

# 交差並進誤差法によるオンライン書字照合

## On-line Handwriting Verification by Cross Translation Error Method

真部 雄介<sup>\*1</sup>  
Yusuke Manabe

チャクラボルティ・バサビ<sup>\*2</sup>  
Basabi Chakraborty

<sup>\*1</sup> 千葉工業大学 情報科学部  
Chiba Institute of Technology

<sup>\*2</sup> 岩手県立大学 ソフトウェア情報学部  
Iwate Prefectural University

In our previous works, we have proposed cross translation error method, which is a novel dynamic similarity measure for time series. This paper aims to apply and evaluate our proposed measure to on-line handwriting verification. In order to evaluate the efficiency, various simulations have been done by artificial time series or benchmark data set for on-line handwriting. As the result, our proposed measure is found to be better on computational cost and the average for distance calculation of trajectories against Dynamic Time Warping (DTW) based measure.

### 1. はじめに

オンライン書字照合とは、人間が任意の文字を書く際の筆跡軌道や筆圧、筆速などの時系列変化を利用した個人認証手法であり、広く研究が行われている[Komiya 2001][Lee 1996][中西 2004][Zhao 1996]. オンライン書字照合で最も重要なことは、上述したような時系列の動的特性の類似性(または差異)を適切に評価することである。我々は、現在までに非線形時系列解析の分野で用いられている決定論的検定手法を応用した交差並進誤差(Cross Translation Error, CTE)法を提案し、アルゴリズムの改良や分析を進めてきた。本研究では、その CTE 法を紹介し、オンライン書字照合問題への適用を目的とした新たな追加実験および分析の結果を報告する。

以下に本論文の構成を示す。2 節ではオンライン書字照合の概要を示し、動的類似性評価法の必要性について述べる。3 節では、提案手法である交差並進誤差法のアルゴリズムについて記述する。4 節および 5 節では、評価実験について述べる。そして最後にまとめと今後の課題について述べる。

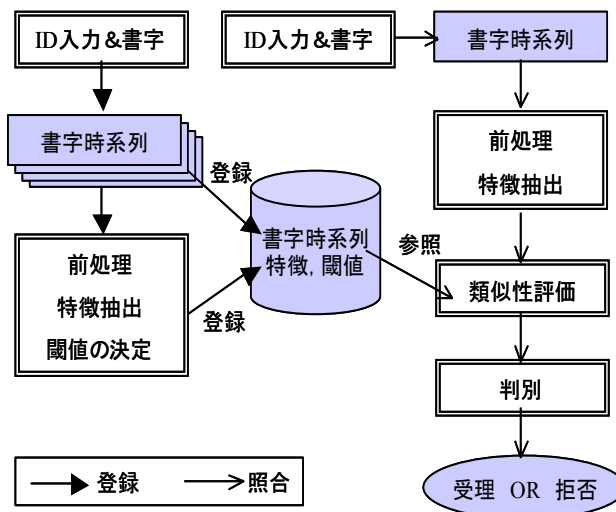


図1 オンライン書字照合の流れ

## 2. オンライン書字照合

### 2.1 概要(一般的な処理の流れ)

オンライン書字照合の流れを図 1 に示す。処理は登録と照合の 2 つに大きく分けられる。登録処理では、ユーザに文字列(サインなど)を複数回書かせ時系列を取得する。取得可能な時系列は、文字軌道( $x, y$ )、筆圧、ペンの傾き角度などである。取得した時系列は、前処理や特徴抽出などの処理後、ユーザ ID とともにデータベースに格納される。照合処理は、ユーザに ID の入力とともに登録した文字列を書かせ、時系列を取得する。取得した時系列と登録されている時系列の特徴を比較し、その類似度が一定の範囲内であれば受け入れ、そうでなければ拒否(棄却)する。一般的なユーザ認証の手順と等価であるが、登録文字列の形状だけではなくその書き方まで含めた情報を利用するため、高いセキュリティを確保できる。

### 2.2 前処理

前処理では、文字の大きさや書字位置への依存を除去するためのスケーリングやノイズ低減、冗長な点を間引きサンプリングなどが行われる。

### 2.3 特徴抽出

特徴抽出処理では、時系列の最大値や最小値、平均値などの統計量を用いるもの[Lee 1996]と、ウェーブレット変換などによって時系列を変換するもの[中西 2004]に分けられる。前者は、その後の類似性評価が容易になるという利点があるが、動的な情報の損失につながる。そのため、取得した時系列をそのまま全てデータベースに登録して用いることも多い。

### 2.4 閾値の決定

閾値の決定では、本人と他人の判別の境界となる類似度の値を決定する。この値の決定は、類似性評価方法に依存する。また、一般的に他人のデータが得られない状況で決定する必要があり、一般的なパターン認識問題とは状況が異なる。

## 2.5 類似性の評価

類似性評価では、何らかの統計量で作られるベクトルを評価する場合と時系列を評価する場合で状況が異なる。前者は、ユークリッド距離などを用いてベクトル間の類似度を容易に評価できる。一方、後者は時系列と時系列の間の類似度を評価する必要がある。一般的に書字時系列は、ゆらぎや伸縮を含んでいるため、いかに時系列間の動的類似性を評価するかが重要な要素となる。最もよく用いられる方法は、Dynamic Time Warping (DTW)法である[Komiya 2001][Zhao 1996]。DTW法は、長さの異なる時系列間の伸縮を吸収して距離(厳密には距離ではない)を計算できるため、有効な方法であるが、一般的に時系列長の2乗のオーダーで計算コストが増加することが知られている。

## 3. 提案手法: 交差並進誤差法

非線形時系列解析分野で用いられている並進誤差法は、Kaplan と Glass によって提案され、Wayland らによって改良が加えられたものが広く用いられている[合原 2000][松本 2002]。本研究で用いるアルゴリズムも Wayland のアルゴリズムを踏まえたものである。並進誤差法は、時系列の決定論性を検定するアルゴリズムであり、単一の時系列内において計算される値である。我々は、これを異なる 2 つの時系列間において計算できるように修正した交差並進誤差法を提案している[真部 2006][真部 2007]。以下、その計算方法について記述する。

### 3.1 遅延座標系への埋め込み

交差並進誤差を計算するためには、まず、時系列を多次元遅延座標系へ埋め込む必要がある。遅延座標系への埋め込みは、対象時系列を  $s(t)$  とすると以下の式であらわされる。

$$v_s(t) \equiv \{s(t), s(t+\tau), \dots, s(t+(m-1)\tau)\}$$

ここで、 $m$  は埋め込み次元、 $\tau$  は遅れ時間と呼ばれ、事前に決定する必要のあるパラメータである。非線形時系列解析の観点からこれらのパラメータを推定する実際的な方法がいくつも提案されているが、本研究のような時系列間の評価にとって有効なパラメータの推定方法はなく、この点については今後の課題である。

### 3.2 交差並進誤差のアルゴリズム

交差並進誤差法の手順を以下に示す。

1. 前処理後の書字時系列 ( $N$  回分) を遅延座標系へ埋め込む。

$$v_{s_i}(t) \equiv \{s_i(t), s_i(t+\tau), \dots, s_i(t+(m-1)\tau)\} \quad (i=1, \dots, N)$$

2.  $a$  回目および  $b$  回目の書字時系列から作られる遅延座標ベクトルをそれぞれ  $v_{s_a}(t)$  および  $v_{s_b}(t)$  とする。
3.  $v_{s_a}(t)$  ( $t=1, 2, \dots$ ) からランダムに1つベクトルを選択する。 ( $v_{s_a}(k)$  とする)
4.  $v_{s_b}(k)$  と最も近傍のベクトルを  $v_{s_b}(t)$  ( $t=1, 2, \dots$ ) から1つ選択する。 ( $v_{s_b}(k')$  とする)

5. 選択された2つのベクトルについて、1 ステップ後の軌道変化を計算する。

$$V_{s_a}(k) = v_{s_a}(k+1) - v_{s_a}(k)$$

$$V_{s_b}(k') = v_{s_b}(k'+1) - v_{s_b}(k')$$

6.  $V_{s_a}(k)$  および  $V_{s_b}(k')$  より以下の交差並進誤差を計算する。  $\bar{V}$  は  $V_{s_a}(k)$  と  $V_{s_b}(k')$  の平均ベクトルである。

$$e_{trans} = \frac{1}{2} \left( \frac{|V_{s_a}(k) - \bar{V}|}{|\bar{V}|} + \frac{|V_{s_b}(k') - \bar{V}|}{|\bar{V}|} \right)$$

7. 手順 3 から手順 6 を  $L$  回繰り返し、 $L$  個の  $e_{trans}$  のメディアンを求める

$$M(e_{trans}) = \text{Median}(e_{trans}^1, \dots, e_{trans}^L)$$

8. 手順 7 を  $Q$  回繰り返し、 $Q$  個の  $M(e_{trans})$  の平均を最終的な交差並進誤差とする。

$$E_{trans} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q M_i(e_{trans})$$

手順 7 および 8 は、手順 3 におけるランダムサンプリングの統計誤差を抑えるために行われる。

近傍ベクトルの探索は注意が必要である。異なる時系列間でうまく並進誤差を計算するためには、時系列発生時刻を考慮する必要がある。そこで、我々のアルゴリズムでは、時系列発生時刻のタイムスタンプ(正規化した時間インデックス)付の  $m+1$  次元の遅延座標ベクトル(拡張遅延座標ベクトル)を作成し、そのベクトル間のユークリッド距離によって近傍ベクトルを探索する方法を用いる。拡張遅延座標ベクトルは以下の式であらわされる。

$$v_{s_i}(t) \equiv \{s_i(t), s_i(t+\tau), \dots, s_i(t+(m-1)\tau), t/T_i\}$$

これによって、時系列の異なる局所部分間の比較を防ぐことができる(時刻を考慮しないと、「トマト」という文字列を書くことによって得られた2つの書字時系列間で並進誤差を計算するような場合、1文字目の「ト」と3文字目の「ト」を比較してしまうことが起こり得る)。

## 4. 評価実験1: 計算コスト分析

提案手法の有効性を検証するために、アルゴリズムの計算コスト分析を行った。比較対象手法は、最も一般的な DTW 法である。

### 4.1 計測方法

計測は、以下の差分方程式(Henon 写像)から人工的に発生させた非線形時系列データ  $x(t)$  を用いて行った。

$$x(t+1) = 1 - ax(t)^2 + y(t)$$

$$y(t+1) = bx(t)$$

初期パラメータを  $a=1.4$ ,  $b=0.3$ ,  $x(0)=y(0)=0.0$  として発生させた同一データを2つ用意し、それら2本の時系列間の動的類似性を評価した。評価に用いた手法は CTE 法と DTW 法である。また、条件を等しくするため DTW 法も遅延座標系への埋め込みを行った多次元時系列を用いて評価を行い、埋め込みの次元数とデータ長に対する計算コストの変化を計測した。

## 4.2 計測結果と考察

まず、データ長および埋め込み次元に対する計算コストの変化を表すグラフを図 2 および図 3 に示す。横軸がデータ長、縦軸が計算時間を表している。CTE 計算のためのパラメータセッティングは  $L = 30, Q = 10$  である。これらのグラフを見ると、DTW の計算時間は、一般的に言われているように指数関数的に増加していく傾向が見られる。一方、CTE の計算量は線形に増加しており、提案手法の優位性が見て取れる。

さらに、CTE 法はパラメータ  $L$  と  $Q$  に対する計算量変化も見ておく必要がある。図 4 および図 5 にその結果を示す。図 4 を得るにあたっては、データ長を 600、 $Q = 10$  と固定し、図 5 を得るにあたってはデータ長を 600、 $L = 30$  と固定して計算している。これらのグラフより、CTE 法は、パラメータ  $L, Q$  それぞれ対しても線形であることがわかる。

## 5. 評価実験 2: 照合精度の検証

もう1つの実験は、交差並進誤差を用いたオンライン書字照合精度の評価である。この実験も、比較対象手法として DTW 法を用いた。

### 5.1 実験の概要

実験には、Signature Verification Contest 2004 (SVC2004) で用いられたデータ (Task2 データセット) を用いた [SVC 2004]。実験に用いた書字時系列の種類は、 $x$  時系列、 $y$  時系列、筆圧 ( $p$ ) 時系列である。また、 $x, y$  時系列から以下の式にしたがって筆速の絶対値 (速さ) を計算し、実験に用いた。

$$|v(t)| = \sqrt{(x(t) - x(t-1))^2 + (y(t) - y(t-1))^2}$$

ただし、ペンの状態がタブレットに接地していない (pen-up) とときは、 $|v(t)| = 0$  とする。

実験の手順を示す。SVC2004 の書字データは、40 人の筆者それぞれについて本人データが 20 セットと他人データが 20 セット含まれている。上記したそれぞれの書字時系列について、本人データの 20 本のうち、前半の 10 本から 5 本を登録用として選択する。そして、後半の 10 本の本人データを正しく受理できるか、20 本の他人データを正しく拒否できるかを評価する。この評価方法を登録用データを変えて 10 回繰り返して行い、最終的な照合結果を得る。

評価方法は、閾値をさまざまな値に変化させて、誤受理率 (False Acceptance Rate, FAR) と誤棄却率 (False Rejection Rate, FRR) の変化を記録し、それらの値が交わったときの等誤り率 (Equal Error Rate, EER) によって評価する。

また、埋め込みパラメータの設定については、今回は  $m$  を {2, 4, 6, 8, 10} の 5 つ、 $\tau$  を {1, 3, 5, 7, 9} の 5 つ用意し、それぞれの組み合わせ計 25 パターンの埋め込みを実践し、それぞれに対して照合実験を行った。紙面の都合上、すべての結果を載せることは不可能なので、40 人の筆者それぞれに対し最も良かった結果を報告する。

### 5.2 実験結果と考察

図 6 に CTE と DTW の EER の比較結果を示す。横軸は 40 人の筆者 ID、縦軸は CTE と DTW の EER の差である。縦軸は、DTW による EER - CTE による EER によって計算しており、

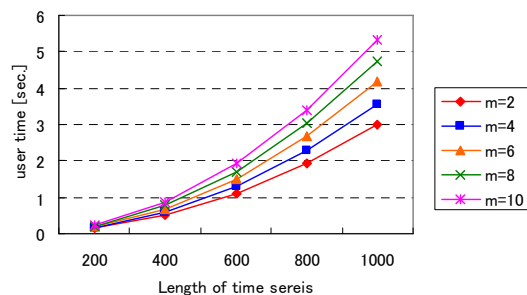


図 2 データ長に対する DTW の計算コスト変化

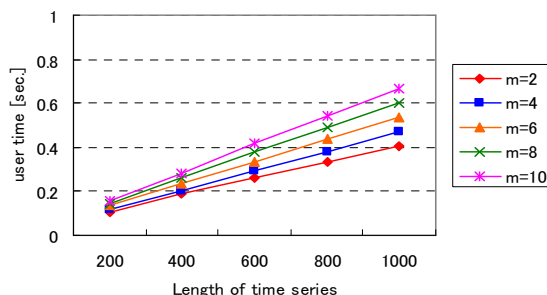


図 3 データ長に対する CTE の計算コスト変化

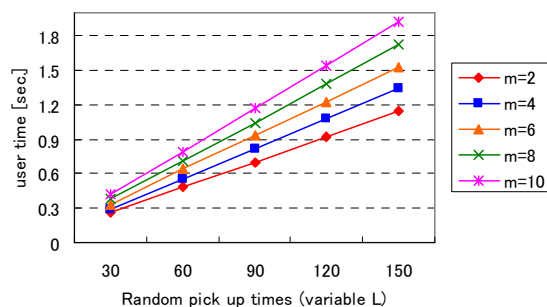


図 4  $L$  に対する CTE の計算コスト変化

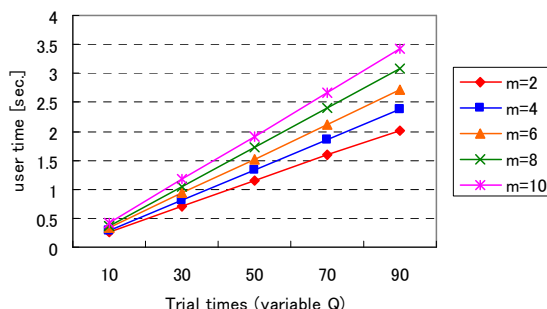


図 5  $Q$  に対する CTE の計算コスト変化

CTE 法が良い照合を実現している場合、棒グラフは上方に (0 より大きく) 伸びる。グラフより、 $x, y, |v|$  の 3 つの時系列で CTE 法の全体的な優位性が見られる。一方、 $p$  時系列に関しては、DTW 法が全体的に良い照合結果となった。それぞれの時系列に対する EER 平均 (筆者別の最良 EER の 40 人平均)

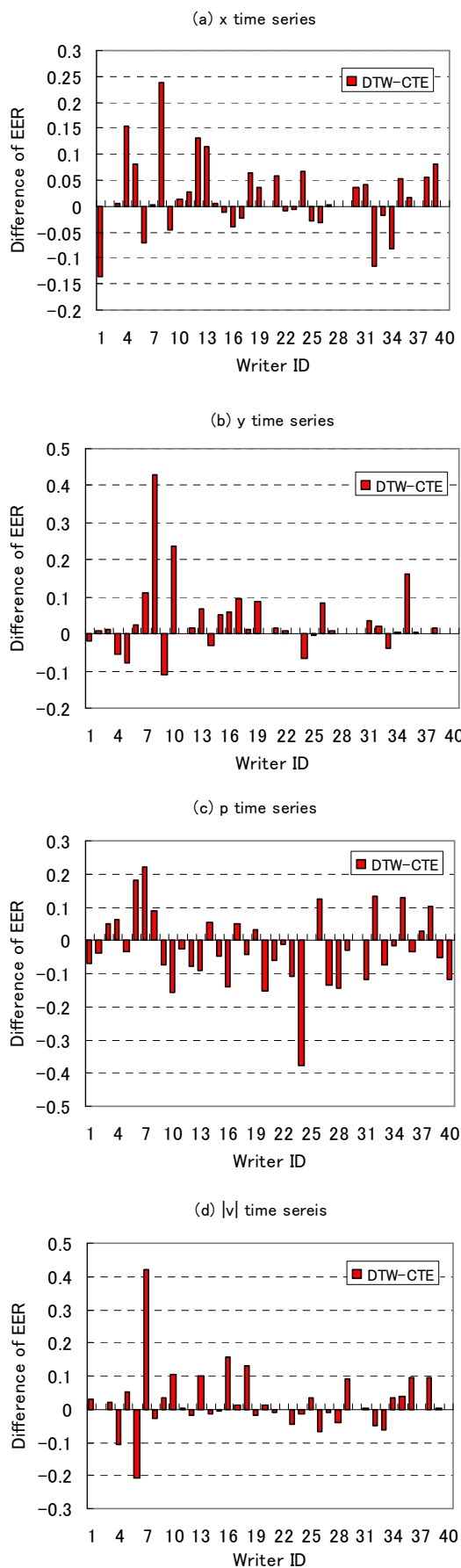


図 6 CTE と DTW の EER の差

は、CTE と DTW それぞれに対し、 $x$  時系列で 0.084 と 0.100、 $y$  時系列で 0.077 と 0.106、 $p$  時系列で 0.112 と 0.087、 $|v|$  時系列で 0.068 と 0.088 となった。この結果から、平均的に見ても提案手法は DTW 法と同等またはそれ以上の照合結果が得られたことがわかる。

## 6. おわりに

本研究では、交差並進誤差法 (CTE 法) をオンライン書字照合に応用した。DTW 法との比較実験の結果、計算コストの面で CTE 法が有利であることを示した。また、照合精度に関しては、DTW 法と CTE 法それぞれに適した時系列がある可能性が見られた。さらに、本報告では詳しく触れないが、DTW 法と CTE 法を併用することにより照合精度が大きく改善されるという実験結果も得ている。決定論性による時系列間の類似性評価という新たな観点を導入できたことにより、マルチモーダルな動的類似性評価の可能性を示すことができたと考えている。

今後は、CTE 法がどのような性質の時系列に対しより有効となるのか研究を進める予定である。また、適切な埋め込みパラメータ推定法の確立も今後の課題である。並進誤差法は、埋め込みパラメータ推定法としても用いられている[松本 2002]ことから、登録書字時系列に対する交差並進誤差の計算結果を用いて効率的に埋め込みパラメータを決定する方法について現在検討中である。

## 参考文献

- [合原 2000] 合原一幸編: カオス時系列解析の基礎と応用, 産業図書, 2000.
- [Komiya 2001] Y. Komiya, T. Ohishi and T. Matsumoto: A pen input on-line signature verifier integrating position, pressure and indication trajectories, IEICE Trans. Information and Systems, Vol.E84-D, No.7, pp.833-838, 2001.
- [Lee 1996] L. L. Lee, T. Berger and E. Aviczer: Reliable on-line human signature verification system, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, No.6, pp.643-647, 1996.
- [松本 2002] 松本隆, 徳永隆治, 宮野尚哉, 徳田功: カオスと時系列, 培風館, 2002.
- [真部 2007] 真部雄介, バサビ・チャクラボルティ: 書字時系列による個人照合における並進誤差特性-照合精度と埋め込みパラメータの関係性-, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 576, pp. 11-16, 3月, 2007.
- [真部 2006] 真部雄介, バサビ・チャクラボルティ: オンライン書字照合のための類似性尺度としての並進誤差の利用, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 259, pp. 53-58, 9月, 2006.
- [中西 2004] 中西功, 西口直登, 伊藤良生, 福井裕: DWT によるサブバンド分解と適応信号処理を用いたオンライン署名照合, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J87-A, No.6, pp.805-815, 2004.
- [SVC 2004] Signature Verification Contest 2004:  
(URL) <http://www.cse.ust.hk/svc2004/>
- [Zhao 1996] P. Zhao, A. Higashi and Y. Sato: On-line Signature Verification by Adaptively Weighted DP matching, IEICE Trans. on Inf. Syst., Vol. E79-D, No.5, pp. 535-541, May, 1996.