

閉曲線のマッチングによる画像のレジストレーション

石井直宏・服部徳秀*

電気情報工学科, 名古屋工業大学

(1985年9月7日受理)

Image Registration by Matching of Closed Loops

Naohiro ISHII, Norihide HATTORI

Electrical and Computer Engineering, Nagoya Inst. of Technology

(Received September 7, 1985)

We applied a symbolic registration method to the matching problem of aerial photographs, which are taken at every monthes interval. The aerial photographs change the value of the gray-scale level at the time of photographing. Then the well known correlation method does not work well to the matching problem. In order to attack the problems of the translation, rotation and scaling of images with varying density of the level, we used a symbolic registration method. The closed curves which are edges of the building, or structures are regarded as the symbols. Then they are represented by Fourier descriptor. By applying the symbolic registration method, it was clarified that two images are matched well.

要 旨

期間をにおいて撮影した航空写真の重ね合わせの問題に対してシンボリック・レジストレーションを行った。従来, このような問題に相関関数を用いた方法があるが, このレジストレーションでは画像の濃度の変化に対処できない。また, 平行移動・回転・拡大などの画像のずれが同時に発生すると計算時間が膨大になるのに対し, シンボリック・レジストレーションではこれらの欠点に対して有利である。建築物など時間的な変化の少ない物体のエッジは閉曲線を作ることを利用し, 本論文で提案するシンボリック・レジストレーションは, 画像のエッジによって作られる閉曲線をシンボルとした。ただし, 影は時間的な変化が大きいので除外する必要がある。シンボルの対応関係は平行移動・回転・拡大を最適にするフーリエ記述子による閉曲線のマッチングを用いて行う。なお, レジストレーションされる画像はアフィン変換によって一致すると仮定する。閉曲線が回転について対称性を持っている場合, フーリエ記述子によるマッチングは, 多数の解が得られるが, 画像の全体的なマッチングから, 最適な解を選び出す必要がある。本研究では, 航空写真のレジストレーションという問題に対し, 上述の手法が有効であることを示した。

1. まえがき

本研究は, 同一の地域を, 期間をにおいて撮影した複数枚の航空写真に対してレジストレーションを行い, 各画像の画素の間に対応を付けることを目的とする。レジストレーションは, 地表の時間的変化の検出のための基礎的段階として必要である。

航空写真は, 撮影時の天候・高度・位置・飛行方向・時間によってかなり影響を受けるので, 平行移動・拡大・回転など幾何学的変化や, 明るさなどの濃度変化, 更に, 太陽による影の方向の変化など外的要因によって各写真は大きく変化している。また, 季節による植物の変化や建築物の変化などもある。このため, 従来から広く行われてきた濃度の相関によるレジストレーションでは限界がある。そこで画像より時間的になるべく不変なシンボルを抽出し, そのシンボル間に対応を付けて行うシンボリック・レジストレーション⁽¹⁾を行う必要がある。本論文では比較的に時間的な変化の少ない建築物の境界ではエッジが閉曲線をつくることから, シンボルは画像のエッジによる閉曲線とした。影によるエッジの閉曲線は時間的な変化が大きいのでシンボルにできない。シンボルとなるエッジの閉曲線を抽出するために, 本論文ではノイズの影響の少ない手法を展開し, 画像のエッジを抽出した。更に, シンボル間の対応付けはフーリエ記述子を用いて

平行移動・拡大・回転に対し、変換の要素を最適とするマッチングを行い、航空写真のレジストレーションに十分適用できる実験結果を得た。

2. エッジによる閉曲線の抽出

航空写真では季節の変化によって地表と状態は大きく変化するが、境界の変化は比較的少ない。特に、建築物などは時間的変化が少なく、しかも、その境界は閉曲線となる。そこで、撮影条件の異なる二枚の画像をレジストレーションする手掛かりとして、画像のエッジ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によって作られる閉曲線を用いる。ただし、影の境界に相当する閉曲線は時間的変化が大きいので、これを除去する必要がある。

(a) エッジの強さ・方向の検出

各画素におけるエッジの強さ・方向を検出する。まずステップ・エッジが存在すると仮定する。図1に示すような4種類の方向のエッジ検出の領域を考える。エッジの強さ・方向を求める位置の近傍の5×5の画素をaとbの二つの領域に分割し、各領域での分散の和が最小の角度をエッジの方向とする。エッジの強さはaとbの領域の濃度の平均値の差の絶対値とする。

(b) エッジの強さ・方向に基づく細線化

(a)で計算したエッジの強さ・方向を用いてエッジの存在を示す二値画像を作成する。エッジの強さを山の高さと考えて、その尾根線を残すように細線化する。実際には、与えた閾値より小さいエッジの強さを持つ画素にはエッジは存在していないと判断して0を与える。閾値以上の強さを持っている画素にはエッジがあると判断するが、細線化として、そのエッジの方向に垂直な位置にある二つの8近傍の画素のうち少なくとも一方がより強く、かつ、同じ方向のエッジを持てば0を与える。それ以外の場合は、細線化されたエッジとして1を与える。この細線化は一定の閾値より低いエッジの強さを持った画素は一様にエッジでないと判断するという欠点を持っている。更に、ノイズに弱く、エッジが途中で跡切れたり、余分なヒゲを多く生じるという欠点も持っている。前者の欠点を補うために(d)の補正を、後者の欠点については(e)の補正を行う必要がある。(c)端点、中継点、分

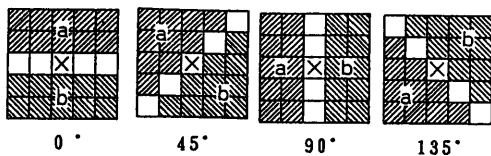


図1 エッジの強さ・方向の検出の領域
Fig.1-Regions for detection of edge

岐点の抽出

3×3の画素を用いて、エッジの画素が端点、中継点、分岐点のいずれであるかを決定できるように細線化する。この細線化によってエッジの端点が決定できるので、以下の(d)・(e)のエッジの補正に利用できる。パターンと比較して一致すれば中心の画素を削除する。細線化に用いるパターンは中心のエッジの画素を削除しても連結性を保存し、かつ、穴を作らないものを用いる。細線化は三段階に分けて、各段階ごとに可能な限り不適当なパターンがなくなるまでエッジの画素の削除を行う。各段階に示してあるパターンは例であって、回転・反転したパターンでも良い。また、図下に示してある分類記号は付録で説明する。ただし、回転は90°単位については全てのパターンで可能であるが、45°単位については分類記号の最後にaまたはbの記号がついているものは不可能とする。以下に三つの段階について説明する。

<1> 中心の画素を削除しても凹みを作らないので、

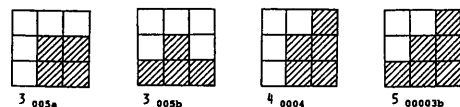


図2 <1>の細線化のパターン
Fig.2-Patterns of thinning <1>

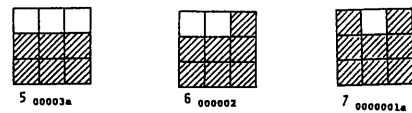


図3 <2>の細線化のパターン
Fig.3-Patterns of thinning <2>

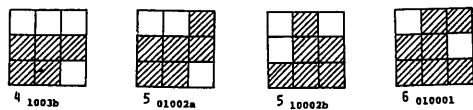


図4 <3>の細線化のパターン
Fig.4-Patterns of thinning <3>



図5 孤立点
Fig.5-Isolated point

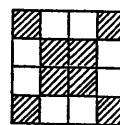


図6 細線化が不可能な例
Fig.6-An Exsample not to be thinned

削除するのに最も適したパターンであり、4 連結性を保存する。このパターンは図 2 に示す 4 種類である。

<2> 中心の画素を除去すると凹みを持つが、4 連結性を保存する。このパターンは図 3 に示す 3 種類である。

<3> 中心の画素を除去すると、4 連結性は保存しないが、8 連結性を保存する。このパターンは図 4 に示す 4 種類である。

以上の細線化とは別に、図 5 に示す孤立点も除去する。

この細線化によって付録で定義する不適当な 3×3 の画素のエッジ・パターンが残らなければ、全てのエッジの画素が 3 章で定義する端点・中継点・分岐点のいずれであるかが決定される。

この細線化で、図 6 に示すような不適当な 3×3 のエッジ・パターンが残ることもある。図 6 は四つの枝を持った分岐点が画素の境界にあるパターンである。他に不適当なパターンが残った場合も分岐点である。本論文の以降のエッジに関する処理は端点に対して行うから、不適当なパターンが残っても影響ない。

(d) エッジの強さ・方向に基づく補正

(c)で端点となるエッジの画素が決定されているので、そこからエッジを延長する。延長の方法を以下に述べる。

[1] 端点にポイントを設定する。

[2] ポインタの示している画素のエッジの方向に対して $+45^\circ \cdot 0^\circ \cdot -45^\circ$ の角度の位置にある三つの 8 近傍の画素を次に進む候補とする。

[3] 三つの候補の中から、エッジの強さが最大の画素を選ぶ。候補の中から選択された画素にポイントを定め、その画素をエッジとして [1] に戻って更に延長を進める。ただし、その強さが与えた閾値 ((b) のエッジの細線化での値より小さい値) より小さければ、エッジが消滅したと判断してポイントの示す画素で延長を中止する。また、選ばれた候補の画素のエッジの方向が、ポイントの示す画素からその画素への方向に対して垂直であればエッジの接続が悪いと判断して、延長を中止する。

(e) 端点、中継点の抽出のための補正

本研究で用いたエッジ検出は 5×5 画素の領域を用いているために、エッジが鋭い角度で曲がっていたり、T 字型や十字型に交差しているとそこで跡切れてしまう。またノイズの影響でもエッジが跡切れる。これらを補正す

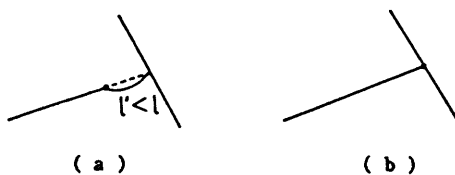


図 7 T 型のエッジの補正

Fig.7-Compensation of T-pattern

るために、エッジの強さ・方向に基づかずに端点から延長を行い、近接した他の端点や中継点とつなげる。ただし、延長可能な距離は閾値によって制限する。

補正は以下に示す三つのパターンに分けて考える。ただし、端点におけるエッジの方向 θ は端点から 5 個の画素を最小二乗法で直線近似して決定する。

<1> T 型 図 7 (a) のように、端点を、その方向に延長すると、他のエッジと交差する場合の補正を T 型とする。端点から直線で延長した場合に、延長される距離 l' は閾値 l 以下で、初めに交差するエッジの画素を候補とする。図 7 (a) エッジは補正によって、図 7 (b) のようになる。

<2> I 型 図 8 (a) のように、二つの端点が近接している、ほぼ一直線上に存在する場合の補正を I 型とする。図 8 (a) に示した θ_1 と θ_2 において、 $\theta_1 + \theta_2 \leq$ 閾値であることと、端点間の距離 l' が与えられる閾値 l 以下であることを条件とする。一つの端点に対して、二つ以上の端点が延長する相手の候補と考えられる場合は、近い距離にあり、しかも直線に近い位置関係にある相手を選択する。このために、図 8 (b) に示すように二つの端点を直線で延長してできる交点と二つの端点によって生じる三角形の面積を用いる。二つの端点のなす角が同じならば、端点が接近するほど三角形の面積は小さくなる。また、二つの端点間の距離が同じならば、二つのエッジが直線的なほど三角形の面積は小さくなる。従って、三角形の面積が最小の端点を候補とする。ただし、選択された端点との三角形の面積は閾値 l 以下であることも条件にする。図 8 (a) は図 8 (c) のように候補の端点との間を直線で結び、補正する。

<3> V 型 図 9 (a) のように、二つの端点が近接して

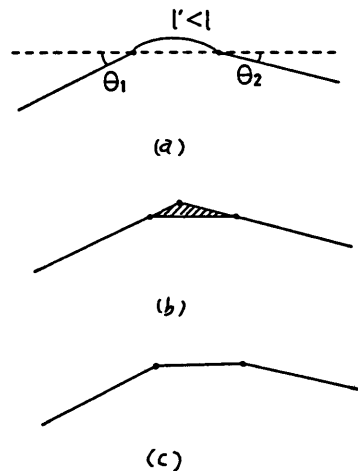


図 8 I 型のエッジの補正

Fig.8-Compensation of I-pattern

いて、二つの端点を直線で延長すると交点を生じる場合の補正をV型とする。但し、二つの端点間の距離 l' は与えた閾値 l 以下で、二つの端点の方向のなす角 θ' は閾値 θ 以上であることを条件とする。更に、交点は図9(b)に示すように端点の外側に存在し、端点と交点との距離 l'' は各々閾値 l 以下とする。従って、図9(b)の斜線部に交点は存在する必要がある。一つの端点に対して二つ以上の端点が延長の候補と考えられる場合は、近い位置にあり、しかも、鋭角過ぎない相手を選択する。このために、二つの端点の midpoint と交点との間の距離 m を用いる。二つの端点のなす角が同じならば、端点間の距離が短いほど m は小さくなる。また、端点間の距離が同じならば、なす角が大きくなるほど m は小さくなる。 m が最小の端点を候補とする。図9(a)は図9(c)のように、二つの端点と交点をつないでV字型のエッジを作り、補正する。

一つの端点について上記三つのパターンの中で複数のパターンが可能な場合がある。その場合には、端点と候補の画素との距離が最小のパターンを選択し補正を行う。ただし、I型とV型で同じ端点が候補になっている場合はV型で補正する。

(f) エッジによる閉曲線の抽出

エッジによって作られる閉曲線を抽出する。ただし、影を囲むエッジの閉曲線は時間的変化が大きいため除外する。また、面積の小さい領域を囲む閉曲線はノイズによって生じた可能性が大きいため、これも除外する。閉曲線の抽出方法を以下に説明する。

[1] 枝(端点からそれに接続する分岐点まで、または、それに接続する他の端点まで)を除外する。方法は全ての端点からエッジを辿り、最初に出合った分岐点までの画

素をエッジから除去する。これを全ての端点について行う。この処理によってエッジは中継点と分岐点のみで構成されることになる。ここで、 3×3 の画素の不適當なパターンは分岐点とみなす。

[2] [1]でのエッジによって画像は幾つかの領域に分割される。その領域の面積・重心・原画像での濃度の平均値を計算する。濃度の平均値が与えた閾値より小さい場合は、この領域は影であると判断する。また、面積が与えた閾値より小さい場合は、この領域はノイズによって生じたと判断する。これら以外の場合はレジストレーションにとって意味のある領域を囲むエッジとしてレジストレーションのシンボルとする。更に、影の領域は比較的細長いことを利用して、領域の周囲長の二乗をその面積で割った値が与えた閾より大きければ、抽出しないとしても良い。

3. フーリエ記述子を用いた閉曲線のマッチング

本章では、閉曲線の形を記述するフーリエ記述子について説明する。フーリエ記述子には、G. H. Granlund によるもの⁽⁵⁾、C. T. Zahn と R. Z. Roskies によるもの⁽⁶⁾、上坂によるもの⁽⁷⁾が知られているが、本論文では G. H. Granlund によるフーリエ記述子を用いた。平行移動・拡大・回転のフーリエ記述子への影響と、このことを応用した二つの形のマッチング⁽⁷⁾について説明する。

閉曲線が x - y 平面にあるとし、 x 座標を実数軸、 y 座標を虚数軸と考える。閉曲線を閉曲線に沿った始点からの長さ l によって表現すると次式となる。

$$u(l) = x(l) + jy(l) \quad (0 \leq l < L) \quad (1)$$

ここで、 L は閉曲線の周囲である。閉曲線は l を任意の実数に拡張して考えると、閉曲線 $u(l)$ は周期 L の周期関数と考えられる。従って、閉曲線 $u(l)$ をフーリエ級数に展開できる。

$$u(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n j^{(2\pi/L)nl} \quad (2)$$

ここで、フーリエ係数は、

$$a_n = \frac{1}{L} \int_0^L \{ x(l) + jy(l) \} \cdot e^{-j(2\pi/L)nl} dl \quad (3)$$

(3)式のフーリエ係数はフーリエ記述子と呼ばれる。

4 近傍の位置に隣接する画素との距離は $\sqrt{2}$ であることから、始点からの距離 l は等間隔でない離散的な値を持つことになる。従って、離散的なフーリエ級数展開を行うことができない。そこで、画素の間を直線で補間し、(3)式の計算を行い、フーリエ記述子を計算する。

図10に閉曲線の例を、図11に10次までのフーリエ記述

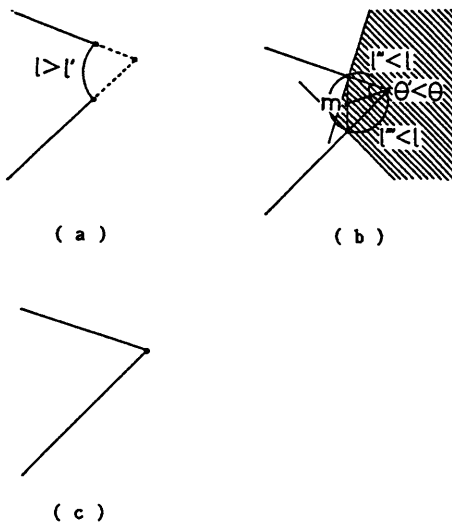


図9 V型のエッジの補正

Fig.9-Compensation of V-pattern

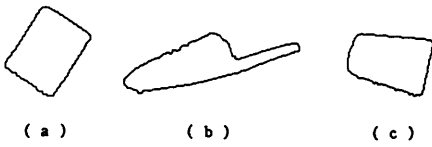


図10 閉曲線の例

Fig.10-Examples of closed loop

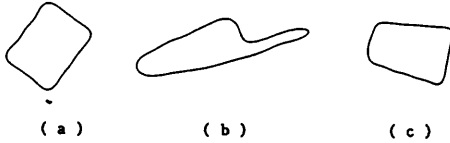


図11 図10の閉曲線の再構成(10次)

Fig.11-Reconstructed closed loop of fig. 10

子は、図10の閉曲線の形について、十分な情報を持っていることがわかる。

閉曲線に対して、x 方向に p, y 方向に q だけ平行移動し、拡大率 s の原点を中心とした拡大をし、原点を中心とした回転角 ϕ の回転をし、始点を $\alpha L / 2 \pi (0 \leq \alpha < L)$ だけ移動すると、フーリエ記述子は次式となる。

$$\begin{aligned} se^{i\phi} a_0 + p + jq & \quad (n=0) \\ se^{i(n\alpha + \phi)} a_n & \quad (n \neq 0) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、平行移動による影響は 0 次の成分のみに影響を与えることと 0 次成分は閉曲線の重心であることに注意する必要がある。

フーリエ記述子を用いた閉曲線のマッチングについて考える。モデルの閉曲線 α (周囲長: $L\alpha$)

$$U\alpha(tL\alpha) = x\alpha(tL\alpha) + jy\alpha(tL\alpha) \quad (0 \leq t < 1) \quad (5)$$

と未知の閉曲線 β (周囲長: $L\beta$)

$$U\beta(tL\beta) = x\beta(tL\beta) + jy\beta(tL\beta) \quad (0 \leq t < 1) \quad (6)$$

を考える。 β を α に対して最適な平行移動・拡大・回転・始点の位置を行い、マッチングの誤差を最小化し、その誤差が小さければ、 α と β は同一であると判断する。マッチングの誤差は次式のようにフーリエ記述子の各次の誤差の二乗和を正規化したものとする。

$$E^2 = \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M |a_n - se^{i(n\alpha + \phi)} b_n|^2 / \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M |a_n|^2 \quad (7)$$

ここで、 a_n は α のフーリエ記述子、 b_n は β のフーリエ記述子とし、 β に平行移動・拡大・回転・始点の移動を行っている。また、平行移動は 0 次の項のみに影響を与えるから(7)式では 0 次の項は除いている。従って、(7)式を用いれば、平行移動に関して最適化する必要がない。ま

た、(7)式では M 次までのフーリエ記述子を用いている。これは、高次の項はサンプリングやノイズの影響を大きく受けていることと、計算時間の短縮のために行う。更に、(7)式の分母は未知の閉曲線 β に無関係であるので、分子についてのみ最小化すれば良い。(7)式の分子を以降の計算のために展開する。

$$\begin{aligned} d^2 = & \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M a_n a_n^* + s^2 \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M b_n b_n^* \\ & - 2s \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \cos(L_n + n\alpha + \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで $a_n^* b_n = \ell_n e^{iL_n}$ (ℓ_n, L_n は実数)とする。(8)式の d^2 を $s \cdot \alpha \cdot \phi$ について最小化すればよい。ただし、平行移動による影響はないので、平行移動について最適化されていると考えて良い。最小二乗法を用いると、次式を解くことになる。

$$S = \frac{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \cos(L_n + n\alpha + \phi)}{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M b_n b_n^*} \quad (9)$$

$$\tan \phi = - \frac{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \sin(L_n + n\alpha)}{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \cos(L_n + n\alpha)} \quad (10)$$

$$\tan \phi = - \frac{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n n \sin(L_n + n\alpha)}{\sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n n \cos(L_n + n\alpha)} \quad (11)$$

(10)式と(11)式より、

$$\begin{aligned} & \left\{ \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \sin(L_n + n\alpha) \right\} \left\{ \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n n \cos(L_n + n\alpha) \right\} \\ & - \left\{ \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n n \cos(L_n + n\alpha) \right\} \left\{ \sum_{\substack{n=-M \\ n \neq 0}}^M \ell_n \sin(L_n + n\alpha) \right\} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

(12)式を満たす始点の位置 α を数値解析で求めれば良い。ただし、極値を条件にしているので、 α は複数個求まる。これらの α を(10)式または(11)式に代入して回転角 ϕ を計算する。一つの α に対して回転角は ϕ と $\phi + \pi$ の二種類の可能性があるが、 $S > 0$ という条件により、一方に定まる。

以上のようにして複数個の E^2, S, α, ϕ の組み合わせが求められるが、これらは極値を条件に求められているた

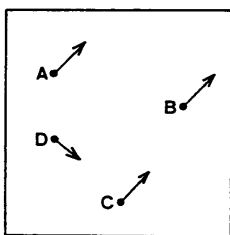


図12 局所的にずれが異なる例

Fig.12-An example of locally different transformation

めに必ずしも最小の誤差とはいえない。従って、誤差 E^2 の値でこれらを選択する必要がある。また、閉曲線にノイズが含まれていたり、閉曲線の形が回転について対称性を持っていることがあるので、誤差 E^2 が最小のものだけでは不十分である。

本論文で用いる閉曲線のマッチングは、平行移動・回転・拡大・始点の位置を最適化したものと、拡大率・回転角を固定して、平行移動・始点の位置のみを最適化したものを用いる。

4. シンボリック・レジストレーション

2章で抽出されたエッジの閉曲線をシンボルとして、異なる時間に撮影された二枚の画像の間で位置的な対応を付ける。3章で説明したフーリエ記述子によるマッチングによって、シンボルである閉曲線の間で対応を付ける。ここで大事なことは、対応の付いた各閉曲線間のずれ(平行移動・拡大・回転)は画像全体のずれと関係があり、局所的に大きく異なっていることはないことである。例えば、図12で点A・B・C・Dにおける平行移動が矢印で示されるように計算されたとすると、Dにおける平行移動は誤っていると判断すべきである。このようなことは拡大・回転についても同様である。

本研究では画像全体のずれはアフィン変換で可能なものに限定する。3章で説明したフーリエ記述子によるマッチングでは極値を基にするために誤ったずれを算出することが多い。更に、撮影条件によって対応の付かない閉曲線が多く抽出されることがあるので、画像全体のマッチングも重視する必要がある。実際には、画像全体のマッチングと各閉曲線間のマッチングをお互いに修正しながら、最大数の閉曲線が対応するまでマッチングを行う。初期値として、平行移動・回転・拡大を任意とする閉曲線のマッチングによって形が非常に似ている閉曲線の組み合わせいくつかを選んで、画像全体のマッチングであるアフィン変換の係数を決定する。この初期値の決定は一つの閉曲線の組み合わせを用いる方法と二つの閉曲

線の組み合わせを用いる方法を行った。更に、三つ以上の閉曲線を用いる方法も考えられる。レジストレーションの概念的なフローチャートを図13に示す。

レジストレーションを行う二つの画像の座標は(13)式のアフィン変換によって対応付けられると仮定する。ただし、本研究では、垂直方向から撮影した画像を対象にするために、せん断の少ないアフィン変換を仮定する。この仮定は4章で説明した閉曲線のマッチングからも必要である。

$$\begin{cases} u=ax+by+c \\ v=dx+ey+f \end{cases} \quad (13)$$

$$(ae-bd \neq 0)$$

ここで、(u, v)をレジストレーションのモデルとなる画像の座標とし、(x, y)をレジストレーションされる画像の座標とする。

3章で説明したフーリエ記述子による閉曲線のマッチングを利用するために、アフィン変換による閉曲線の拡大率と回転角を計算しなくてはならない。せん断が少ないアフィン変換を仮定しているから、方向の依存が少ない拡大・回転を受ける。閉曲線の拡大率と回転角を以下のようにして計算する。

(a) 拡大率 S

$$S = |ae - bd| \quad (14)$$

(b) 回転角 ϕ

アフィン変換により、x-y座標上で0(rad)の方向のベクトル(1, 0)と $\pi/2$ (rad)の方向のベクトル(0, 1)はu-v座標上でそれぞれ(a, d)と(b, e)に変換される。(a, d)の方向を θ_1 とし(b, e)の方向を θ_2 とすると、回転角 ϕ はこれらの回転の平均として、次式とする。

$$\phi = \frac{\theta_1 + (\theta_2 - \pi/2)}{2} \quad (15)$$

(a) 一つの閉曲線の組み合わせを基にする。

レジストレーション

画像全体のアフィン変換の初期値を一つの閉曲線の組み合わせを基にして決定するレジストレーションの手法について以下に説明する。

[1] 初期値を決める閉曲線の組み合わせ(核)の選出

10次までのフーリエ記述子を用いた閉曲線の拡大・回転・始点の移動が任意のマッチングを二つの画像に含まれる全ての閉曲線の間で行う。このマッチングは平行移動に関しても最適化されていることに注意する必要がある。このマッチングによって閉曲線の平行移動・拡大率・回転角は決定される。高速化のために、閉曲線によって囲まれる領域の面積の比率が与えた範囲内ない場合は閉曲線は対応していないと判断してマッチングを行わない。全ての閉曲線の間でマッチングを考えた後で、マッ

チングの誤差が小さい閉曲線の組合わせを幾つか(例えば、30個)選択して、アフィン変換の初期値を決定するのに用いる。同じ閉曲線の組合わせが多く含まれていることに注意する必要がある。

(2)核を基にしたマッチング

以下の〔2. 1〕～〔2. 5〕を〔1〕で選択された全ての核について、最大数の閉曲線に対応させるように行う。

〔2. 1〕アフィン変換の初期値の計算

〔1〕で選択された一つの核である閉曲線の組合わせよりアフィン変換の初期値を決定する。核である閉曲線のマッチングによって拡大率 S ・回転角 ϕ が計算されているので、これを画像全体に適用する。また、核の閉曲線で囲まれる部分の重心が一致するように平行移動を行う。即ち、レジストレーションされる x - y 座標の閉曲線の重心を (x, y) とし、レジストレーションのモデルとなる u - v 座標の閉曲線の重心を (u, v) とすると、アフィン変換の係数は(16)式となる。

$$\begin{cases} a = S\cos\phi \\ b = -S\sin\phi \\ c = u - Sx\cos\phi + Sysin\phi \\ d = S\sin\phi \\ e = S\cos\phi \\ f = v - Sx\sin\phi - Sycos\phi \end{cases} \quad (16)$$

〔2. 2〕対応する閉曲線の組合わせの候補の選択

〔2. 1〕・〔2. 4〕・〔2. 5〕で決定されたアフィン変換によって、レジストレーションされる画像の全ての閉曲線で囲まれる部分の重心をモデルの画像上に変換する。変換された重心から与えられたある距離以内に重心があり、かつ、閉曲線に囲まれる領域の面積の比率がある範囲内にあるモデルの閉曲線を選択する。ここで、ある距離とは変換された閉曲線の重心と核の閉曲線の重心との距離に与えられた閾値を掛けたものである。選択されたモデルの閉曲線と変換されたレジストレーションされる閉曲線の間で、拡大率 S ・回転角 ϕ を固定した10次までのフーリエ記述子を用いたマッチングを行う。ここでは、始点の移動が任意で、平行移動についてはモデルの閉曲線を選択する際に重心間の距離を制限しているので任意とする。このマッチングでは現在のアフィン変換の係数より、(14)式と(15)式を用いて拡大率 S と回転角 ϕ を計算した結果を用いる。このマッチングの誤差が与えられた閾値以下の場合には閉曲線の組合わせは正しいと判断する。全ての閉曲線についてマッチングを考えたら、以下の条件によって分岐する。

(a) 正しいと判された閉曲線の組合わせが以前の異なる核から得られた最大の閉曲線に対応付けた最終的な組合わせと同一の場合、このアフィン変換によっても同一の結果が得られるので、次の核に処理を進める。((2)へ

進む)ここで、最終的な閉曲線の組合わせとは、〔2. 5〕で選択されて残った閉曲線の組合わせである。

(b) 正しいと判断された閉曲線の組合わせが現在の核で以前に得られた最大の閉曲線に対応付けた最終的な組合わせと同一か、または、対応の付けられた閉曲線の数が少なくなっている場合も、次の核について処理を進める。((2)へ進む)

(c) 正しいと判断された閉曲線の組合わせの個数が与えられた閾値より少ない場合は、この核は誤っていると判断して、次の核に処理を進める。((2)へ進む)ただし、この閾値は3以上であるべきである。

(d) (a)～(c)以外の場合、〔2. 3〕へ処理を進める。

〔2. 3〕アフィン変換の計算

〔2. 2〕・〔2. 4〕・〔2. 5〕で選択された対応する閉曲線の組合わせに対してその重心間の距離が小さくなるように、最小二乗法でアフィン変換の係数を決定する。対応する閉曲線の重心をレジストレーションされる画像では (x_i, y_i) 、モデルの画像では (u_i, v_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) とすると、アフィン変換の係数に次式を解くことによって決定される。

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum u_i x_i \\ \sum u_i y_i \\ \sum u_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum v_i x_i \\ \sum v_i y_i \\ \sum v_i \end{bmatrix}$$

〔2. 4〕重心間の距離による閉曲線の位置のマッチング

〔2. 3〕で決定されたアフィン変換を選択された閉曲線で囲まれる部分の重心に対して行う。画像全体のマッチングの誤差であるモデルの閉曲線の重心と変換された閉曲線の重心と変換された閉曲線の重心との距離が個々に与えられた閾値以内であり、かつ、その平均でも与えられた閾値以内であれば、〔2. 5〕へ進む。この条件が満たされない場合は閉曲線の選択が誤っていると判断して、重心間の距離が最大の閉曲線の組合わせを省いて〔2. 3〕へ戻る。ただし、閉曲線の組合わせの個数が与えた閾値以下となったり、核である閉曲線の組合わせ自身が省かれる場合はこの核は誤っていると判断して、次の核に処理を進める。((2)へ進む)

〔2. 5〕フーリエ記述子による閉曲線の形のマッチング

〔2. 4〕で重心が一致していると判断された閉曲線の組合わせに対して〔2. 3〕で決定されたアフィン変換の係数から(14)式と(15)式より拡大率 S と回転角 ϕ を計算し、拡大率 S と回転角 ϕ を固定した10次までのフーリエ記述子を用いたマッチングを行う。その誤差の全てが与えられた閾値以下であれば〔2. 2〕へ戻る。この閾値は〔2. 2〕のものより小さいものとする。この時の閉曲線の組合

わせを最終的なものと呼ぶ。閾値を越えた誤差を生じる閉曲線の組合わせが存在する場合、その中で最大の誤差を生じる閉曲線の組合わせを省いて〔2. 3〕へ戻る。ただし、閉曲線の組合わせの個数が与えた閾値以下となれば、この核は誤っていると判断して次の核に処理を進める。(〔2〕へ進む)

〔3〕最終結果の決定

〔2〕の処理で全ての核を基にして、閉曲線の組合わせを考えたが、〔2. 5〕での最終的な閉曲線の組合わせの個数が最大であるアフィン変換をレジストレーションの最終結果とする。

(b) 二つの閉曲線の組合わせを基にするレジストレーション

画像全体のアフィン変換の初期値を二つの閉曲線の組合わせを基にして決定するレジストレーションの手法について以下に説明する。ただし、アフィン変換の初期値を決定する部分のみ異なるのでそこだけを説明する。

〔1〕で選択された核の中から拡大率と回転角が近い二つの核を選ぶ。その条件は拡大率を S_1 と S_2 、回転角を ϕ_1 と ϕ_2 とすると、

$$S_1/S_2 < T_1 \quad \text{かつ} \quad S_2/S_1 < T_1$$

$$\text{Min}(\phi_1 - \phi_2 + 2\pi n_1, \phi_2 - \phi_1 + 2\pi n_2) < T_2$$

$$(\phi_1 > \phi_2 \quad \text{なら} \quad n_1 = 0, \quad n_2 = 1;$$

$$\phi_2 > \phi_1 \quad \text{なら} \quad n_1 = 1, \quad n_2 = 0)$$

となる。ここで、 $T_1 \cdot T_2$ は閾値である。条件を満たす全ての核の組合わせに対して、以下のように、アフィン変換の初期値の決定をする。

二つの核の組合わせを (L_{M1}, L_{R1}) と (L_{M2}, L_{R2}) とする。 L_{M1} はモデルとなる画像の閉曲線で、 L_{R1} はレジストレーションされる画像の閉曲線とする。それぞれの重心を、 (u_1, v_1) 、 (x_1, y_1) 、 (u_2, v_2) 、 (x_2, y_2) としベクトル \vec{a} 、 \vec{b} を

$$\vec{a} = (u_2 - u_1, v_2 - v_1)$$

$$\vec{b} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$$



図13 航空写真 No. 1

Fig.13-Air scape No. 1



図14 エッジによる閉曲線 No. 1

Fig.14-Extracted loops from edge No. 1



図15 航空写真 No. 2

Fig.15-Air scape No. 2

とすると、拡大率 S と回転角 ϕ は

$$S = |\vec{a}| / |\vec{b}| \quad (18)$$

$$\phi = (\vec{a} \text{の方向}) - (\vec{b} \text{の方向}) \quad (19)$$

となるから、アフィン変換の係数は(18)式で計算される。

5. 実験結果

図14に示す画像は1982年11月27日に高度約1500mより愛知県春日井市中切町周辺を撮影した写真の一部である。画像は512×512の大きさで、濃度は256階調で、1画素が地上で約50cmに相当する。エッジの強さが15以上の場合をエッジとする細線化の後に、エッジの強さ・方向に基づかない細線化(不適當な3×3のエッジ・パターンの削除)を行った。その後、3画素より小さいエッジの枝は端点と判断せず、エッジの強さが3以上の画素までエッジを延長するエッジの強さ・方向に基づく補正を行い、更

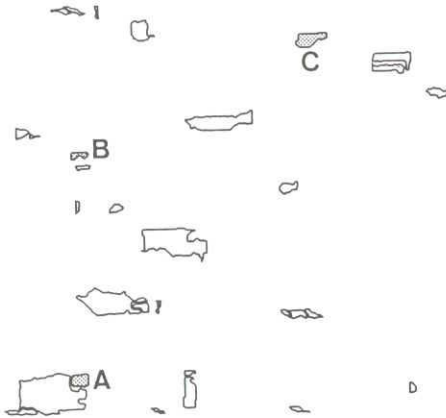


図16 エッジによる閉曲線 No. 2

Fig.16-Extracted loops from edge No. 2

に、端点からの延長はx方向・y方向共に10画素以内とし、端点の方向は端点からの5画素を用いて計算し、I型の補正では角度の閾値を1000とし、V型の補正では面積の閾値を20、角度の閾値を150とするエッジの強さ・方向に基づかない補正を行った。最後に二度目の不適当な 3×3 のエッジ・パターンの削除を行って、エッジの抽出を完了した。次に閉曲線によって囲まれる領域の濃度の平均は50以上で、面積も50以上かつ1000以下で、閉曲線の周囲長の2乗をその面積で割った値は30以下であるとするエッジの閉曲線を抽出した結果を図15に示す。図16は約2ヶ月後の1983年1月23日に同様の条件で撮影したものである。図17は図15と同様にエッジの閉曲線を抽出した結果である。ただし、閉曲線によって囲まれる領域の濃度の平均は40以上としたことだけが異なっている。図15と図17に対して、5章(a)のシンボリック・レジストレーションを行った結果、図14と図15と図17の閉曲線A~Cが対応し、図16が図18となった。ただし、画像の画構成はCubic Convolution[®]を用いた。

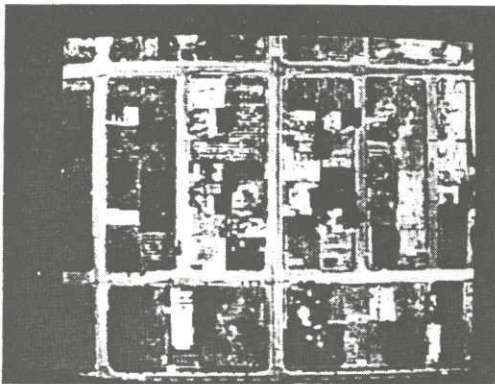


図17 図15を図13へレジストレーションした結果

Fig.17-Registered image of fig. 15 to fig. 13

図14と図18の間の位置のずれは最大で数画素程度で、十分な実用性があると思われる。

対応の付いたシンボルは三個のみであった。実際には対応が付いても良いと思われるシンボルは他にも存在する。この点については、更に、検討を必要とする。しかし、処理する画像をより大きくすれば、対応する閉曲線の数が多くなり、ずれは小さくなると考えられる。

6. むすび

本研究では二つ以上の画像間のレジストレーションとしてシンボリック・レジストレーションを取り上げ、実験的な検討を加えた。本研究の実験をした範囲では今後の応用に利用できる結果が得られた。レジストレーションの結果の応用として、航空写真・衛星写真を用いて家屋・道路・地形の変化の自動検出ができる。

本研究ではレジストレーションのシンボルとして、画像より抽出したエッジの閉曲線を用いた。エッジに関するシンボルとして他に考えられるものは、エッジの分岐点や、エッジの閉曲線とそれに継がるエッジなどがある。これらについて今後検討する必要がある。

レジストレーションに用いる画像の種類によってはエッジを利用できないこともある。この場合は他のシンボルや画像の濃度も利用する必要がある。画像によって不変的なシンボルは異なっているので、注意する必要がある。これらについても今後検討を要する。

【付録】 3×3 の画素によるエッジ・パターンの定義

3×3 の画素でのパターンを分類し、この 3×3 の画素を用いて、エッジの画素が端点・中継点・分岐点のいずれに属するかを決定する。ただし、 3×3 の画素だけでは決定不可能な場合もあるが、決定不可能な場合は分岐点だけである。

(a) 端点・中継点・分岐点の定義

本論文では 3×3 の画素を用いて、以下のように端点・中継点・分岐点を定義する。

端点: 中心の画素の8近傍の画素を一周したら、連続するエッジの画素の塊が一つのみ存在する。

中継点: 中心の画素の8近傍の画素を一周したら、連続するエッジの画素の塊が二つ存在する。

分岐点: 中心の画素の8近傍の画素を一周したら、連続するエッジの画素の塊が三つ以上存在する。

ただし、エッジの画素の接続関係は8連結とするが、4連続の接続関係を優先する。

(b) 分類記号の定義

3×3 画素のエッジ・パターンの分類記号を以下のよ

うに定める。

(1) 3 × 3のエッジ・パターンの分類記号は

$$N\alpha_1\alpha_2 \cdots \alpha_N\beta$$

$$(N + \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_N = 8,$$

β は必要があれば、aまたはbとなる)

(2) 分類記号 $N\alpha_1\alpha_2 \cdots \alpha_N\beta$ において、8連結の接続関係も4連結の接続関係も同様に扱う。

(3) Nは中心の画素以外の8近傍の画素でエッジの画素の数である。また、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ は8近傍の画素を一周した場合に、各エッジの画素の間に存在するエッジでない画素の数である。

(4) パターンの回転(45°, 90°, 135°, …, 315°)や反転に対して不変な分類記号とするために、次のようにして $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ を決定する。

(1) ある始点からある向き(時計・反時計回り)に8近傍の点を走査し、エッジの画素を1で、エッジでない画素を0で表すと、8ビットの数字が得られる。この数字を最小にするような始点・向きを求める。

(2) (1)で求めた始点・向きによって、8近傍の画素を走査し、最初に出現したエッジの画素と二番目に出現したエッジの画素との間に存在するエッジでない画素の数を α_1 とする。以下、同様にして $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ を計算する。

(5) 以上の方法で分類を行うが、8連結と4連結に関して不都合が生じる。90°単位の回転や反転で一致するものと、90°単位の回転や反転で一致しないものが存在する。従って、分類記号の最後の β をaまたはbまたは無記号として区別する。一致する場合は β は無記号とする。一致しない場合は二種類の異なったパターンが存在するので、 β をaまたはbで表し、区別をする。

(c) 不適当なパターン

3 × 3の画素のエッジ・パターンとして不適当なものは、

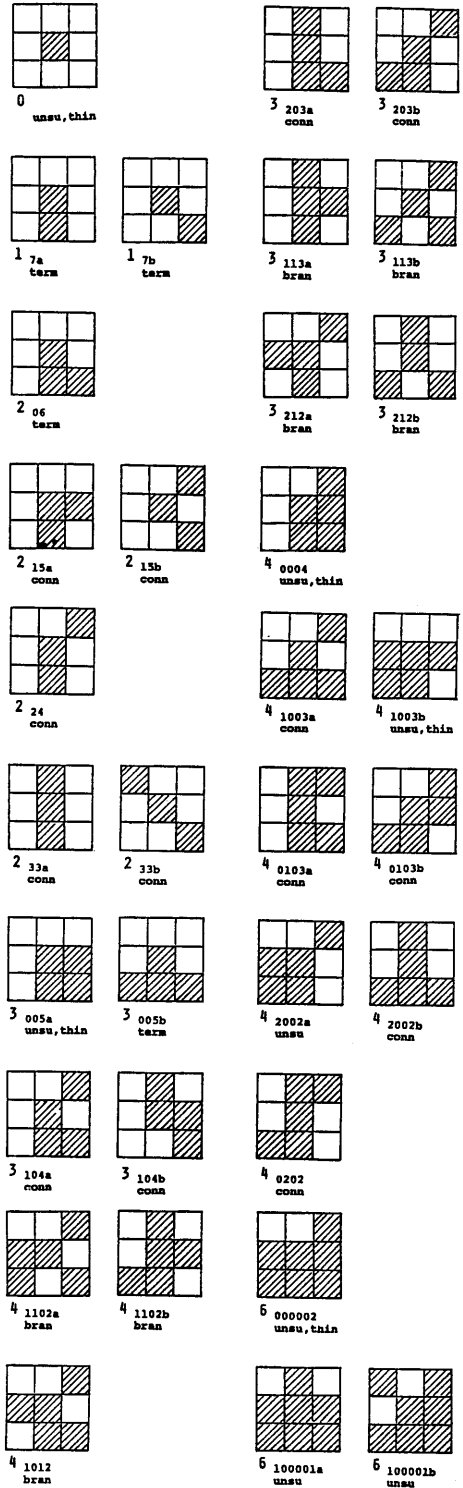
(1) 8近傍に4個以上のエッジの画素が連続しているパターン(分類記号 $\alpha_1\alpha_2, \dots, \alpha_N$ の中で0が三個以上連続している)

(2) 8近傍に3個のエッジの画素が連続して(分類記号 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ の中で0が二個連続している)、かつ、中心のエッジの画素が対角線上に存在するパターン

以上のパターンが存在すると、端点・中継点・分岐点があいまいになる。そこで、2章の(c)で説明した細線化を行い、不適当なパターンを削除する必要がある。

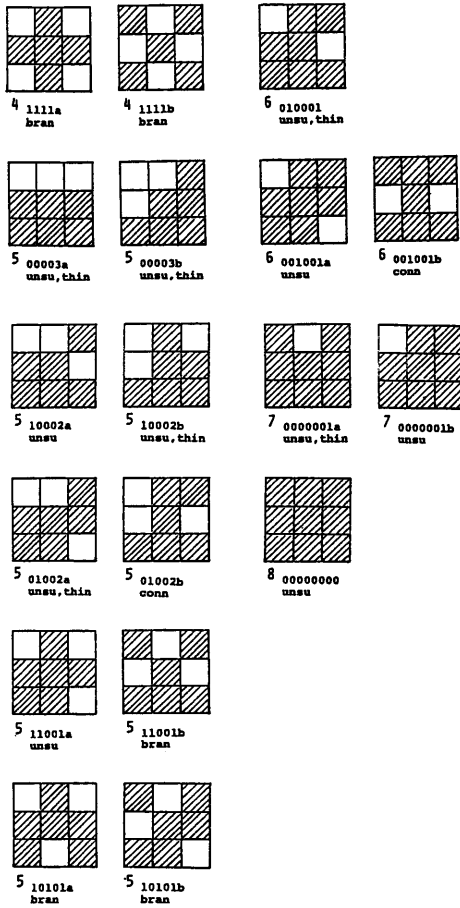
(d) 3 × 3の画素パターンの分類

以上の考察を基に3 × 3の画素のエッジ・パターンを本章で説明した分類記号に従って分類した結果を付録に示す。不適当なパターンでなければ、分類記号の $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ の中で0でないものが1個なら端点、2個なら中継点、



(e) 3 × 3画素によるエッジ・パターンの定義による分類

(term: 端点, conn: 中継点, bran: 分岐点, unsu: 不適当なパターン, thin: 細線化に利用)



3 個以上なら分岐点と判断し、分類する。「不適当なパターン」でも「細線化に利用する」と示されたパターンは 2 章で説明した細線化によって除去される。しかし、それ以外の「不適当なパターン」は細線化されずに残ってしまう。これらのパターンは分岐点であるが、 3×3 の画素では分岐の中心を決定できないパターンである。