1:25,000 の実体対を $50\mu\text{m}$ (地上 1.2m) 間隔で分解し、さらに epipolar 線に沿って再サンプリングした偏位修正画像である。写真上の基線長は $B_p = 87\text{mm}$ であった。図-6 に実験領域の画像を示すが、

図-6 実験領域の左写真

データの詳細については、文献 1) を参照されたい。
実験領域は 150 m × 150 m の大きさで x 方向に 12° ($a = 0.88$), y 方向に 17° ($b = 0.18$) はぼ一様に傾斜している。この節では図-1 のように座標は左右画像に共通の xy 座標系とし、かつ整数値のみをとるとする。

まず左画像からパワースペクトルを推定すると図-7 を得た。スペクトルは画像の自己相関々数のフーリエ変換から得られ、データの有限性による打ち切り効果を柔げるためハミングの窓⁷⁾で処理した。

次に、式(1)に相当する標本相互共分散は、離散座標系では、

$$C_{12}(x, y, \tau_x, L) = \frac{1}{L^2} \sum_{\xi=-[L/2]}^{[L/2]} \sum_{\zeta=-[L/2]}^{[L/2]} (D_1(x+\xi, y+\zeta) - \tilde{D}_1(x, y)) \cdot (D_2(x+\xi+\tau_x, y+\zeta) - \tilde{D}_2(x+\tau_x, y)) \quad (23)$$

$$\tilde{D}_k(x, y) = \frac{1}{L^2} \sum_{\xi=-[L/2]}^{[L/2]} \sum_{\zeta=-[L/2]}^{[L/2]} D_k(x+\xi, y+\zeta) \quad (k=1, 2)$$

である。 $[x]$ は x を越えない最大整数であり、 L は奇数とする。また標本自己共分散 $C_{11}(x, y, \tau_x, L)$ も同様に立義される。このとき次の4つの条件で、個数 $W \times W (= 11 \times 11)$ の点での標本相互ないし自己共分散の平均値を計算すると、図-8 のようになった。

(1) (CURVE 1) 標本自己共分散の平均値を

図-7 パワースペクトルとフィルタ $Q(a, b, L, f_x, f_y)$

図-8 各条件下での標本自己、相互共分散の平均値

$$\bar{C}_{11}(\tau_x, L) = \frac{1}{W^2} \sum_{x=-[W/2]}^{[W/2]} \sum_{y=-[W/2]}^{[W/2]} C_{11}(x, y, \tau_x, L) \quad (24)$$

で計算した。図では全分散を 1 に正規化して示した。 ± 1 画素までは強い自己相関が認められる。

(2) (CURVE 2) 各相関窓の位置において、相関窓の中心画素と探索窓の中心画素が対応するように右画像の x 座標を平行移動して $C_{12}(x, y, \tau_x, L)$ の平均を求めた。

$$\bar{C}_{12}(\tau_x, L) = \frac{1}{W^2} \sum_{x=-[W/2]}^{[W/2]} \sum_{y=-[W/2]}^{[W/2]} C_{12}(x, y, \tau_x, L) \quad (25)$$

これは式(19)で $a = 0.88$, $b = 0.18$ とおいたものに相当する。

(3) (CURVE 3) 右画像から投影歪を除去するよう再サンプリングした画像で $\bar{C}_{12}(\tau_x, L)$ を計算した。これは、式(19)で $a = 1$, $b = 0$ とおいた場合に相当する。画像雑音 $\nu(x, y)$ が存在しなければ CURVE 1 と CURVE 2 は一致するはずである。画像雑音はこの例では相当大きく、投影歪よりも大きな相関低下の原因になっていることがわかる。

(4) (CURVE 4, CURVE 5) 高周波部分を除去した画像上で、CURVE 2 と同じ方法から求めた $\bar{C}_{12}(\tau_x, L)$ である。CURVE 4 では $f_x = 15$ 以上、CURVE 5 では $f_x = 10$ 以上の周波数成分をろ波した画像を用いている。そのため、CURVE 4 では $Q(a, b, L, f_x, f_y)$ の第 2 項が働かないため CURVE 2 よりも大きな共分散の値をとる。一方 CURVE 5 は有用な周波数成分まで除去

したため共分散の値は小さい。

6. 結 論

この論文では、実体画像の相関における投影歪の影響を定量的に評価しさらに実験的にこれを裏づけた。

主な結果を述べると、

(1) 相関窓の大きさ、地形勾配、画像のスペクトル分布と標本相互共分散の関係は式(9)で与えられる。

(2) 地形の最大勾配を 45° とすると、広角カメラでは、フィルム周辺部で投影歪が許容値を越える恐れがある。

(3) 相関窓はその大きさの半分以下の波長のスペクトルをろ波するハイパスフィルタとして働く。

(4) 地形勾配による投影歪は、高周波域のスペクトルを歪ませ相関を低下させる。スペクトルの歪は投影歪の増加とともに急激に増加するので、山地については1回の相関ではよい結果は期待できず、くり返し相関が必要である。この際最初は粗い画素を使って低周波数のみを利用し、相関窓を常に同じ画素数になるよ

うとりながら画素を少しずつ小さくするのが合理的である。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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, 1982, pp. 4-14
- 3) 森 忠次, 服部 進, 内田 修: 地形勾配の影響による画像相関の低下の予測, 昭和57年度日本写真測量学会年次学術講演会, pp. 159-162
- 4) Panton, D. J.: A Flexible Approach to Digital Stereo mapping, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 44, No. 12, 1978, pp. 1499-1512
- 5) Papoulis, A., Probability, Random Variables and Stochastic Processes, Kogakusha, 1965, pp. 453-473
- 6) 森 忠次, 服部 進, 内田 修: 画像相関での相関パッチと相関関数の関係, 昭和56年度日本写真測量学会秋期学術講演, pp. 159-162
- 7) 日野幹雄, スペクトル解析, 朝倉書店, 1977, pp. 167-168