愛知教育大学研究報告，55（自然科学編），pp. 5～8， March, 2006

部分対応の結合と拡張による点パターン整合法の改良

小川秀夫

情報教育講座

An Improved Method of Point Pattern Matching by Using Unification and Expansion on Local Correspondences

Hideo OGAWA

Department of Information Sciences, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

1．まえがき

点パターン整合はパターン認識における極めて基本的で重要な処理である。対象物およびそのモデルを特徴点の集合として記述し，それらの間の点パターン整合によりパターンの同定を行うことができる。一般的に，点パターン整合に要請される機能は次の三つである。

(1) オクルージョンや雑音などによる点の欠落と挿入に対処するため，部分マッチングが可能であること。

(2) 相似変換に不変であること。

(3) 高速マッチングが可能であること。

点パターン整合では、点の位置情報のみを用いるため，点の数が多くなるとマッチング処理に膨大な時間を要することになりかねない。したがって，上記(3)は重要な要請である。

今日に至るまで，多くの研究者により種々の点パターン整合法が開発されてきた（文献１～6参照）。それらの手法を解説し，性能を比較検討することは本論文の目的ではないので他の機会に譲る。

筆者は，以前に上記の要請を満たす点パターン整合法を開発し（文献４参照），これを線図形の認識に応用する研究を進めてきた（文献７参照）。

本論文では，筆者が先に開発した点パターン整合法をさらに高速化した改良型点パターン整合法を示す。先の手法では，いくつかの３点部分パターンの整合から始めて，得られた部分対応を結合処理と拡張処理により次第に成長させることにより，極大部分対応を得るものであった。ここでは，２点部分パターンの整合から始める方法，およびパターン平面上に対応候補点の存在範囲を求め，その限られた領域内のみを探索することにより対応点を決定する方法，を提案する。これにより，計算量を$O(m \cdot n^2)$とすることができる。

また，本論文では提案手法を星座のマッチングに適用した実験について述べ，その有効性を検討する。

2．部分対応の表現

平面上の二つの点パターンをMおよびWとする。ここで，Mはモデル点パターン，Wは対象世界のインスタンス点パターンとする。MおよびWは次のように記述できる。

$$M=\{P_1, P_2, \cdots, P_m\}$$

$$W=\{Q_1, Q_2, \cdots, Q_n\}$$

ここで，$P_i=(x_i^p, y_i^p)$，$Q_j=(x_j^q, y_j^q)$であり，(x_i^p, y_i^p)および(x_j^q, y_j^q)はそれぞれの座標系におけるP_i点およびQ_j点の座標値である。

今，Mの部分パターンSとWの部分パターンTの間に１対１対応$F: S \rightarrow T$が存在するとき，この部分対応Fを本論文では次のように表し，これを配列表現と呼ぶ。

$$[v_1, v_2, \cdots, v_m]$$

ここで，

$$v_i=\begin{cases} Q_j & if\ P_i \in S\ and\ Q_j=F(P_i) \\ \phi & otherwise \end{cases}$$

である。また，ϕは対応する点が定まっていないことを表す。

次に，部分対応Fの“大きさ”をその配列表現におけるϕでない要素v_iの個数とし，$n(F)$と記す。また，部分対応Fの“適合度”を$c(F)$と記し，相似変換のもとでの対応点間の最小平均２乗誤差ε^2を用いて次式で定義する。

$$c(F)=\frac{1}{1+\alpha \cdot \varepsilon^2}$$

ここで，αは任意の定数である。なお，以降本論文では$c(F)$を与えた相似変換を“Fに付随する相似変換”と呼ぶ。

3. 整合法

本論文で提案する点パターン整合法の概略を次に示す。まず，点パターンMからN個の2点部分パターン$\{S_1, S_2, \cdots, S_N\}$を任意に決定する。各$S_n$に対して，正しい対応であるとする支持の割合（3.1で詳述する）が設定値T_t以上である部分対応F^nをすべて求める。ここでは，対応候補点の存在をWのパターン平面上で調べることになるが，この探索範囲はF^nから計算により求めることができる。そのため，探索処理は定数オーダーの時間で可能となった。

次に，これらの部分対応の配列表現に対して結合処理を繰り返すことにより，より大きな部分対応を生成する。このように生成された各部分対応について，拡張処理により，最初に選んだN個の2点部分パターンに含まれない点に対する対応点を決定する。

最後に，部分対応F_iの“良さ”$g(F_i)$を次式で評価し，$g(F_i)$が最大の部分対応F_iを整合結果とする。

$$g(F_i) = c(F_i) \cdot \frac{n(F_i)}{m}$$

ここで，mはモデル点パターンMを構成する点の数である。

3.1 2点部分パターンの整合

任意に定められた2点部分パターンS_nに対して，正しい対応であるとする支持の割合が設定値T_t以上であるすべての部分対応$\{F_l^n\}$を次のように求める。

ここで，$S_n=(P_i, P_j)$とする。

(Step 1) P_iとP_jがWの2点Q_kとQ_lにそれぞれ対応するとする。この部分対応Fに付随する相似変換をΦとする。

(Step 2) 任意の点$P_r \in M$, $(P_r \neq P_i, P_r \neq P_j)$を一つ定める。

(Step 3) Mの3点部分パターン(P_i, P_j, P_r)と適合度がしきい値C_t以上で整合するWの3点部分パターン(Q_k, Q_l, Q_u)の存在，すなわちP_rに対応するQ_uの存在を調べる。

Step 3でQ_uが存在したとき，Step 1の部分対応Fは，一つのモデル点P_rから支持されたという。したがって，T_t%のモデル点から支持を得るためには$(m \cdot T_t / 100)$個の異なるモデル点から支持が得られるまでStep 2とStep 3を繰り返すことになる。

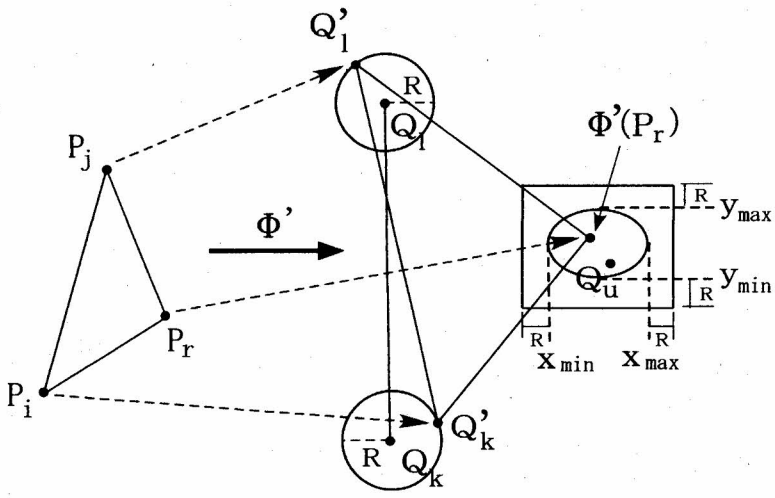
T_t%の支持が得られた場合のみ，部分対応Fを配列表現で記憶する。Step 1におけるQ_kとQ_lをWのすべての点の組合せとすることにより，2点部分パターンS_nに対するすべての部分対応$\{F_l^n\}$が求められる。これを第一世代の部分対応とする。

ここで，Step 3においてP_rに対応するQ_uの存在をWのパターン平面上で調べる方法（調べる範囲の決定方法）について述べる。

3点部分パターンは適合度のしきい値C_t以上で整合すればよいので，図1に示すように，P_iおよびP_jがQ_kおよびQ_lを中心とする半径Rの円上の任意の点Q_k'およびQ_l'にそれぞれ対応するような相似変換Φ'を考える。そのΦ'によってP_rはWの平面上の$\Phi'(P_r)$点に変換される。ここで，Rはモデル点パターンのスケールで設定される適合度のしきい値C_tに対応するW平面上の誤差距離であり，次のように与えられる。

$$R = \sqrt{\frac{1-C_t}{\alpha \cdot C_t}} \cdot \frac{\|Q_k - Q_l\|}{\|P_i - P_j\|}$$

円上の任意の点Q_k'とQ_l'の組合せで定まるすべての相似変換Φ'による$\Phi'(P_r)$の範囲，すなわちx座標，y座標それぞれの最大値と最小値は次のように求



モデル M　　インスタンス W

図1 対応候補点の存在範囲

めることができる。

(1) (P_i, P_j) を (Q_k', Q_l') に変換する相似変換Φ'を求める。ここで，Q_k'のx座標x_k'およびy座標y_k'はQ_kの座標x_k，y_kより

$$x_k' = R\cos\theta_k + x_k$$
$$y_k' = R\sin\theta_k + y_k$$

であり，Q_l'についても，θ_lを用いて同様である。

(2) 次の式を解くことにより，x座標およびy座標の極値を与えるθ_k，θ_lがそれぞれ得られる。

$$\frac{\partial(\Phi'(P_r))_x}{\partial\theta_k}=0\ ,\ \frac{\partial(\Phi'(P_r))_x}{\partial\theta_l}=0.$$

y座標についても同様である。上式で，$(\bullet)_x$は$\bullet$のx座標成分を表す。

(3) このθ_k，θ_lにより定まるΦ'によりP_rを変換することにより，x座標，y座標それぞれの最大値と最小値が得られる。

最後に，Q_uの存在を調べる範囲は，$\Phi'(P_r)$についても誤差距離がRだけ許されるので，上記(3)で得られたx座標，y座標の範囲を上下左右にRだけ拡張した四角形領域（図1参照）として決定される。

W平面上のこの四角形領域を調べ，この中にWの点があれば，これをQ_uとする。実際には，探索範囲が四角形領域であるため，部分対応

$$F:(P_i, P_j, P_r) \rightarrow (Q_k, Q_l, Q_u)$$

に付随する相似変換Φを求め，その適合度がしきい値C_t以上であることを確認する必要がある。

3.2 部分対応の結合

第一世代の部分対応で異なる集合に属する要素（2点部分対応）のすべての組合せに対して，次に述べる結合処理を行い新しい部分対応を構成する。この段階で得られた部分対応を第二世代の部分対応という。

次に，現世代（最初は第二世代）に属する部分対応のすべての組合せに対して結合処理を行い，次世代の部分対応を生成する。この結合処理を新しい部分対応が生成されなくなるまで繰り返す。

結合処理は，小さい部分対応を統合して，適合度を満たすより大きな部分対応を得るものである。

【結合処理】F_i，F_jおよびF_kをそれぞれ

$$[v_1^i, v_2^i, \cdots, v_m^i],\ [v_1^j, v_2^j, \cdots, v_m^j] \text{及び} [v_1^k, v_2^k, \cdots, v_m^k]$$

とする。$v_l^k(l=1\sim m)$を次のように定める。

(1) $v_l^i=v_l^j$ならば，$v_l^k=v_l^i$とする。

(2) $v_l^i=\phi$かつ$v_l^j\neq\phi$ならば，$v_l^k=v_l^j$とする。

(3) $v_l^i\neq\phi$かつ$v_l^j=\phi$ならば，$v_l^k=v_l^i$とする。

(4) その他の場合は処理を中止し，F_kは作らない。

この処理により得られた部分対応F_kに対して適合度$c(F_k)$を求め，これがしきい値C_t以上であれば，新しい部分対応として次世代に残す。

3.3 部分対応の拡張

結合処理により得られた各部分対応F_i，すなわち$[v_1^i, v_2^i, \cdots, v_m^i]$について部分対応$F_k$，すなわち$[v_1^k, v_2^k, \cdots, v_m^k]$を次のように生成する。下記の(2)(3)は$l=1\sim m$について行う。

(1) 部分対応F_iに付随する相似変換Φを求める。

(2) $v_l^i\neq\phi$ ならば，$v_l^k=v_l^i$とする。

(3) $v_l^i=\phi$ ならば，P_lをΦにより変換し，$\Phi(P_l)$点を求める。W平面上で$\Phi(P_l)$を中心とする一辺の長さが2Rの長方形領域内を探索し，$\Phi(P_l)$との距離がR以下で$\Phi(P_l)$に最も近いWの点Q_uを求め，$v_l^k=Q_u$とする。このような点が無い場合は，$v_l^k=\phi$とする。

(4) 得られた部分対応F_kに対して適合度$c(F_k)$を求める。

4．整合実験と考察

ここでは，本整合法を星座のマッチングに適用した実験について述べる。これらの実験では，適合度のスケール定数αは0.15，適合度のしきい値は0.9とした。また，最初に選ぶ2点部分パターンの数Nは3とし，正しい対応であるとする支持率T_tは種々の値に設定し，その効果を検討した。整合処理時間の実測値は，パーソナルコンピュータ（Pentium-4 3.6-GHz，Windows XP，Visual C++言語）で実行した場合の値である。

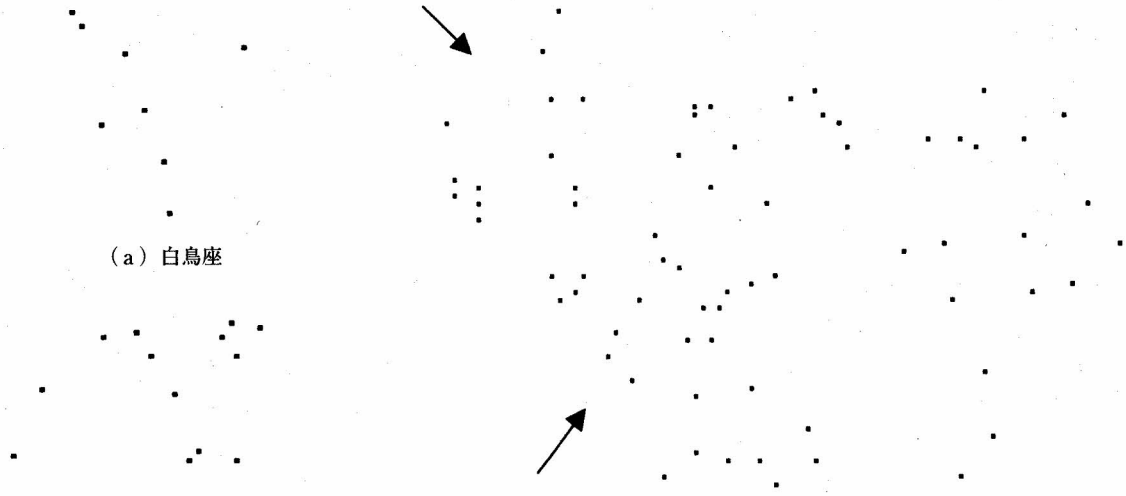
図2 (a)および(b)はモデル点パターンMとして用いた“白鳥座”および“りゅう座”であり，それぞれ8個および13個の点（星）から構成されている。また，図3は対象世界のインスタンス点パターンWであり，先の二つの星座を含む（同図に矢印で位置を示した）63個の点（星）から構成されている。

整合処理時間はT_tの設定により大きく異なる。T_tを50%としたとき，一つの2点部分パターンに対する部分対応の数は白鳥座では平均342個であり，りゅう座では平均258個であった。その結果，全体の整合処理時間は白鳥座が平均0.55秒，りゅう座が平均1.01秒であった。

T_tを80%としたとき，一つの2点部分パターンに対する部分対応の数は白鳥座では平均85個であり，りゅう座では平均15個であった。この場合の全体の整合処理時間は白鳥座が平均0.36秒，りゅう座が平均0.95秒であった。

また，T_tを100%としたとき，一つの2点部分パターンに対する部分対応の数は白鳥座では平均1.8個であり，りゅう座では平均1個であった。この場合の全体の整合処理時間は白鳥座が平均0.34秒，りゅう座が平均0.56秒であった。

一般的に，T_tを大きく設定すると2点部分パターン



（a）白鳥座

（b）りゅう座

図2モデル点パターンの例

図3　インスタンス点パターン

の支持判定に要する時間が増大するが，これは本手法ではインスタンス点パターンの点の数とは無関係である。また，T_tを大きくすると2点部分パターンの部分対応の数が急激に減少する。その結果，次の結合処理の対象となる組合せの数が減少し，全体の整合処理時間が短くなると考えられる。

T_tを100%とすることは，モデル点パターンの当該2点を除く残りのすべての点からの支持を要求することである。したがって，100%の支持が得られる部分対応の数は極めて少数になる。しかし，対応点の欠落（モデル点パターンを構成する一部の点に対応すべき点がインスタンス点パターンに存在しない）がある場合には，この条件は満足されることはなく，整合に失敗することになる。本整合法における計算量については本文中で述べているが，2点部分パターンの整合から始める方法，およびインスタンス点パターンのパターン平面上に対応候補点の存在範囲を求め、その限られた領域内のみを探索することにより対応点を決定する方法，を導入することにより，主な処理の計算量を$O(m \cdot n^2)$とすることができた。

5. むすび

本論文では，筆者が先に開発した点パターン整合法をさらに高速化した改良型点パターン整合法を提案し，星座を用いた整合実験によりその性能を示した。

現在，提案されている他の手法との比較検討を行っている。

点パターン整合アルゴリズムは基本的に点の位置情報のみが利用可能として構成される。しかし，実際には点の属性として明るさや色の情報を用いることができる場合が少なくない。これらの属性により組合せの数を大幅に減少させることができ，より高速な整合処理が実現できる。

参考文献

(1) S. Ranade and A. Rosenfeld, "Point pattern matching by relaxation", Pattern Recognition, vol. 12, no. 4, pp.269-275, 1980.

(2) H. Ogawa, "Labeled point pattern matching by delaunay triangulation and maximal cliques", Pattern Recognition, vol. 19, no. 1, pp.35-40, 1986.

(3) 張　鴻賓，美濃導彦，池田克夫，"順序付けによる点パターンの高速マッチング・アルゴリズム"，情報処理学会論文誌，vol. 31, no. 7, pp.1005-1013, 1990.

(4) 小川秀夫，"部分対応の結合と拡張による点パターン整合"，電子情報通信学会論文誌，vol. J79-D-Ⅱ, no. 6, pp.1176-1180, 1996.

(5) S. H. Chang, F. H. Cheng, W. H. Hsu and G. Z. Wu, "Fast algorithm for point pattern matching: invariant to translations, rotations and scale changes", Pattern Recognition, vol. 30, no. 2, pp.311-320, 1997.

(6) P. B. Van Wamelen, Z. Li and S. S. Iyengar, "A fast expected time algorithm for the 2-D point pattern matching problem", Pattern Recognition, vol.37, no. 8, pp.1699-1711, 2004.

(7) H. Ogawa, "Affine Invariant Partial Shape Matching by means of Unification and Expansion of Local Correspondences", IEICE TRANS. INF. & SYST., vol. E87-D, no. 2, pp.504-508, 2004.

（平成17年9月13日受理）