

# 線分の空間的配置関係に基づく線図形の構造マッチング†

松山 隆 司<sup>††</sup> 有田 英 一<sup>††</sup> 長尾 真<sup>††</sup>

従来、線図形の構造マッチングでは、いくつかの線分が交わる分岐点に注目し、分岐点の構造情報を利用して対応づけを行うという方法がよく用いられてきた。本論文では、まず線分間の空間的隣接関係を定義し、隣接する線分の空間的配置関係を利用して線図形のマッチングを行う方法を提案する。本方法で用いる線分間の隣接関係は、分岐点のようにトポロジカルに特殊な構造ではなく、空間的に離れた2本の線分に対して定義される一般的な幾何学的関係で、どのような線図形においても多くの線分の間にこの関係が成立する。このため、線図形の部分マッチングを考える場合、本方法では、分岐点に注目した方法では処理できない次のような場合にもうまく対処でき、より一般的なマッチング法であるといえる。(i)等高線図のように本来分岐点を含まない線図形のマッチングを行う場合、(ii)二つの線図形の重複部分に分岐点が存在しない場合、(iii)濃淡画像から抽出されたエッジ画像のように線分が各所で不連続になっている場合。本論文では、画像から線要素が抽出され、これらが適切な折線で表現されたものを一般に対象としているが、ここではとくに上記のような分岐点に注目した方法ではうまくマッチングができない線図形を例にとり、マッチングのアルゴリズムを示すとともに本方法の有効性を実験的に示す。

## 1. はじめに

マッチングは対象物の認識、画像の位置合せなどのための基礎的手法として広く用いられており、これまでに多くの方法が提案されている。画像間のマッチングを行う標準的手法としてテンプレート・マッチングがあるが、この方法には、(i)画像の撮影条件に対する依存度が大きい、(ii)画像間に回転や拡大縮小があるとうまくマッチングが行えない、といった欠点がある。このため最近では、構造的なマッチング法の研究が盛んに行われるようになってきている。

構造的マッチングでは、画像からエッジや特徴点を抽出し、それらの形や空間的位置関係を線図形(やグラフ)として表現し、線図形間の構造の類似性に基づいてマッチングを行うことが多い。したがって、線図形間の柔軟なマッチング法を開発することは、地図や図面などの線図形の処理だけでなく、濃淡画像のマッチングや対象物の認識のための基礎を与えるものと考えられる。

従来、線図形の構造の類似性を判定する方法としては、いくつかの線が交わっている分岐点に注目し、分岐点の構造情報(線の本数、角度など)を利用するのがほとんどであった<sup>1)-4)</sup>(以下分岐点主導型手法と

呼ぶ)。本論文では、まず線分間の空間的隣接関係を定義し、隣接する線分の空間的配置関係の類似性を利用した線図形のマッチング法を提案する(以下、線分主導型手法と呼ぶ)。本方法で用いる線分間の隣接関係は、分岐点のようにトポロジカルに特殊な構造ではなく、空間的に離れた2本の線分に対して定義される一般的な幾何学的関係で、どのような線図形においても多くの線分の間にこの関係が成立する。このため、線図形の部分マッチングを考える場合、本方法では、分岐点主導型手法では処理できないような線図形でもうまくマッチングを行うことができる、より一般的なマッチング法であるといえる。

本論文では、線図形として次のような条件を満たすものを考えている。

- (a) 線図形は適当に折線近似されていて(分岐点は必ず折線の端点となっている)、その表現はベクトル形式で与えられる。
- (b) 一方の線図形をヘルマート変換することにより、他方の線図形にはほぼ(部分的に)重ねられる。
- (c) 二つの線図形の重複部分は完全に一致しなくてもよい。(i)雑音や折線近似の精度の違いによるずれがあってもよい。(ii)一方の線図形にしか存在しない線分があってもよい。

## 2. 線分の隣接関係\*

[定義1] 2本の線分A, Bが作る四辺形の内部で

\*文献5)において、安居院らが閉曲線図形に対して同様の関係を定義している。

† A Structural Matching of Line Drawings Using Spatial Relations between Line Segments by TAKASHI MATSUYAMA, HIDEKAZU ARITA and MAKOTO NAGAO (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University).

†† 京都大学工学部電気工学第2学科

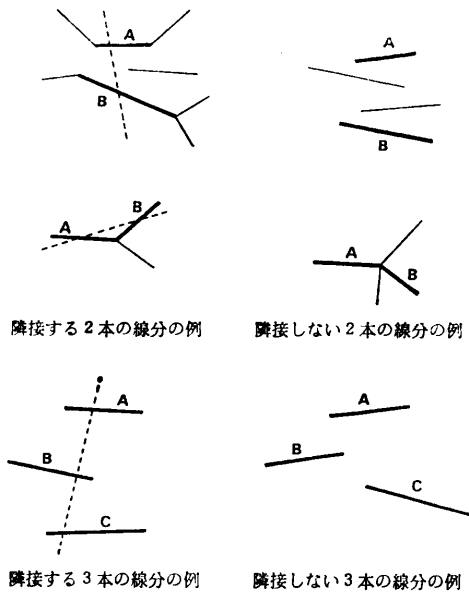


図1 線分の隣接関係

Fig. 1 Spatial adjacency relation between line segments.

他の線分と交わらずに、A、Bとだけ交わる（線分の両端は含まない）直線が引けると、線分A、Bは隣接しているという。

【定義2】 線分A、Bおよび線分B、Cが隣接し、かつ線分A、Cが作る四辺形の内部で線分Bとだけ交わる直線が引けると、線分A、B、Cを隣接する3本の線分組という。

図1に隣接する線分、隣接しない線分の例を示す。

一般に、線分A、Bが隣接しているかどうかを判定するには次の定理を利用すればよい。

【定理1】 線分A、Bの作る四辺形の内部に、その一部または全部が含まれる線分を $l_1, l_2, \dots, l_i$ 、それらの線分の端点のうち四辺形の内部にあるものを $n_1, n_2, \dots, n_i$ とする。同じ線分の両端点ではない二つの端点 $n_p, n_q$ を通る直線が $l_1, l_2, \dots, l_i$ とは交わらずに線分A、Bとだけ交わるとき、線分A、Bは隣接する。

【証明】 図2を参照して、線分A、Bが隣接しているとすると、定義によりA、Bが作る四辺形の内部で他の線分とは交わらずにA、Bとだけ交わる直線が引ける(I)。その直線を左に平行移動したときはじめて衝突する端点を $n_1$ とする(II)。次に端点 $n_1$ を中心に直線を回転したときはじめて衝突する端点を $n_2$ とする(III)。この状態が上の定理で述べた状態で、前述の操作はすべて可逆的である。(証明おわり)

多くの線分から構成される線図形のなかから隣接す

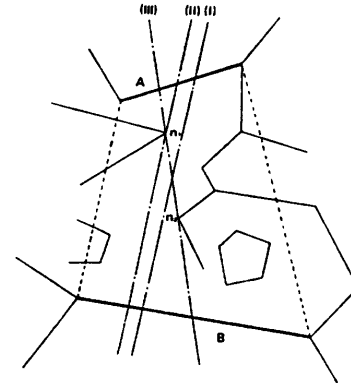


図2 線分の隣接関係の判定 (本文参照)

Fig. 2 Determination of spatial adjacency relation between line segments (see text).

る線分の組を求める場合、総当り的に調べると、 $m$ 本の線分があるとすると、 ${}_m C_2 = m(m-1)/2$ の線分組に対して、それぞれが隣接しているかどうかを判定する必要がある。また、各線分組の隣接性の判定には他の $(m-2)$ 本の線分の位置を調べる必要があり、 $m$ が大きくなると膨大な計算量が必要となる。隣接関係の探索を早くするには、(i)判定すべき候補の数を絞る、(ii)一つの線分組の判定を早くする、ことが考えられる。(i)の方法として閉ループ分割法、(ii)の方法としてスリット法を以下に示す。

【閉ループ分割法】

【定理2】 線分Aと隣接する可能性のある線分は、Aを囲む最小閉ループを構成する線分と、Aを囲まない最大閉ループを構成する線分、およびこの2種類の閉ループで囲まれた領域に含まれる線分である。ここで、Aを囲む最小閉ループとは、Aをその内部に含む閉ループのうち、その面積が最小のものをいう。また、Aを囲まない最大閉ループとは、Aを囲む最小閉ループの内部にある閉ループで、Aをその内部に含まないようにして可能な限り面積が大きくなるようにした閉ループである(図3参照)。

【証明】 これは隣接関係の定義より明らかである。

この定理を利用して線分の隣接関係の探索を高速化するには次のようにすればよい。まず、画像処理における連結成分のラベルづけの要領で、線図形中の各線分を領域の境界線と考えたときの互いに疎な連結領域(閉ループで囲まれた領域)を抽出する(実際には、線図形はベクトル形式で与えられているので、グラフ探索の技法によって閉ループを見つけることになる)。定理2より、隣接する可能性のある線分は各連結領域の境界線および領域内部に含まれる線分同士に限られ

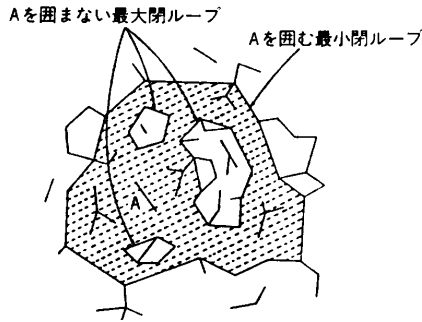


図3 線分Aと隣接する可能性のある線分  
Fig. 3 Candidate line segments which may be adjacent to line segment A.

る。この結果、線図形を構成する線分の集合がいくつかのサブグループに分割され、各サブグループごとに隣接性の判定を行えばよいことになり、全体としての計算量を減らすことができる。

[スリット法]

ある特定の方向にスリットを設定し、それを利用して隣接関係の探索を高速に行う方法である。y 軸方向のスリットを例として説明する (図4 参照)。

線図形中のすべての線分の端点の x 座標をソートし、同じ x 座標の値の重複を除き、

$$X = \{x_i | x_i < x_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n\}$$

とする。このとき、スリットを次のように定義する。

$$S_i = \{(x, y) | x_i < x < x_{i+1}, -\infty < y < \infty\}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

隣接関係は以下のようにして求める。

(1) 各線分についてそれが属すスリットを求める (一般に線分は複数の連続するスリットに属することになる)。

(2) 各スリット内で線分をスリット中央における y 座標の値に従ってソートする。

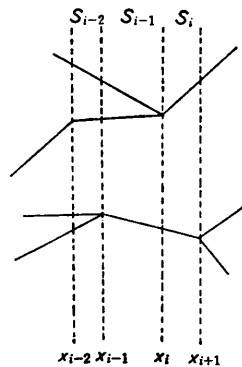


図4 スリット法  
Fig. 4 Slit method.

(3) ソートした結果において、順序の隣り合っている2本の線分は隣接している。

線図形内の隣接する線分組をすべて求めるには、上記の操作をさまざまな方向のスリットに対して行えばよい。

以上述べた二つの方法を比較しよう。閉ループ法ではすべての隣接する線分組を求めることができるが、閉ループの探索に時間がかかる上、線図形が多数の閉ループに分割できなければあまり計算量を減らすことができない。これに対しスリット法では、線図形内のすべての隣接する線分組が求められる保証はないが (マッチングを行う上ではとくに問題ではない)、計算としては座標のソーティングを行うだけであり、線分の本数が多い場合でも、高速に処理ができる。

以上の理由から、本論文ではスリット法を採用し、線分間の隣接関係を求めることにした。

3. 線分主導型マッチング法と分岐点主導型マッチング法の比較

線分主導型、分岐点主導型それぞれのマッチング法において基本的な特徴量としては次のようなものが考えられる (図5 参照)。

線分主導型：隣接する3本の線分組について

- (a-1) 線分の方向 ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )
- (a-2) 線分の間隔 ( $D_1, D_2$ )
- (a-3) 線分組の広がり ( $W$ )

分岐点主導型：一つの分岐点について

- (b-1) 分岐数 ( $n$ )
- (b-2) 分岐点に入る線分の方向 ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ )
- (b-3) 分岐点に入る線分の長さ

マッチングすべき線図形の間に回転や拡大縮小といった幾何学的変換が含まれている場合には、線分の長

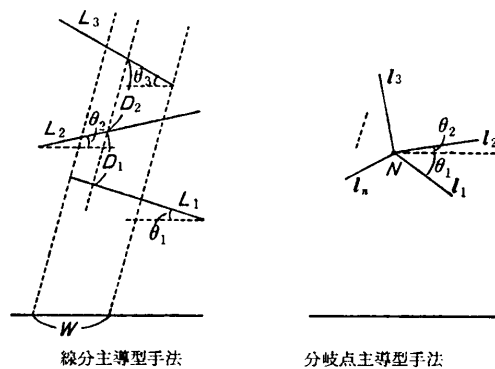


図5 マッチングのための局所の特徴  
Fig. 5 Local features for matching.

さの比や線分間の角度を特徴量とすればよい。

一般的に考えて、分岐点主導型のマッチングは、分岐点というトポロジカルに特殊な部分に注目した方法であるため、次のような場合にはうまく働かない。

- (i) 等高線図形のように本来分岐点をもたない線図形をマッチングさせようとする場合。
- (ii) 対応をとろうとする二つの線図形の重複部分に分岐点が存在しない場合。
- (iii) 濃淡画像から抽出されたエッジ画像のように、線分が各所で不連続となっていて、線図形が連続したネットワーク構造とならない場合。
- (iv) 対象の表現法（おもに解像度）の違いにより、線図形としてのトポロジカルな構造が異なるものをマッチングさせようとする場合（図 18 参照）。

これに対し、線分主導型手法では、どのような線図形にでも普遍的に存在する隣接する線分をマッチングのための特徴とするため、上記のいずれの場合に対してもうまくマッチングが行える（具体的な方法は 4 章で示す）。

線図形のマッチングの過程では、まず図 5 に示したような局所の特徴間の対応をとり、次の段階で個々の局所対応の全体的整合性を調べることになる。この際、一つの局所対応から計算される線図形間の幾何学的変換係数は、雑音の影響で必ずしも正確なものとはなっていない。そこで、幾何学的変換係数の計算精度を向上させるには、できるだけ多くの局所対応をとる必要が生じる。こうした観点からも、分岐点という特殊な構造よりも隣接する線分という一般的構造を利用したほうが、より多くの局所対応が求められることになり都合がよい。

#### 4. 線図形のマッチング

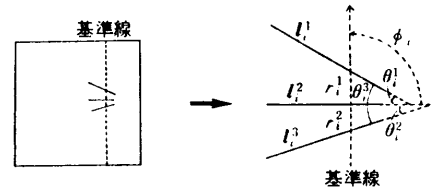
以下では 2 枚の線図形を線図形 1、線図形 2 と呼び、線図形 1 を線図形 2 に重ね合わせるためのマッチング処理のアルゴリズムについて述べる。

マッチング処理の概略は次のようになる。

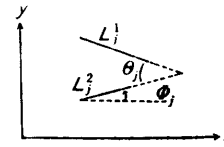
(1) 図 6 に示すように、線図形 1 中に座標軸に平行な仮想的な基準線を考える。基準線の位置、方向、数は線図形 1、2 の（予想される）重複部分を通るように適当に決める。

(2) 基準線と交わる 3 本の連続した線分は、定義 2 より隣接する 3 本の線分組となっており、それらを線図形 1 の局所の特徴（基本対応要素）とする。

(3) 線図形 2 のなかから、先のスリット法により



(a) 線図形 1



(b) 線図形 2

図 6 線図形 1, 2 における局所の特徴

Fig. 6 Local features in line drawings 1 and 2.

隣接する線分組を求める（実際では 8 方向のスリットを用いた）。

(4) [局所的 マッチング] 線図形 1 の各基本対応要素に対応する線図形 2 中の隣接する線分組を選び、それらの間の幾何学的変換の係数をそれぞれ求める（一般に、一つの基本対応要素について複数の隣接する線分組が求まる）。

(5) [正しい対応関係の選択と幾何学的変換係数の算出] 局所対応の全体的整合性を調べ、正しい対応関係を選ぶために、(4) で求められた変換係数(群)をパラメータ空間でクラスタリングし、最大クラスタを求める。

(6) 最大クラスタの重心位置から線図形 1 と線図形 2 の幾何学的変換係数を求め、二つの線図形を重ね合わせる。

(7) [対応関係の拡張] 二つの線図形の重複部分に属する各線分についてそれぞれ対応する相手の線分を求める。

##### 4.1 隣接する線分組のマッチング

線図形 1 から得られた隣接する 3 本の線分組の集合を

$$O = \{O_i\}_{i=1}^n = \{(L_i^1, L_i^2, L_i^3)\}_{i=1}^n$$

としたとき、各線分組  $O_i$  に対して、

$\phi_i$ : 中央の線分と（線図形 1 上に引いた）基準線とのなす角度

$\theta_i^1, \theta_i^2$ : 隣接する 2 本の線分のなす角度

$\theta_i^3$ : 外側の 2 本の線分のなす角度

$r_i^2/r_i^1$ : 隣接する 2 本の線分が基準線を区切る長さの比

を特徴量とする（図 6 参照）。

線図形2から得られた隣接する2本の線分組の集合を

$$P = \{P_i\}_{i=1}^n = \{(L_i^1, L_i^2)\}_{i=1}^n$$

としたとき、各線分組  $P_i$  に対して、

$\phi_i$ : 一方の線分と線図形2のx軸とのなす角度

$\theta_i$ : 隣接する2本の線分のなす角度

を特徴量とする (図6参照)。

線図形1中の  $\theta_i$  に対応する線図形2中の線分組を探す手順は次のようになる。

(1)  $|\theta_i^1 - \theta_j| \leq \alpha$  を満たす  $\{P_j\}$  の部分集合  $\{Q_j\}_{j=1}^n$  を求める (実験では  $\alpha = 15^\circ$  とした)。

(2)  $Q_j$  を構成する2本の線分を  $L_j^1, L_j^2$  としたとき、次の条件を満たす線図形2中の線分  $L_j$  があるかどうか調べる。

$$(L_j^1, L_j) \in \{P_j\}_{j=1}^n \text{ かつ } |\theta_i^2 - \angle L_j^1 L_j| < \alpha$$

または

$$(L_j^2, L_j) \in \{P_j\}_{j=1}^n \text{ かつ } |\theta_i^2 - \angle L_j^2 L_j| < \alpha$$

ここで  $\angle L_j^1 L_j, \angle L_j^2 L_j$  は二つの線分のなす角度を示す (一般にはこの条件を満たす  $L_j$  は複数である)。

(3) (1), (2)の条件で見つけられた  $\theta_i = (L_i^1, L_i^2, L_i^3)$  に対応する線図形2中の3本の線分組を  $(L_1, L_2, L_3)$  とする。このとき、線図形1中の基準線に対応する直線を  $(L_1, L_2, L_3)$  に交わるように引けるかどうかを調べる。図7(a)のように、線図形1中の基準線が線図形2のx軸となす角度は、線分  $L_i^2$  と線分  $L_2$  が対応することから

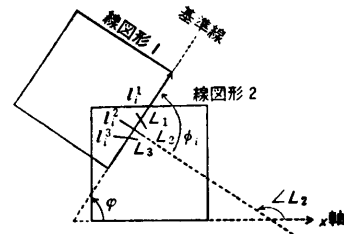
$$\phi = \phi_i + \angle L_2 - 180^\circ$$

として求まる ( $\angle L_2$  は線分  $L_2$  とx軸とのなす角度)。したがって、線分  $L_1, L_2, L_3$  の端点をy方向に投影したときの線図形2のx軸上での座標を  $(x_{iL}, x_{iR}), x_{iL} \leq x_{iR}, i=1, 2, 3$  とすると、

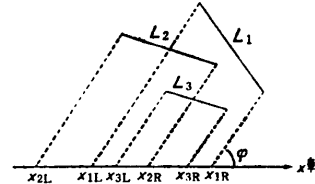
$$\max_{i=1,2,3} (x_{iL}) < \min_{i=1,2,3} (x_{iR})$$

であれば、 $(L_1, L_2, L_3)$  と同時に交わる線図形1の基準線に対応する直線が引ける可能性がある (図7(b))。もし、上記の条件を満たさない場合は、 $(L_1, L_2, L_3)$  は  $O_i$  に対応する線分組ではないことになる。

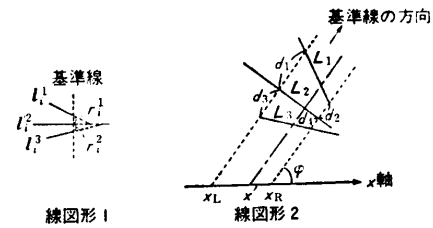
(4) (3)の条件を満たした  $(L_1, L_2, L_3)$  に対して、 $O_i$  のもう一つの特徴である  $r_i^2/r_i^1$  を使い、線図形2上における線図形1の基準線の位置を求める。  $x_L = \max_{i=1,2,3} (x_{iL}), x_R = \min_{i=1,2,3} (x_{iR})$  とし、図7(c)のようになら距離  $d_1 \sim d_4$  をとり、 $r_i^2/r_i^1 = R$  とする。このとき線図形2において、方向  $\phi$  の直線を  $L_1, L_2, L_3$  が  $R$  の比で横切る位置  $x'$  は



(a) 回転角の算出



(b) 線分の相互的な位置関係の検査



(c) 線分間の距離関係の検査

図7 局所の特徴のマッチング  
Fig. 7 Matching of local features.

$$x' = x_L + \frac{(Rd_1 - d_3)(x_R - x_L)}{(d_4 - d_3) - R(d_2 - d_1)}$$

となる。したがって、 $(L_1, L_2, L_3)$  が  $O_i$  に対応する線分組であるためには、

$$d_4 - d_3 \approx R(d_2 - d_1) \text{ の場合}$$

$$x_L \leq x' \leq x_R$$

$$d_4 - d_3 = R(d_2 - d_1) \text{ の場合}$$

$$\beta \leq \frac{\min(R, d_3/d_1)}{\max(R, d_3/d_1)} \leq 1$$

を満たす必要がある。  $d_4 - d_3 = R(d_2 - d_1)$  となるのは、 $L_1, L_2, L_3$  が平行であるなど特殊な空間配置の場合である (また、しきい値  $\beta$  は実験では 0.8 とした)。

以上の(1)~(4)の条件をすべて満足した線図形2中の3本の線分組  $(L_1, L_2, L_3)$  が線図形1の基本対応要素  $O_i$  に対応する線分組となる。

#### 4.2 幾何学的変換係数の算出

4.1 節の局所的マッチングにより、線図形1中の隣接する3本の線分組  $\{O_i\}_{i=1}^n$  のそれぞれに対して、線図形2の3本の線分組 (一般には複数) が求まる。しかし、このマッチングはたんに3本の線分組同士の対応であるため、偽の対応関係がかなり含まれてい

る。このため、局所的マッチングの結果から正しい線分組の対応関係のみを選び、線図形1, 2間の幾何学的変換を求めるといふ大局的マッチングを行う必要がある。

1章で述べた仮定により、線図形1 ( $(u, v)$  座標系で表される) と線図形2 ( $(x, y)$  座標系で表される) の間の幾何学的変換は次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $r$  はスケール比、 $\theta$  は回転角、 $a, b$  は平行移動成分を表す。

正しい線分組の対応を選び、線図形間の幾何学的変換を求めするためには、われわれは次のような方法を用いた。

(1) 4.1 節で求めた対応する3本の線分組のそれぞれにおいて、図8に示す6点の座標をそれぞれ求める。すなわち、基準線上の3点と3本の線分の作る三つの交点である。ただし、線分が平行に近い ( $160^\circ$  以上の角度で交わる) ときは、それらの線分の交点は除外する。

(2) このようにして求められた対応する座標の組  $\{(x_i, y_i), (u_i, v_i) \mid i=1 \sim 6\}$  を用いて最小2乗法により、(1)式の係数、 $r, \theta, a, b$  を求める。

(3) (1), (2)の操作を線図形1, 2から求められたすべて ( $N$  個) の対応する3本の線分組に対してほどこすことにより、 $N$  個の変換係数の組  $\{(r_i, \theta_i, a_i, b_i) \mid i=1 \sim N\}$  を求める。

(4) まず、線図形間のスケール比と回転角を求めするために、 $(r_i, \theta_i) \mid i=1 \sim N$  をパラメータ空間にプロットし、クラスタリングを行う。

(5) 次に  $r-\theta$  空間での最大クラスタに属す変換係数の組を選び、それらを  $a-b$  空間にプロットし、クラスタリングによって最大クラスタを求める。

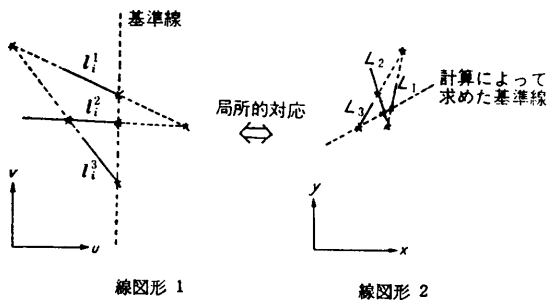


図8 幾何学的変換係数の計算に利用する点 (\*印)  
Fig. 8 Points used for calculating coefficients of geometric transformation.

(6) (5)で求めた最大クラスタに属す変換係数を与える線分の対応関係が正しい対応となり、それらを用いて再び最小2乗法により(1)式の変換係数を計算し、それを線図形1, 2間の幾何学的変換とする。

実験では(4), (5)におけるクラスタリングは、 $r$  の0.05と $\theta$  の1度が同じ距離となるように重みを付け、重心間距離クラスタリングを行った。クラスタの併合を停止するしきい値は、 $r=0.36$  と $\theta=7.5^\circ$  に相当する距離とした。また、 $a-b$  空間でのクラスタリングは通常のユークリッド距離を用い、しきい値は線図形の大きさを1辺100の正方形としたときに5とした。

上の処理において、 $r-\theta$  と  $a-b$  とを別々にクラスタリングした理由は、 $r, \theta$  の計算誤差は座標平面上での線分の位置に依存しないが、平行移動成分  $a, b$  の誤差は線分の位置が原点から離れるに従って大きくなり、4次元のパラメータ空間で同時にクラスタリングを行うとうまくクラスタを見つけるのがむずかしくなるからである。

以上の処理によって、線図形1, 2における線分の

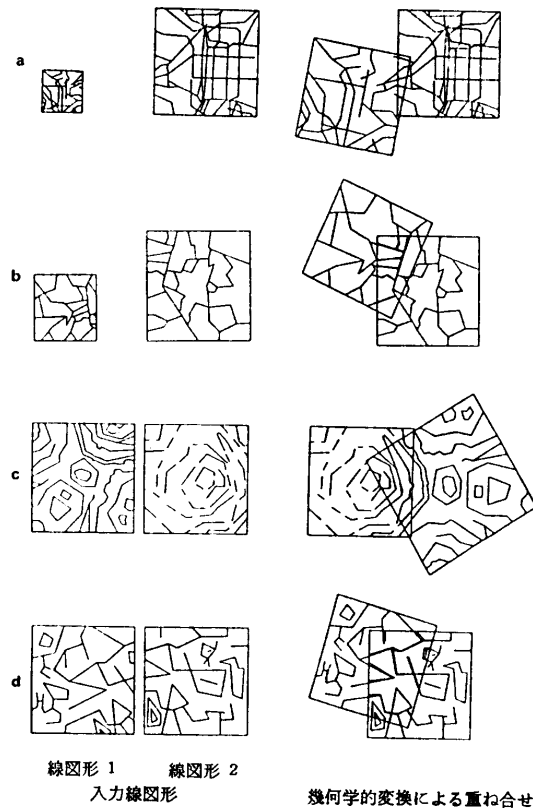


図9 線図形の重ね合せの実験例  
Fig. 9 Experimental results of registration of line drawings.

表 1 線図形のマッチングの処理結果  
Table 1 Experimental results of matching of line drawings.

	線図形 1		線図形 2		線図形 2 の隣接関係の数 (そのうち平行に近いもの)	線図形 1 から対応を探しにいった 3 本の線分組の数	みつかった局所的対応の数	処理時間* (m sec)
	線分の数	点の数	線分の数	点の数				
(a) 図	99	74	162	110	468 (55)	32	89	2709
(b) 図	74	54	73	94	367 (14)	12	30	741
(c) 図	157	140	91	118	535 (28)	31	80	2649
(d) 図	88	75	74	68	253 (11)	14	27	689

\* 計算機は FACOM M-200 4CPU システム

正しい対応関係と二つの線図形間の幾何学的変換係数が求まる。図 9 にいくつかの線図形に対する実験例、表 1 に各線図形の性質を示す。

4.3 線分の対応づけの拡張

上のマッチングの処理では、線図形 1 の基準線に沿って並んでいる線分の対応がとれただけで、二つの線図形の重複部分に含まれるすべての線分の対応づけられたわけではない。そこで、4.2 節で対応づけられた線分から出発し、線分の接続関係を利用して、線分の対応づけを拡張する。

4.3.1 対応点の算出

4.2 節で対応づけられた線分は、線分として対応がとられただけで、それらの両端点同士が対応しているわけではない (図 10)。そこで、線分の対応づけを拡張するまえに、対応する端点を求めておく必要がある。

まず、4.2 節で求めた幾何学的変換によって線図形を重ね、対応づけられた一方の線分の端点から他方の線分への垂線を引き、その垂線の足の位置で互いに相手の線分を分割する (図 10)。そして線分の端点とそこからの垂線の足を対応する点とし、分割された小線分同士の対応を求め、これを出発点として線分の対応づけを拡張する。

4.3.2 対応づけの拡張アルゴリズム

図 11 に示すように、線分  $l_0$  と  $L_0$ 、端点  $n_0$  と  $N_0$

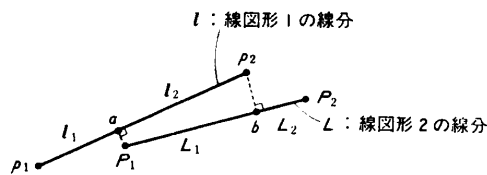


図 10 対応点の計算

対応づけられた線分  $l, L$  が  $l_1, l_2, L_1, L_2$  に分割され、 $a$  点と  $P_1$  点、 $b$  点と  $P_2$  点が対応点となる

Fig. 10 Calculation of corresponding point pairs. Line segments  $l$  and  $L$  are divided into  $l_1, l_2$  and  $L_1, L_2$  respectively, and points  $a$  and  $P_1$  and points  $b$  and  $P_2$  are regarded as corresponding point pairs.

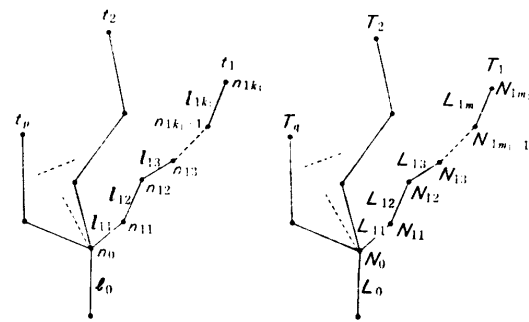


図 11 トレインの対応づけ

Fig. 11 Matching between trains of line segments.

がそれぞれ対応づけられており、端点  $n_0$  から  $p$  本のトレイン、 $N_0$  からは  $q$  本のトレインが分岐しているとする。ここでトレインとは、分岐なしに連続している線分の連なりを表す。この場合、次に述べる方法でトレイン  $t_i$  と  $T_j$  ( $i=1 \sim p, j=1 \sim q$ ) の類似度  $H_{ij}$  を計算し、 $\max_i H_{ij}$  となるトレイン  $T_j^*$  を  $t_j$  に、 $\max_j H_{ij}$  となるトレイン  $t_i^*$  を  $T_j$  に対応させる。ただし、 $\max_i H_{ij}, \max_j H_{ij}$  が 0 となるような場合は、 $T_j, t_i$  に対応するトレインが存在しないことになる。また、トレインを構成する線分間の対応づけは、 $H_{ij}$  を計算する過程で行われる。

【トレイン間の対応づけ】

二つのトレインを  $t_i = \{n_0, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii}, 0\}$ ,  $T_j = \{N_0, N_{j1}, N_{j2}, \dots, N_{jm}, 0\}$  とする。ここで最後の 0 はトレインの終了を表す。

(1) トレイン上の各点の位置を  $n_0, N_0$  からの相対座標で表す ( $n_0, N_0$  を重ねた状態で処理を行う)。

(2) 初期化:

LENGTH  $\leftarrow 0$  : 対応の長さを表す。

POINTER  $\leftarrow 1$  : トレイン中の現在注目している点の位置を示す。

STAGE  $\leftarrow 1$  : 基準とするトレイン ( $t_i$  か  $T_j$ ) を表す。

$H_{ij} \leftarrow \phi$

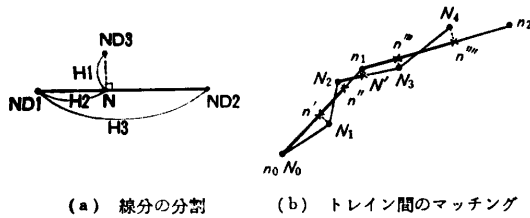


図 12 線分の対応づけの拡張  
Fig. 12 Making correspondence between trains of line segments.

- (3)  $N_1 \leftarrow t_i(\text{POINTER})$   
 $N_2 \leftarrow T_j(\text{POINTER})$   
 $N_3 \leftarrow t_i(\text{POINTER}+1)$   
 $N_4 \leftarrow T_j(\text{POINTER}+1)$

ここで  $t_i(\text{POINTER})$ ,  $T_j(\text{POINTER})$  は各トレインの POINTER 番目の点の座標を表す。

(4)  $N_3=0$  あるいは  $N_4=0$  なら,  $t_i$ ,  $T_j$  は対応しているとし,  $H_{ij} \leftarrow \text{LENGTH}$  として終了

(5)  $\text{STAGE}=1$  のとき  $(H_1, H_2, H_3, N) \leftarrow \text{NEAR}(N_1, N_3, N_4)$

$\text{STAGE}=2$  のとき  $(H_1, H_2, H_3, N) \leftarrow \text{NEAR}(N_2, N_4, N_3)$

ここで NEAR は, 三つの点  $(ND_1, ND_2, ND_3)$  が与えられたとき, 図 12(a) に示すような  $(H_1, H_2, H_3, N)$  を計算する関数.  $N$  は点  $ND_3$  から  $ND_1, ND_2$  を通る直線に引いた垂線の足の座標を表す。

(6) (i)  $H_2 > H_3 + TH_2$  のとき

STAGE=1 なら STAGE  $\leftarrow$  2

STAGE=2 なら STAGE  $\leftarrow$  1

(ii)  $H_3 - TH_2 \leq H_2 \leq H_3 + TH_2$  のとき

$H_1 > TH_1$  なら  $t_i$  と  $T_j$  は対応しないとして終了

$H_1 \leq TH_1$  なら

POINTER  $\leftarrow$  POINTER+1

LENGTH  $\leftarrow$  LENGTH+H2

(iii)  $0 < H_2 < H_3 - TH_2$  のとき

$H_1 > TH_1$  なら対応しないとして終了

$H_1 \leq TH_1$  なら

STAGE=1 のとき  $t_i$  の POINTER+1 番目

に図 12(a) の垂線の足の点  $N$  を挿入

STAGE=2 のとき  $T_j$  の POINTER+1 番目

に図 12(a) の垂線の足の点  $N$  を挿入

POINTER  $\leftarrow$  POINTER+1

LENGTH  $\leftarrow$  LENGTH+H2

(iv)  $H_2 \leq 0$  のとき 対応しないとして終了

ここで  $H_2 < 0$  は, 図 12(a) において  $ND_3$  からの垂線の足が  $ND_1$  の左側に来ることを表す。

(7) (3)へもどる。

上記のアルゴリズムによるトレインの対応づけの様子を図 12(b) に示す。ここで,  $n', n'', n''', n''''$ ,  $N'$  はステップ (b) で新たに生成された点を表す。トレイン上の点の対応づけとしては,  $(n_0, N_0)$ ,  $(n', N_1)$ ,  $(n'', N_2)$ ,  $(n_1, N')$ ,  $(n''', N_3)$ ,  $(n''''', N_4)$  が対応し, 残った線分  $n''''-n_2$  は対応する相手がないと判断される。また, LENGTH には図中の太線の総和が代入される。ステップ(6)におけるしきい値  $TH_1, TH_2$  は, 実験では, 入力線図形の大きさを  $100 \times 100$  としたとき,  $TH_1=3, TH_2=4$  とした。

線分の対応づけの拡張アルゴリズムが上述のように多少複雑になっているのは, 雑音や折線近似の精度の違いによって二つの線図形が完全に一致しないような場合でもうまく対応づけができるように考えたからである。

上記のアルゴリズムではたどりつけない孤立した島状の線分同士の対応関係を求めるには, 線図形 1, 2 を幾何学的変換によって重ね合わせたときに最も近くに位置する線分組を対応する線分と考え, そこから先の方法で対応づけを拡張する。このときの線分間の距離は次のように定義した (図 13)。

$$H(l, L) = \begin{cases} \infty & H_1 \geq TH \text{ または } H_2 > TH \\ & \text{あるいは } D \leq 0 \text{ のとき} \\ W(H_1 + H_2) - D & \text{それ以外のとき} \end{cases}$$

実験では  $TH=4$  とした。

上記の操作を繰り返すことにより, 線図形 1, 2 の重複部分に属すすべての線分間の対応関係が求められる。

図 14(A) は図 9 の線図形に対して線分の対応づけの拡張を行ったのち, 対応がつけられた線分については線図形 2 の線分のみを表示した結果である。

#### 4.4 線図形の合成

図 14(A) より明らかなように, 線分の対応づけを行っただけでは, 線図形の枠付近において線分が不連

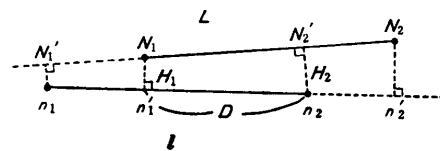
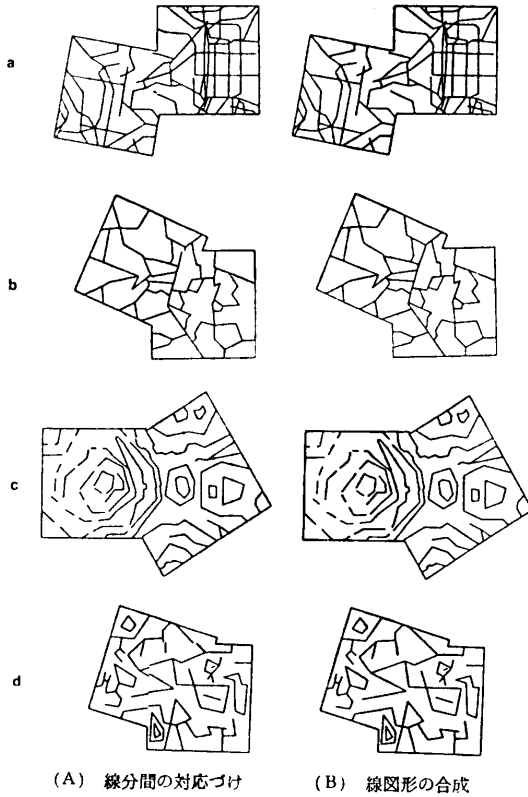


図 13 線分間の距離

Fig. 13 Distance between line segments.





(A) 線分間の対応づけ (B) 線図形の合成  
 図14 線図形の対応づけと合成の実験例  
 Fig. 14 Experimental results of matching and merging of line drawings.

続になってしまう。この原因は、雑音や幾何学的変換係数の計算誤差にある。二つの線図形を一つに合成するにはこうした線分の不連続性を取り除く必要がある。

線分の不連続が生じるのはもとの線図形の枠上であるから、図15に示すように、線図形2の枠上に位置する両線図形中の対応する点を  $n, N$  としたとき、それぞれの点から一つの線分を後向き（枠と反対方向）にたどり、そのときの線分の端点同士を直線で結べばよい。図14(B)はこのようにして合成した線図形で、線分の不連続性がなくなり、完全に一つの線図形とな

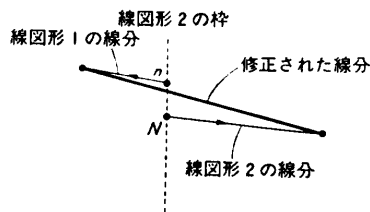


図15 線分の不連続性の修正  
 Fig. 15 Correcting discontinuity between line segments.

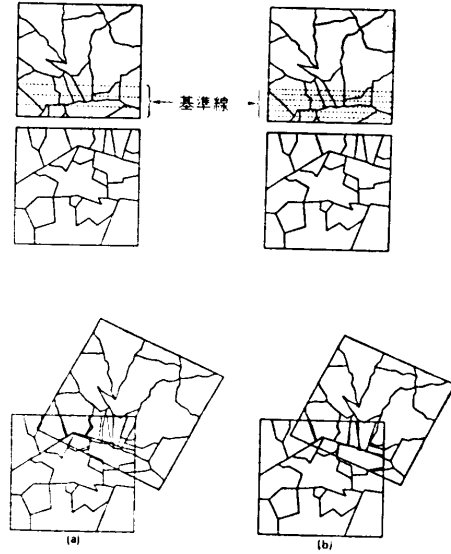


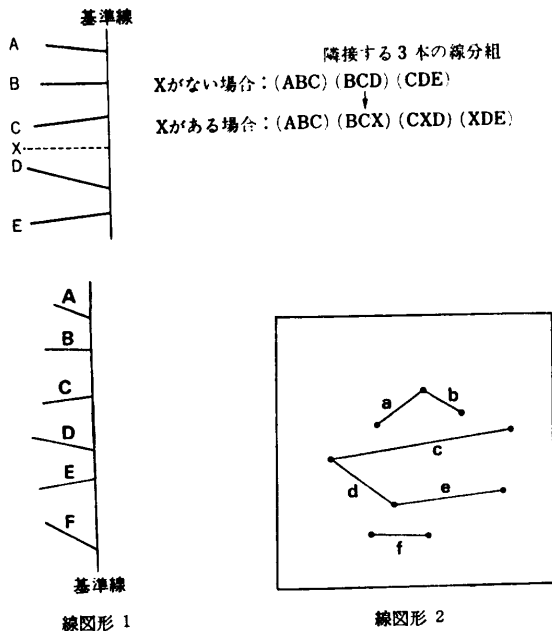
図16 雑音に対する対策  
 Fig. 16 Matching of noisy line drawings.

っている。

### 5. 考 察

4章の線図形のマッチングでは、線図形1に仮想的に基準線を引き、それに交わる線分を利用してマッチングを行った。雑音や折線近似の精度に差がある場合には、できるだけこの基準線の本数を多くし、幾何学的変換係数の計算精度をよくしなければならない。図16は、図9(b)の線図形1の折線近似の精度を細かくしたのち、雑音を加えたものと線図形2とのマッチングを行った例である。このとき、(a)の場合は基準線が3本、(b)は6本用いており、線図形を重ね合わせた場合のずれは後者のほうがずっと少なくなっている。

われわれの提案したマッチング法では、隣接する線分を基準にして処理を行っている。したがって、一方の線図形にしか存在しない線分の本数が増えると、それらによって線分の隣接関係が大幅に変わってしまう、うまく対応づけが行えなくなってしまう。たとえば、図17(a)のように線分Xがある場合とない場合では線分の隣接関係が大きく変化する。こうした場合に対処するには、図17(b)に示すように、線図形1では基準線に沿った隣接する3本の線分組のほか、ある1本の線分がないと仮定したときに隣接する3本の線分組についても、それに対応するものが線図形2に存在するかどうか探す。また、線図形2においても、隣接する2本の線分組だけでなく、ある1本の線



線図形 1: 隣接する3本の線分組 (A, B, C), (B, C, D), (C, D, E), (D, E, F)に加えて, 1本がないと仮定したときの3本の線分組 (A, C, D), (A, B, D), (B, D, E), (B, C, E), (C, E, F), (C, D, F), (A, C, E), (B, D, F)についても対応を探しにゆく.

線図形 2: 隣接する線分組 (a, c), (a, b), (b, c), (c, d), (c, e), (d, e), (d, f), (e, f)に加えて (a, d), (a, e), (b, d), (b, e), (c, f)も隣接する線分組として登録しておく.

図 17 隣接関係の拡張

Fig. 17 Extending adjacency relations between line segments.

分がないと仮定した場合に隣接する線分組も求めておく。このように隣接関係を拡張しておく、図 18 に示すように、一方の線図形では1本の線として表現されているものが他方の線図形では平行な2本の線として表現されているような場合でもうまくマッチングができる。この場合、隣接関係の拡張はあまり時間をかけずに計算できるが、対応する線分組の探索や幾何学的変換係数の計算にはかなりの処理時間が必要となる。

以上本論文では、隣接する線分間の空間的配置構造を利用した線図形のマッチング法を提案し、いくつか

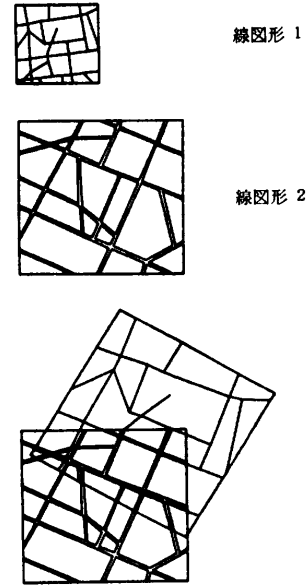


図 18 解像度の異なる線図形のマッチング  
Fig. 18 Matching of line drawings in different resolutions.

の実験例を示すことにより、その有効性を明らかにした。

参考文献

- 1) Sakai, T., Nagao, M., Matsushima, H.: Extraction of Invariant Picture Substructures by Computer, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 1, No. 1, pp. 81-96 (1972)
- 2) 富岡, 田中, 田村, 田中: 血管構造に基づく眼底写真の貼合せ, *情報処理*, Vol. 19, No. 2, pp. 135-144 (1978).
- 3) Zahn, C. T.: An Algorithm for Noisy Template Matching, *Proc. IFIP 74*, pp. 727-732 (1974).
- 4) 中村, 岡本, 南, 奥野: 最短木で記述された濃淡画像の構造マッチング, *信学論*, Vol. J64-D, No. 12, pp. 1121-1128 (1981).
- 5) 安居院, 松原, 中嶋: 閉曲線群の記述と構造解析, *信学技報*, PRL 80-48 (1980).

(昭和 57 年 12 月 21 日受付)

(昭和 58 年 4 月 19 日採録)