座標軸の回転を許容した非同期DPマッチングに基づく手書き文字変形モデルの実験的検証

佐々木　徹†　　フォン　ヤオカイ††　　内田　誠一††

† 九州大学大学院 システム情報科学府
†† 九州大学大学院 システム情報科学研究院
〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

あらまし　本論文では回転を許容した非同期 DP マッチングによる手書き文字変形モデルの提案を行う．非同期 DP マッチングとは，特徴の $x-y$ 座標を独立に扱いマッチングを行う手法である．$x-y$ 座標を独立に扱うことで，一つのパターンを変形し複数の異なるパターンを生成することが可能になる．本論文で提案する回転を許容した非同期 DP マッチングとは，非同期 DP マッチングの各時刻において逐一座標軸を回転させながらマッチングを行う手法である．これにより，座標軸の影響を受けないパターンの変形を行うことが可能になる．本論文で提案する手書き文字変形モデルは，特徴の非同期化及び座標軸の回転の組み合わせから成る単純な機構により実現される．

キーワード　時系列パターンマッチング，特徴ベクトル，特徴の非同期化，回転の許容，オンライン文字

1. ま え が き

オンライン文字に代表されるような時系列パターンは，一般的に何らかの特徴ベクトルの時系列として表現される．オンライン文字ではペン先の $x-y$ 座標 [1]，筆記方向と長さの組 [2]，接線ベクトル [3] などがその特徴の例である．オンライン文字以外の例としては，人のジェスチャの場合は各関節の座標，音声では各時刻の短時間スペクトルをなどが挙げられる．本論文ではペン先の $x-y$ 座標を特徴としたオンライン文字の時系列パターンを扱う．

この時系列パターンの特徴ベクトル列をマッチングする手法としてダイナミック・プログラミングを用いたマッチング (DP マッチング) が一般的である [4]．単純な重ね合わせによるマッチングを行った場合，標準パターンと入力パターンの間で時系列の微小なずれ (非線形時間伸縮) により 2 パターンの類似度が急激に低下する．DP マッチングではこの問題に時間軸方向の非線形伸縮を行うことで対応する．マッチング時に入力パターンとの整合性が最もよくなるよう標準パターンの非線形伸縮を行う．これにより DP マッチングでは，時系列におけるずれを吸収したマッチングを実現する．

一般的な DP マッチングでは時間軸方向の非線形伸縮時に各時刻の要素は必ず組として扱われる．例えばペン先の $x-y$ 座標を特徴とするオンライン文字の場合，ある時刻に抽出された特徴量 $(x_l, y_l)^t$ は常に組として扱われ，異なる時刻に抽出された特徴量 $(x_m, y_m)^t$ と組み合わされることはない．これはすなわち，各時刻の特徴量は常に同期的に扱われていることを意味する．

これに対し，特徴量をあえて非同期的に扱う手法である非同期 DP マッチングが二矢川らによってすでに提案されている [5]．この非同期 DP マッチングとは従来の DP マッチングを拡張したものである．非同期 DP マッチングでは，標準パターンの d 次元の特徴ベクトルを，スカラー量の時系列 d 本に分解してマッチングを行う．これにより特徴量の各成分においてそれぞれある程度独立に時間軸方向の非線形伸縮を行うことが可能になる．特徴ベクトルの各成分がそれぞれ異なる非線形伸縮を行った場合，特徴量の同期性は保たれない．すなわちこれは特徴を非同期的に扱ってマッチングを行うことと同義である．この手法はマルチプルアライメント [6] としてバイオインフォマティクスの分野で利用されているアルゴリズムの一種であると言える．

本論文で扱うオンライン文字において，非同期 DP マッチングによる特徴の非同期化は単一の標準パターンの文字から多様な変形文字の生成を可能にする．これは次に示す例により理解できる．2 点 $(0,0)$，$(1,1)$ を結ぶ線分を筆記する時を考える．この時この線分の $x-y$ 特徴の時系列と考え，さらにそれら $x-y$ 特徴を非同期化すると，様々な曲線が得られる．これは各軸方向に対して異なる非線形伸縮を行ったためである．このように，非同期 DP マッチングは，パターンの生成手法の一つと捉えられる．従って文字パターンを対象とすれば，変形文字の生成モデルとして利用できる．このように特徴量を非同期的に扱う手法は音声認識に対して利用されている例は存在する [7] [8] [9]．しかし，非同期化によるパターンの幾何的変形について論じられたものはない．

ただし上述の非同期 DP マッチングによる文字の生成能力には限界が存在する．それは $x-y$ 軸とパターンの位置関係よって変形能力制約されてしまう点にある．例えば，座標軸に対して平行な直線は非同期化では変形できない．一方，上記例のような座標軸に対して45 °の傾

きの直線は非同期化による変形を最も柔軟に行える．このように非同期 DP マッチングによる変形は座標軸の影響を受ける．

この限界の緩和を目的として本論文では回転を導入した非同期 DP マッチングを提案する．具体的には，各時刻で座標軸を回転させ，その座標軸に沿って非同期化を行う．その際の回転角についても，DP の枠組みにおいて，非線形時間伸縮に関する変数および非同期化に関する変数とともに，同時にかつ大局的に最適化を図る．座標軸の回転を行うことで，標準パターンの変形時に上で述べた座標軸の影響をなくせる．本論文ではこの座標軸の回転を許容する非同期 DP マッチングによって標準パターンがどのように変形されるかを実験から考察する．

本論文で提案する文字変形モデルは，手書きにおける変形発生について，その現実的な数理モデルとなる可能性がある．まず非同期化自体が，筆記時にに起こる物理的なずれを模倣していると解釈できる．今回，座標軸の回転角を導入したことで，そのモデルとしての精度をさらに向上できると考えれられる．この回転角にも，筆記に関する物理的な解釈があると筆者らは考えている．例えば，文字を筆記するときの手首の方向との相関である．今後こうした筆記に関する物理との整合性をさらに追求することで，高精度な手書き文字変形モデルを構築できる．本論文はその基礎理論の説明と妥当性の吟味を主眼としている．

2. 同期 DP マッチング

1. でも述べたように，本論文ではペン先の $x-y$ 座標を特徴とするオンライン文字を対象とする．また，本論文では従来の一般的な DP マッチングを非同期 DP マッチングの対を成すものとして同期 DP マッチング (以下，同期 DP) と呼ぶこととする．

あるカテゴリの標準パターン $\boldsymbol{R}$ と入力パターン $\boldsymbol{I}$ がそれぞれ次のような特徴ベクトルの列として定義されているものとする．

$$\boldsymbol{R} = (X_1, Y_1)^t, \ldots, (X_j, Y_j)^t, \ldots, (X_J, Y_J)^t \quad (1)$$

$$\boldsymbol{I} = (x_1, y_1)^t, \ldots, (x_i, y_i)^t, \ldots, (x_I, y_I)^t \quad (2)$$

ここで i, j はそれぞれ特徴点が抽出された時刻を表している．このとき，時刻 j の標準パターンの特徴点と i の入力パターンの特徴点の局所距離 $d(i,j)$ を次のように定める．

$$d(i,j) = \sqrt{(x_i - X_j)^2 + (y_i - Y_j)^2} \quad (3)$$

また，このとき時刻 1 から j までの標準パターンと時刻 1 から i までの入力パターンのパターン間累積距離 $g(i,j)$ を次のように定める．

$$g(i,j) = d(i,j) + \min_{j' \in (j, j-1, j-2)} g(i-1, j') \quad (4)$$

このとき標準パターンと入力パターンのパターン間距離

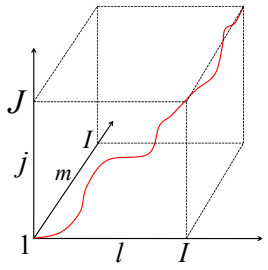


図 1　非同期 DP マッチング

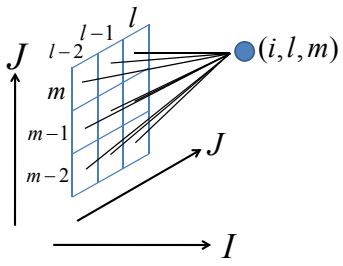


図 2　非同期 DP マッチングにおける傾斜制限

は $g(I,J)$ として与えられ，またそこから式 (4) の最小値選択結果をバックトラックすることで，$\boldsymbol{I}$ と $\boldsymbol{R}$ 間の最適対応関係が求まる．

上記 DP マッチングの計算過程を i, j を軸とする平面で表すと，マッチング結果は同平面上の経路として表される．これはマッチングパスと呼ばれる．このマッチングパスを関数 $j(i)$ で表す．これは，入力パターンの時刻 i の特徴点に標準パターンの時刻 $j(i)$ が対応付けられていることを表す．このとき $g(i,j)$ の計算時に付与した制約条件により，$|j(i) - j(i-1)| \leqq 2$ を満たす．これを傾斜制限というこれは標準パターンと入力パターンのマッチングを行う際に標準パターンが時間軸方向について単調連続性を満たした非線形な伸縮が行われることを意味している．

式 (4) の定義からもわかるように，以上の処理では，$(x_i, y_i)^t$ の $x-y$ 成分を常に同時刻 i で求まった組を単位として利用する．このような扱いは，DP マッチングに関わらず，他のパターン認識法においても一般的である．これに対し以下に述べる非同期化は，特徴ベクトルの要素を独立して扱う点を特徴とする．

3. 非同期 DP マッチング [5]

3.1 手　　法

本章では特徴量の $x-y$ 座標を非同期的に扱いマッチングを行う手法，非同期 DP マッチング (以下，非同期 DP) について述べる．2. で述べた同期 DP マッチングでは特徴点は同時刻に抽出された $x-y$ 特徴を組として維持，すなわち同期的に扱われていた．これに対して，非同期 DP では，$x-y$ 座標を組として扱わず，2 つのスカラーの時系列として扱う．このとき前章で定義した局所距離 d，累積距離 g はそれぞれ次のように再定義される．

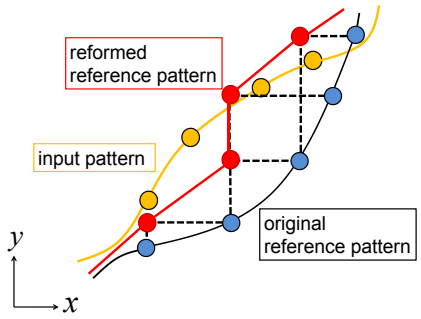


図 3　非同期 DP による変形

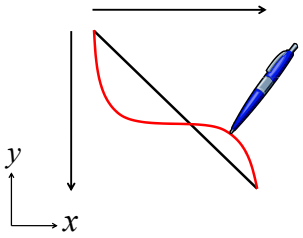


図 4　非同期 DP による変形と筆記の関係

$$d(i,l,m) = \sqrt{(x_i - X_l)^2 + (y_i - Y_m)^2} \qquad (5)$$

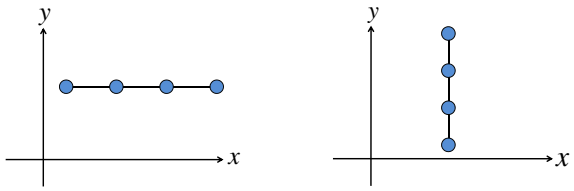
$$g(i,l,m) = d(i,l,m) + \min_{\substack{l' \in (l,l-1,l-2) \\ m' \in (m,m-1,m-2)}} g(i-1,l',m') \qquad (6)$$

このとき $g(I,J,J)$ が標準パターンと入力パターンのパターン間距離になる．また，マッチングパスは各 i に対応付けられた l と m から成るベクトルの列となる (図 1)．非同期 DP の傾斜条件は図 2 のようになる．これより標準パターンの $x-y$ 座標はそれぞれ独立に非線形伸縮を行うため，入力パターンの時刻 i に対応付けられる l と m は $l \neq m$ となる場合がある．これは上述の通り，$x-y$ 座標がそれぞれ非同期に扱われているためである．

3.2　変　　形

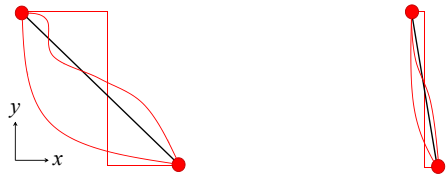
非同期 DP は変形を伴うマッチングである．時刻 i の入力パターンに標準パターンの時刻 l，m が対応付けられている場合を考える．このとき，入力パターンの特徴点 (x_i, y_i) に点 (X_l, Y_m) が対応付けられていることになる．この点 (X_l, Y_m) は，$X_l \neq X_m$，$Y_l \neq Y_m$ の場合，元々の標準パターンに存在しない新たな点となる．この新たな点を利用してマッチングを行うことは，標準パターンを変形しマッチングを行っていることと同義である．その例を図 3 に示した．図中黄線が入力パターン，黒線が変形前，赤線が変形後の標準パターンである．標準パターンが入力パターンに近づくような変形が行われている．

非同期 DP による変形は文字筆記時に発生するずれを適切に吸収する機能を果たすと考えられる．図 4 の例を基に考える．黒線が筆記に際して所望の直線，赤線が実際に筆記した線であるとする．図のように所望の直線からずれて筆記することはしばしば起こる．このときこれ



(a)　(b)

図 5　変形できないパターン．(a)x 軸に平行，(b)y 軸に平行



(a)　(b)

図 6　座標軸に対するパターンの傾きの違い

らの線の筆跡を $x-y$ 軸方向それぞれに対して見たものが図中の黒矢印である．これより両線において各軸方向の筆跡はそれぞれ同じであるとわかる．同じ筆跡であるにも関わらずこの 2 線がずれてしまったのは，これらの各軸方向の筆記速度が異なるためである．すなわち，各軸方向に対して異なる非線形伸縮が発生したためと解釈できる．これより非同期 DP の非同期化による変形はこのずれの発生を再現するものであると考えられる．

3.3　変形の限界

非同期 DP による変形には限界が存在する．3.2 で述べたように入力パターンに対応付けられた点が標準パターンに存在しない点となるのは非同期化に利用する 2 点 (X_m, Y_m)，(X_l, Y_l) において $X_l \neq X_m$ かつ $Y_l \neq Y_m$ の場合である．逆にいえば，$X_l = X_m$ または $Y_l = Y_m$ の場合は既存の点と一致し新たな点とはならない．

図 5 は変形できないパターンの例である．図 5(a) は x 軸に平行なパターン，(b) は y 軸に平行なパターンである．(a) では任意の 2 点で $Y_l = Y_m$ を満たし，(b) では $X_l = X_m$ を満たす．したがって非同期化により標準パターンに存在しない新たな点を作ることができず，パターンを変形することができない．

このように非同期 DP によって対応しうる変形の程度は座標軸とパターンの相対関係によって制約されることになる．この制約は，これまで示した図 5 のような極端な場合に限らず，より一般的に起こるものである．図 6 は直線のパターンを非同期 DP により変形した例である．図 6 の (a)，(b) は座標軸に対する直線の傾きが異なる．ここで黒線は元の標準パターン，赤線は標準パターンの変形例である．このとき，座標軸に対して 45 °に近い傾きを持つ (a) の方が，(b) よりも元の形状から大きく変形できることがわかる．これは座標軸に沿って $x-y$ 座標を組み合わせるときに，座標軸に対するパターンの傾きが大きい方が元のパターンより遠くに点が作られるた

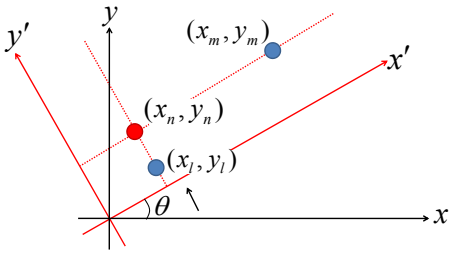


図 7　回転を許容した非同期 DP マッチングによる非同期化

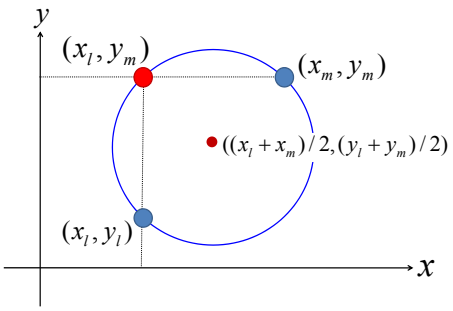


図 8　回転許容 DP で新たに作られる点の軌跡

めである．

4.　回転を許容した非同期 DP マッチング

4.1　手　　法

本論文では，非同期 DP において座標軸を回転させることで変形能力の向上及び変形の限界の緩和を図る．この手法を回転を許容した非同期 DP マッチング (以下，回転許容 DP) と呼ぶ．入力パターンに対応付ける標準パターンの $x-y$ 座標をそれぞれ選出する前にあらかじめ最適な角度 θ だけ回転させておく．このとき，回転してできた新たな座標軸を $x'-y'$ と表す．回転を許容した非同期 DP マッチングは，各入力パターンの特徴点をマッチングする際に，座標軸を逐一適切な角度に回転して作られる座標軸に沿って標準パターンの 2 点を組み合わせる．この様子を図 7 に示す．回転前の座標軸が $x-y$ 軸，回転後の座標軸が $x'-y'$ 軸である．非同期化に利用する 2 点 (x_l, y_l)，(x_m, y_m) を $x'-y'$ 軸に沿って組み合わせ新たな点 (x_n, y_n) を作る．

回転によって作られる新たな点 (x_n, y_n) の存在範囲を考察する．図 7 のように 2 点 (x_l, y_l)，(x_m, y_m) を用いて，$x-y$ 軸から θ だけ回転させた $x'-y'$ 軸に沿って非同期化を行う場合，非同期化によって作られる点 (x_n, y_n) の $x-y$ 平面における座標は次の式で計算される．

$$x_n=(y_l-y_m)\sin\theta\cos\theta+x_l\cos^2\theta+x_m\sin^2\theta \quad (7)$$

$$y_n=(x_l-x_m)\sin\theta\cos\theta+y_l\sin^2\theta+y_m\cos^2\theta \quad (8)$$

この 2 式において θ を媒介変数として消去した場合次の式が求まる．

$$(x_n-(x_l+x_m)/2)^2+(y_n-(y_l+y_m)/2)^2$$

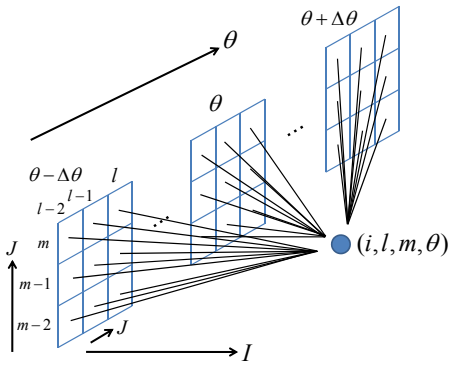


図 9　回転許容 DP における傾斜条件

$$=((x_l-x_m)^2+(y_l-y_m)^2)/4 \quad (9)$$

図 8 に式 (9) による円，すなわち非同期化によって新たに作られる点の軌跡を示す．このように同円は，非同期化に利用する 2 点を直径の両端とする円となる．注意すべきは，この円は回転中心すなわち原点位置とは無関係に定まる点である．以上では便宜上，座標軸の回転という表現を用いてきたが，実質的にはどこを回転中心とするかは影響しない．

4.2　回転許容 DP の計算法

これまでの内容を踏まえ，回転許容 DP における局所距離，累積距離の式を定義する．式 (7)，式 (8) より座標軸を回転してできる新たな点 x_n, y_n を求める式を次の様に定義する．

$$x(l,m,\theta)=(y_l-y_m)\sin\theta\cos\theta+x_l\cos^2\theta+x_m\sin^2\theta \quad (10)$$

$$y(l,m,\theta)=(x_l-x_m)\sin\theta\cos\theta+y_l\sin^2\theta+y_m\cos^2\theta \quad (11)$$

このとき局所距離 d，累積距離 g はそれぞれ次の式で再定義される．

$$d(i,\ l\ ,m,\theta)=\sqrt{(x_i-x(l,m,\theta))^2+(y_i-y(l,m,\theta))^2} \quad (12)$$

$$g(i,l,m,\theta)\ =\ d(i,l,m,\theta)+\min_{\substack{l'\in(l,l-1,l-2)\\ m'\in(m,m-1,m-2)\\ \theta-\Delta\theta\leqq\theta'\leqq\theta+\Delta\theta}} g(i-1,l',m',\theta') \quad (13)$$

式 (13) の $\Delta\theta$ は回転角速度の許容幅を示す．回転許容 DP では座標軸を入力パターンの各時刻毎に逐一回転させる．時刻 i における回転角を決定する際に時刻 $i-1$ での回転角が θ の場合，時刻 i では $\theta-\Delta\theta$ 以上，$\theta+\Delta\theta$ 以下で決定する．回転角速度の制約を設けない場合は $\Delta\theta=90\,^\circ$ となる．これより回転許容 DP には標準パターンの x, y の時間軸と回転角 θ のそれぞれに関する制約条件が付加されていることになる．

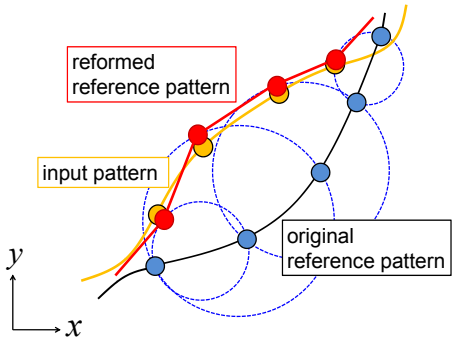
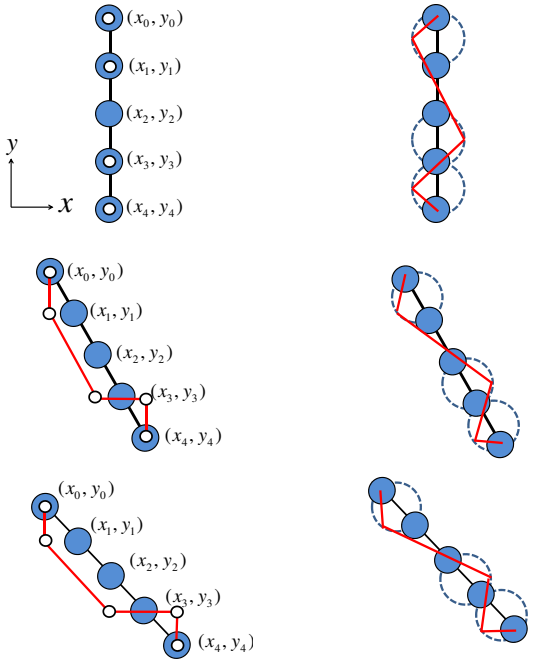


図 10　回転許容 DP におけるパターン変形例



(a)　(b)

図 11　各手法での座標軸の影響．(a) 非同期 DP，(b) 回転許容 DP

4.3　変　　形

図 10 にパターンの回転許容 DP による変形の様子を例示する．図 10 における入力パターン，標準パターンはそれぞれ図 3 と同一のものである．なお，図 10 中の円は図 8 で示した新たな点の作られる軌跡である．

回転許容 DP は非同期 DP と同様に新たな点を作り，その点を利用することで変形を行う．回転許容 DP では標準パターンから適切な 2 つの特徴点を選び，その 2 点を直径とする円上からマッチングする特徴点に最も近い場所に新たな点を作る．図 10 中の青円はこの適切な 2 点を直径の両端とする円を示している．

図 11 には座標軸に対するパターンの傾きが異なる場合のパターンの変形例を示した．図 11 の全ての場合で $(x_0, y_0), (x_0, y_1), (x_2, y_3), (x_4, y_3), (x_4, y_4)$ の点を利用して非同期化を行い変形を行った．これより非同期 DP では傾きが変化するとそれに応じて変形の程度も変化している．一方，回転許容 DP の変形では傾きに関わらず同様に変形できる．この例からも回転許容 DP は座標軸の影響を受けない変形が行えることがわかる．

回転許容 DP における変形は非同期 DP による文字変形同様，文字筆記時に発生するずれを適切に吸収する機能を果たすと考えられる．またこの座標軸の影響を受けない変形は，筆記時のずれを吸収する文字変形モデルとして妥当であると考えられる．回転許容 DP では非同期 DP と同様に標準パターンの特徴を非同期的に扱っている．したがって回転許容 DP の変形でも，各軸方向に筆記速度の違いに起因する非線形伸縮によるずれによって起こる文字変形が再現可能である．

既に見てきたように，非同期 DP に比べ回転許容 DP の方が変形の自由度は高い．自由度の向上は，座標軸の回転により変形に際し座標軸の影響を受けなくなったことによる．非同期 DP においてパターンの変形の程度が最も大きくなるのは，座標軸に対するパターンの局所領域の傾きが 45 °の場合である．回転許容 DP において座標軸の影響を受けなくなったとは，パターンのどの局所領域においてもこの最大の変化を行えるようになったことを意味する．

回転許容 DP は，あくまで非同期 DP を基盤とした手法であるから，非同期 DP でずれの吸収が困難なパターンでは回転許容 DP でも同様に困難である可能性が高い．図 12 に標準パターンと類似度の低い入力パターンとのマッチングによる変形結果を示す．図中の線色等は図 3，図 10 と同様である．これらパターンは y 軸方向の筆跡が異なるため，非同期 DP の変形ではずれを吸収することは困難である．事実，図 12(a) でこのパターン間では非同期 DP による変形ではさほど入力パターンに近づけていない．このとき図 12(b) では (a) の結果よりは入力パターンに近づいているものの，変形結果と入力パターンの類似度は低い．

回転許容 DP による変形は手書き文字変形モデルとして合理的である．1. でも述べたとおり，回転許容 DP は手書きに起因するずれを吸収する非同期 DP 同様の変形が行える．また回転により，座標軸に対する相対関係に依存しない変形が可能になった．さらに，変形の自由度は高いが，上述のように類似度の低いパターンには完全には近づけないので，ある程度の“ 固さ ”も有している．

5.　始点・終点フリー化

文献 [4] で紹介されている始点・終点化を導入する．その導入により，例えば標準パターンの始終点付近を対応付け範囲から除外することが可能になる．したがって書き始め，書き終わりの不安定な筆記状態の個所を除去したうえでマッチングを行えるようになる．

また始点・終点フリー化により，始終点付近の変形の自由度を向上することになる．始終点条件として標準パターンと入力パターンの始点，終点を一致させるとき，非同期化した状態では x, y 座標共に一致させることにな

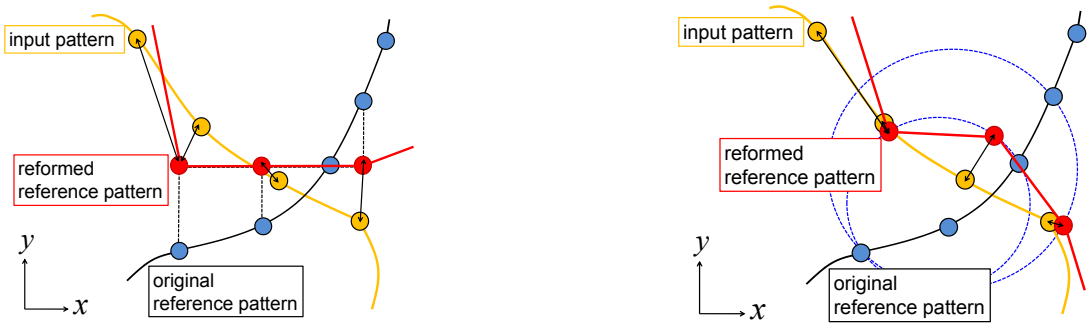


図 12　類似度の低いパターンのマッチング．(a) 非同期 DP，(b) 回転許容 DP

る．すなわち始終点付近では標準パターンの $x-y$ 座標の時刻のずれは小さくなる．一方，非同期 DP 及び回転許容 DP の変形は $x-y$ 座標の時刻のずれによって起こる．抽出された時刻の異なる $x-y$ 座標を組み合わせ新たな点を作り変形を行っていたためである．これらより始終点条件の付加された DP マッチングでは始終点付近の大きな変形は困難である．始点・終点フリー化により，この問題は解消される．

6. 実　　験

手書きパターン対を用いて，非同期 DP，回転許容 DP それぞれの手法でマッチングを行い，本手法によりパターンがどのように変形されるかを調べた．同一カテゴリのパターン対について，一方のパターン (標準パターン) をもう一方のパターン (入力パターン) に近づけることができれば，それだけ回転を許容した非同期化が，変形モデルとして妥当であることを意味する．

6.1 実 験 試 料

実験試料として Ethem Alpaydin Digit を使用した．これは孤立オンライン数字の公開データベースであり，7494 個の学習パターンと 3498 個のテストパターンから構成されている．学習パターンは 30 人，テストパターンは学習パターンとは異なる 14 人の計 44 人の筆記者によるものである．このデータベースを利用するにあたって次の正規化を行った．

（1） ペンアップ部を接続し，一筆書き化

（2） 縦横比を維持し，全体的な線形正規化．サイズを 128×128 とした．

（3） 筆点間の距離が一定になるようにリサンプリング

6.2 実 験 結 果

実験は最もパターン変形の自由度が高い条件下で行った．回転角速度 $\Delta\theta = 90\,^\circ$ とし，文献 [5] で利用されている非同期化に関わる制約条件等は利用していない．

実験結果を図 13 に示す．各実験結果より非同期 DP，回転許容 DP でマッチングを行った結果，標準パターンが入力パターンに近づくように変形されているのがわかる．

図 13(a) は標準パターン，入力パターン共に文字‘ 1 ’の場合の実験結果である．これを見ると同期 DP，非同期 DP は元の標準パターンからさほど変形できていないことがわかる．あまり変形が起こっていない理由は両者で異なる．同期 DP はその性質上，冗長性の変更や始点・終点フリー DP マッチングによる始終点部分の除去による変形しか行うことができない．そのためこの実験結果においても大きな変形は見られない．一方，非同期 DP の実験結果に大きな変形が見られないのは非同期 DP の変形の限界による．この標準パターンには y 軸に対して平行に近い部分が多く存在する．そのため，大きな変形を行うことができなかったと考えられる．

それに対し，回転許容 DP では入力パターンに沿うように変形が行われている．これは回転により座標軸の影響を受けなかったため座標軸に平行であるにも関わらず変形できたと考えられる．また回転許容の結果では始終点付近も入力パターンに近く変形できている．これは始点・終点フリー DP マッチングを導入した効果である．

図 13(c) は標準パターン‘ 0 ’，入力パターン‘ 8 ’のマッチングの結果を示している．この結果では非同期 DP の変形でも入力パターンにかなり近づいており，回転許容 DP ではそれ以上に近づいている．これは回転により新たに作られる点の位置の調整が行われたため，より入力パターンに近づいたと考えられる．また，この結果より両非同期手法で‘ 0 ’の文字が‘ 8 ’に非常に近く変形されている．これにより変形の自由度の高さがわかる．しかし，このように意図しないほどの変形を引き起こしている．

図 13(d) は標準パターンと入力パターンが大きく異なるもののマッチング結果となっている．したがって，非同期 DP の変形では入力パターンには全く近づけていない．回転許容 DP ではある程度近くはなっているが，図 13(a)〜(c) と比べると入力パターンとのずれを吸収しきれていない．4.3 でも述べたように回転許容 DP にももちろん限界があり，元形状を無視したような変形は不可能である．本実験は，特に最も制約条件を緩くした条

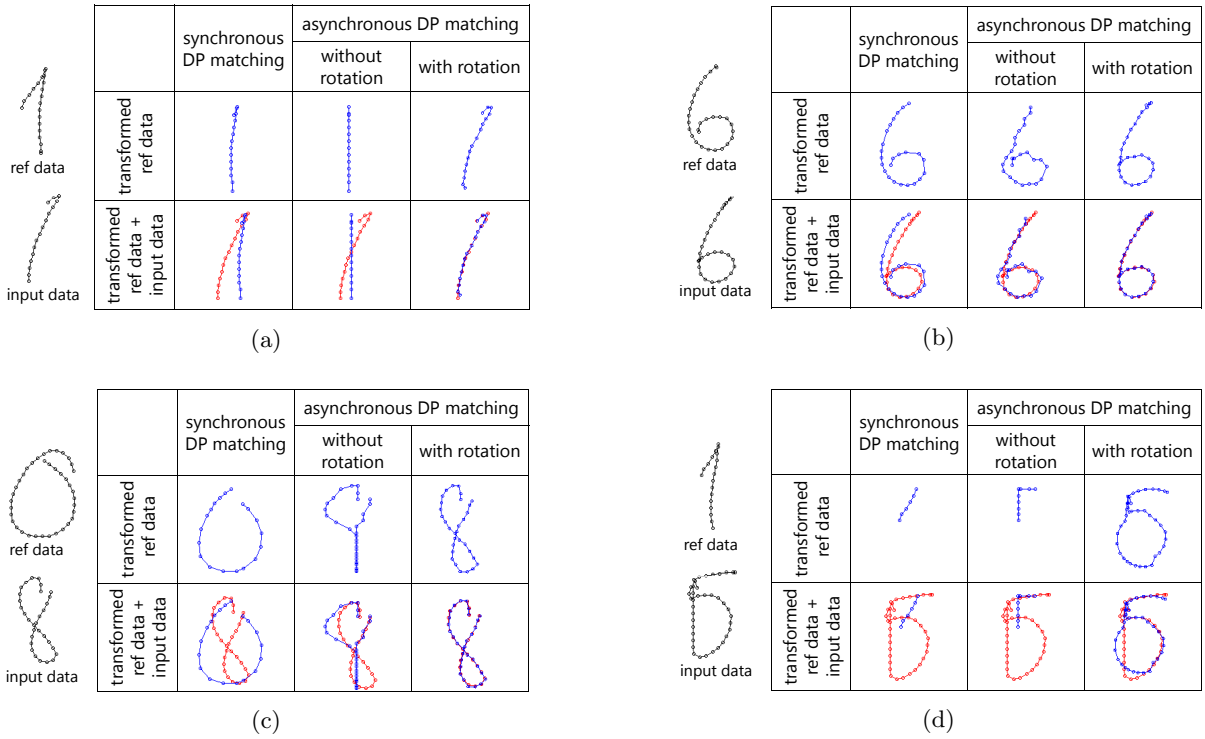


図 13　各手法のマッチング結果

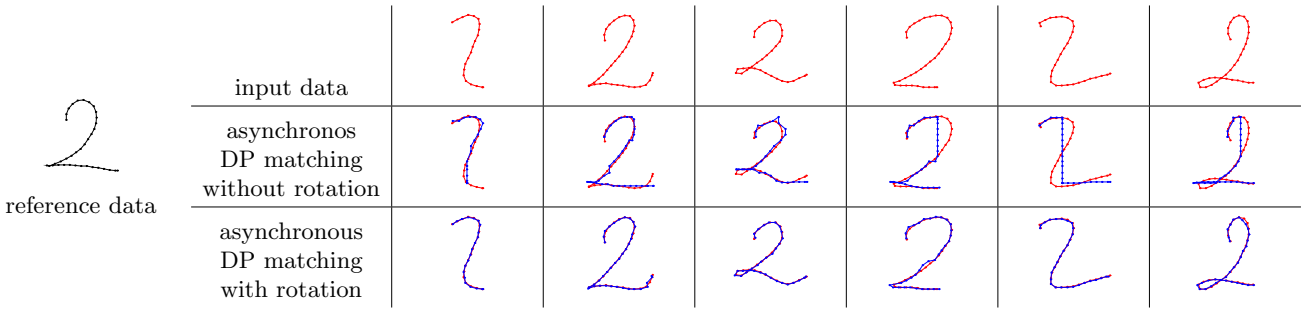


図 14　同一の標準パターンの変形

件下で行ったものであり，したがって他カテゴリーのパターン形状に近づく能力は，制約を強めることでさらに少なくできる．

図 14 には一つの標準パターンを様々に変形させた結果を示している．文字‘ 2 ’であっても筆記者により異なる形状をしている．非同期 DP では完全にはずれを吸収できていないものも存在する．回転許容 DP ではすべての結果でほぼずれが吸収できていている．このように，同じ文字におけるずれを吸収するには十分な変形能力を持っており，本結果は手書き変形モデルとしての妥当性の証左であるとも言える．

7.　まとめと今後の課題

非同期 DP マッチングに座標軸の回転を行うという単純な機構により実現される文字変形モデルの可能性を提示した．座標軸の回転は非同期 DP マッチングの変形において座標軸の影響を排除し，その能力を最大限に引き出すことがわかった．具体的には，同一カテゴリの手書き文字に生じる様々な変形を，非同期化と回転というシンプルな生成操作のみで表現できることを示した．この事実は，同モデルが手書き時に実際の物理的変形発生過程，特に“ 縦横方向での筆記運動の時間的ずれ ”と“ 前記の縦横方向を制御する手首回転 ”を適切に模擬している可能性を示唆している．

今後の課題として，回転を許容した非同期 DP マッチングがどの程度正確に手書き変形発生過程を模擬しているのか，といった生成モデルとしての妥当性追求もある．例えば冒頭で述べたような筆記中の手首と回転角変化の相関などがその例である．これらを求めることにより，手書きモデルとしての高精度化を追求する．また本モデルにおける変形で得られた回転変化や非同期量の変化を精査することで文字変形の個人的あるいは普遍的な変形特性の追求が行えると考えている．

謝　　辞

本研究の一部は，JST 戦略的創造研究推進事業チーム型研究 (CREST)「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」に依った．

文　　献

[1] C. Bahlmann and H. Burkhardt, “The Writer Independent Online Handwriting Recognition System Frog on Hand and Cluuster Generative Statistical Dynamic Time Wraping, ” IEEE Trans. on PAMI, Vol.26, No.3, pp.299-310, 2004.

[2] K.Yoshida and H.Sakoe, “Online Handwritten Character Recognition for a Personal Computer System, ” IEEE Trans. on CE, Vol.CE-28, No.3, pp.202-209, 1982.

[3] 藤原塩和，池田克夫，富永善治，清野武，” 接線ベクトル列を用いたオンライン手書き文字の認識，” 情報処理, Vol.17, No.3, pp.191-199, 1976.

[4] 内田誠一，“DP マッチング概説 ～基本と様々な拡張～, ” 信学技報, PRMU2006-12, 2006.

[5] 二矢川和也，内田誠一，迫江博昭，“パターンマッチングにおける特徴量の非同期化の影響 —オンライン文字認識を例として—，” 信学技報, PRMU2006-262, 2007.

[6] 杉原厚吉，室田一雄，山下雅史，渡辺治，バイオインフォマティクスの数理とアルゴリズム，共立出版, 2007.

[7] M. Brand, N. Oliver, and A. Pentland, “Coupled Hidden Markov Models for Complex Action Recognition,” CVPR, 1997.

[8] S. Matsuda, M. Nakai, H. Shimodaira, and S. Sagayama, “Asynchronous-transition HMM,” ICASSP, 2000.

[9] A. V. Nefian, L. Liang, X. Pi, L. Xiaoxiang, C. Mao and K. Murphy, “A Coupled HMM for Audio-visual Speech Recognition,” ICASSP, 2002.

[10] Seiichi Uchida, Toru Sasaki, Feng Yaokai “A Generative Model for Handwritings Based on Enhanced Feature Desynchronization,” ICDAR, 2011.

付　　録

1. 文字認識への応用

本章では本手法を文字認識に応用した場合の結果について述べる．これに関しては [10] でも触れられている．文字認識用のデータとして 6. で利用したデータセットを利用した．標準パターンとして各文字 10 個の計 100 個，入力パターンとして各文字 300 個の計 3000 個のパターンを用意した．また，過度な変形 (以下，過変形と呼ぶ) を防止する手法としてずれ制約及び回転角制約を導入した．

ずれ制約とは，非同期 DP にて利用する 2 点の選択に制約を設けるものである．非同期 DP にて利用する 2 点が抽出された時刻の差 (これをずれと呼ぶ) が大きいほど変形の程度が大きくなる．ずれに一定以上にならないよう制約を設けることで変形の程度を調整できると考えられる．本章で示す実験結果はずれ制約の幅を 5 に設定したものである．

回転角制約とは，回転許容 DP において回転角に制約を与えるものである．非同期化を行った後に回転を行うことで，新たに作られる点が図 8 に示した軌跡上にできる．この回転の角度に制約を設けることで，新たな点が作られる軌跡を図 8 の一部に制限することができる．これを図 A·1 に示した．なお，図 A·1 では回転角を θ_{Max} に制約した．本章で示す実験結果は回転角制約として

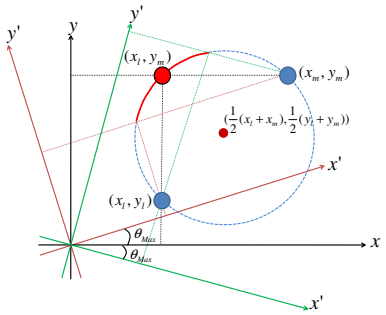


図 A·1　回転角制約をした場合の新たな点が作られる軌跡

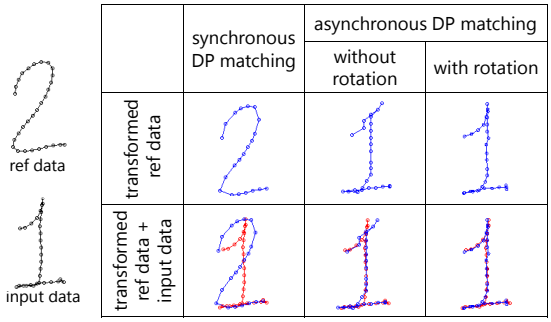


図 A·2　各手法での文字誤認識比較

$\theta = 0, \pm 10, \pm 20$ のみを許容した．

以上の条件下で行った実験における認識率は，同期 DP が 94% ，非同期 DP が 88% ，回転許容 DP が 85% となった．これより，同期 DP に比べ非同期 DP，回転許容 DP は認識率が低下していることがわかる．これは実験で用いた制約条件が緩すぎることから，過変形を防止できていないことによることがわかった．

その例を図 A·2 に示す．図 A·2 に示す入力パターンは同期 DP，非同期 DP では正しく認識されたが，回転許容 DP では誤認識となったものである．また同図に示す標準パターンは回転許容 DP でマッチングされた標準パターンである．認識実験時には，同期 DP，非同期 DP は異なる標準パターンがマッチングされたが，ここでは比較のために全手法でここに示す標準パターンとのマッチング結果を示している．

図 A·2 より，非同期 DP，回転許容 DP ともに入力パターンに近づくような変形が行われていることがわかる．これより，ずれ許容幅の設定が適切でなかったと考えられる．また回転許容 DP の方が非同期 DP よりさらに入力パターンに近づいていることから，回転に関する制約も適切でないと理解できる．

本実験では，全ての範囲において一様にずれ制約幅及び回転角制約を設定したのが不適切であったと考えている．ずれや回転角が大きくなるのは，文字が大きく変形される箇所であるが，文字には変形が起こりやすい部分と起こりにくく部分が存在し，それらを考慮せずに一様な制約を行ったことで過変形を防げなかったと考えられる．これより本手法を文字認識に応用するには，過変形を防止する非一様な制約条件が必要であると考えられる．