

東海大学大学院平成 25 年度博士論文

コンピュータ筆跡鑑定に関する研究

指導 長 幸平 教授

東海大学大学院地球環境科学研究科
地球環境科学専攻

常盤 公德

「コンピュータ筆跡鑑定に関する研究」

要約

科学捜査分野では、遺言書、脅迫文、委任状、契約書、カード署名など、主に紙面に残された文字を対象に鑑定人とよばれる人によって筆跡鑑定が行われている。その鑑定内容は、①他人の文字をまねた模倣や筆跡個性を隠した^{とうかい}鞆晦などの記載方法の識別と、②同一人が筆記したもののか否かを識別する筆者異同識別の2つに分けられる。本研究は、筆者異同識別に関するものである。

現在なされている鑑定人による筆者異同識別では、字画構成、字画形態、運筆状態について、ルーペなどを用いた目視検査や既存の筆跡標本に基づく出現頻度の検査などが実施されている。しかし、それらはあくまで鑑定人の学識と経験による鑑定であり、その客観性についてはときに裁判などで問題となることがある。さらに、裁判員裁判が2009年に開始され、裁判員に対して説明し易い客観的・定量的鑑定の必要性が増しており、この問題はコンピュータによる筆者異同識別により解決が可能であると考えられる。

コンピュータによる筆者異同識別は、バイオメトリックス認証としての筆者照合や筆者認識の研究としてなされているが、次のような問題点がある。第1に、電子ペンなどを用いて書字行動そのものを扱うオンライン型筆者照合に研究が偏っており、その研究成果の多くは、オフライン型すなわち書字行動の結果として得られる筆跡を扱う科学捜査分野の筆者異同識別での利用が困難である。第2に、科学捜査分野への適用性と得られる異同識別精度が両立していない。たとえば、対象筆跡の書体が楷書体で統一されていればある程度の高い識別精度が保たれるが、行書体などの文字が混ざると識別精度は大きく低下する。また、記載状態についても筆記媒体（紙など）が無地で統一されていれば識別精度は保たれるが、模様や重ね書きがあったり、下線や枠線などがあると対応できなくなる。筆記具についても一種類で統一されていれば識別精度が保たれるが、鉛筆、ボールペン、サインペンなどが混ざると識別精度は低下する。さらに、識別法については識別過程が不明確な場合が多々あり、たとえば、ニューラルネットワーク識別法のように学習次第で識別精度の向上は可能であるが、なぜそのような識別結果が得られたかについて説明しづらいという問題がある。

そこで本研究では、科学捜査分野における筆者異同識別を様々な条件の

鑑定対象筆跡に安定的に実用レベルの識別精度で実施でき、かつ、筆者異同識別の過程と根拠を定量的に説明できるコンピュータによる筆跡鑑定法を開発することを目的とした。

第1章では、筆跡鑑定の現状、コンピュータによる筆者異同識別の必要性と問題点、そして、本研究の目的について論じた。

第2章では、科学捜査分野の筆跡鑑定で最もよく使用される漢字を対象筆跡として、筆者異同識別法の基本的な枠組みを構築した。その骨子は、次の4点からなる。第1に様々な状態にある鑑定対象筆跡から安定的に抽出可能な字画の始筆部・転折部・終筆部からなる特徴点を人が採取し、二つの筆跡間の幾何学的マッチング残差を字形の違いを表す特徴量とした。第2に、筆跡そのものの位置・大きさ・回転を安定的・高精度に一致させる新しい正規化法を考案した。第3に、従来の研究ではその発想すらなかった書きむらすなわち個人内変動の抑制処理を考案した。第4に、識別過程が明確で説明し易く、統計的に合理的な結果が安定的に得られる代表的な統計的識別法の一つである最大尤度法を採用した。科学捜査分野において要求される識別精度は、最高レベルで99.9%が1つの目安となっている。構築した筆者異同識別法は4文字を使用したときこの最高レベルの要求識別精度99.9%を達成することを被験者320人の識別実験により示した。

第3章では、前章において実用レベルの識別精度を達成するには個人内変動の抑制が必須であることが判明したことから、個人内変動の抑制に最適な幾何変換モデルについて検討した。検討した幾何変換は、2次等角変換、アフィン変換、疑似アフィン変換、射影変換、2次多項式、3次多項式の6種類である。個人内変動は射影歪みでその多くを説明でき、それゆえ射影変換により個人内変動を大幅に低減できること、また同時に筆跡個性すなわち個人間変動を小さくするような悪影響を与えないことを明らかにした。結果として、検討した6種類の内、射影変換が個人内変動を抑制する最適な幾何変換であることを示した。

第4章では、構築した筆者異同識別法によって得られる異同識別精度の信頼性について論じた。前章までは全標本法とよばれる母集団推定と識別に同じサンプルを用いる方法で精度推定を行った。この方法は識別精度が高めに推定され易いことが知られていることから、全標本法の他に交差検証法、4重交差検証法、一点除外法を用いて識別精度を推定した。いずれの精度検証法においても、4文字を使用したときに99.9%という実用レベルの識別精度が得られることを確認した。また、99.9%という識別精度は統計的信頼度95%で充分有意であることを確認した。さらに、ROCカーブとよばれる照合精度特性を求め、その解析から最大尤度法が決定する識別境界は、統計的に平均識別誤差が最小となる境界となるはずであるが、実

際にはそうになっていない，言い換えると，平均識別精度の向上の余地があることがわかった．

第 5 章では，前章において識別精度向上の余地があることが明確となったことから，さらなる異同識別精度向上の可能性を探った．前章の異同識別精度の信頼性を吟味する過程において，平均識別誤差が最小となる識別境界が実際には選定されていないことがわかった．本章では，まずその原因が，母集団が正規分布をしているという最大尤度法の仮定が実際には満足されていないことにあることを示した．次に，母集団分布に対する仮定を必要としないノンパラメトリックな識別法の代表例である k 近傍法を適用し，得られる識別精度について検討した．識別に 2 文字以上，特に 2, 3 文字を使用した場合， k 近傍法の方が予想通り高い識別精度が得られ，3 文字使用で 99.9% を超えることを確認した． k 近傍法の適用には，十分な数の筆跡サンプルの収集と最適な k の探索が必要となるが，これらが行えた場合， k 近傍法によって識別精度のさらなる向上が見込めることを示した．

第 6 章では，科学捜査分野の筆跡鑑定で扱われているひらがな・カタカナ・数字を含む日本語文字全般に適用できるように提案する筆者異同識別法を拡張した．さらに，字種間での識別特性について論じた．従来，ひらがな・カタカナ・数字は字画構成が漢字に比べて単純なため，鑑定に使用しづらいと言われていたが，いずれの文字種でも 3~4 文字を識別に使用すれば 99.9% を超える実用的な識別精度が得られることを示した．また，従来，定性的にいわれていた書きむらや筆跡個性を個人内変動分布と個人間変動分布として定量的に表すことを可能とし，その解析から①日本語文字は，漢字とひらがなからなるグループと，カタカナと数字からなるグループの 2 つのグループに分けられる，②ひらがなは漢字と同程度の識別精度が得られるばかりでなく，カタカナと数字は漢字よりもむしろより高い識別精度が得られる，など従来の人による鑑定で経験的にいわれている定説とはかなり異なる新しい知見を得た．

第 7 章は結論である．本研究の内容を総括し結びとした．

本研究で提案したコンピュータによる筆者異同識別法は，科学捜査分野で要求される適用性と高い異同識別性能を日本語文字全般に対して合わせ持つばかりではなく，従来の鑑定人の学識・経験によるアプローチとは全く異なる識別過程が合理的で説明し易い客観的・定量的鑑定手段を与えるものである．その意味で本研究は，科学捜査分野における筆跡鑑定のあり方を変革し，大きく貢献するものと期待される．

目次

第1章 序論

1.1 筆跡鑑定の現状	1
1.2 コンピュータによる筆者異同識別の必要性と問題点	5
1.3 本研究の目的	11
1.4 本論文の構成	11
参考文献	14

第2章 字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別法の構築

2.1 はじめに	16
2.2 提案する筆者異同識別法	17
2.2.1 対象筆跡とそのデジタル化	17
2.2.2 字形を特徴付ける特徴点	17
2.2.3 字形の違いを表す特徴量	18
2.2.4 特徴点座標の正規化	20
2.2.5 個人内・個人間変動と異同識別	22
2.2.6 個人内変動の抑制	24
2.2.7 複数筆跡を識別対象とする場合の適用方法	27
2.3 識別実験	28
2.3.1 実験対象の筆跡標本	28
2.3.2 一文字の識別	30
2.3.3 複数文字の識別	35
2.4 本章のまとめ	38
参考文献	40

第3章 個人内変動を抑制する幾何変換モデルの検討

3.1 はじめに	42
3.2 使用する筆者異同識別法	43
3.3 検討した幾何変換モデル	43
3.4 実験	46
3.4.1 識別結果	46
3.4.2 考察	48
3.5 本章のまとめ	58
参考文献	59

第4章	精度検証	
4.1	はじめに	61
4.2	提案手法の基本的な考え方と処理の流れ	62
4.3	検証方法	64
4.3.1	検証実験の方法	64
4.3.2	各精度検証法による識別結果	67
4.3.3	各精度検証法の精度比較	75
4.4	検証結果	75
4.4.1	照合精度特性	76
4.4.2	精度評価レポート	77
4.5	本章のまとめ	79
	参考文献	81
第5章	ノンパラメトリック識別法による筆者異同識別精度の改善	
5.1	はじめに	84
5.2	使用する筆者異同識別法	84
5.3	最大尤度法の問題点とその改善策	85
5.4	筆者異同識別実験	86
5.4.1	筆跡標本	86
5.4.2	個人内・個人間変動分布	86
5.4.3	識別結果	89
5.5	本章のまとめ	92
	参考文献	93
第6章	日本語全般を対象とする筆者異同識別法の構築とその識別特性	
6.1	はじめに	95
6.2	特徴点の抽出	95
6.3	識別実験	98
6.3.1	実験対象データ	98
6.3.2	一文字の識別結果	100
6.3.3	複数文字の識別結果	102
6.4	各字種の識別特性	105
6.4.1	一文字の識別時	105
6.4.2	複数文字の識別時	107
6.5	本章のまとめ	109
	参考文献	111

第 7 章 結論	113
發表論文，学会發表一覽	115
謝辭	118

第1章 序論

1.1 筆跡鑑定 の 現状

近年，地球環境問題について取り上げられることが多くなったが，社会環境にも様々な問題が生じている．とりわけ犯罪は，社会秩序を乱す深刻な問題である．

昨年 2012 年に全国の警察で把握した刑法犯の認知件数は，138 万 2,121 件で前年に比べて 9 万 8,611 件（6.7%）減少した．罪種別では殺人が 2% 減の 1,030 件，詐欺や横領などの知能犯は 1.5% 減の 4 万 114 件，窃盗は 8.2% 減の 104 万 464 件で自転車盗や万引きの減少が目立った．一方強姦は 1,240 件で 4.6% 増加，わいせつ行為などの風俗犯も 9.4% 増えて 1 万 1,927 件，暴行や脅迫などの粗暴犯は 8.9% 増の 6 万 7,183 件であった．認知件数の減少は 10 年連続で，戦後最多を記録した 2002 年の 285 万 3,739 件の半数以下に減少するに至り，140 万件を下回るのは 32 年ぶりとなり，一定の改善がみられている（図 1.1 参照）．

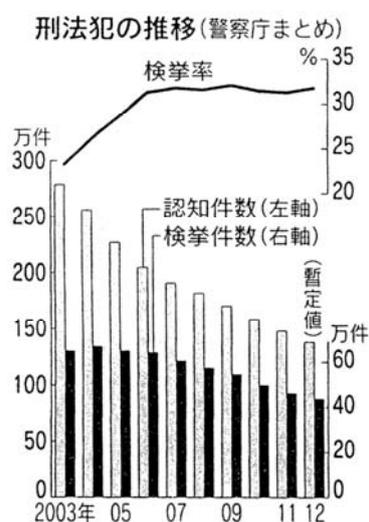


図1.1 過去の刑法犯認知件数と検挙率の推移¹⁾

しかしながら，世論調査などからは，国民は依然として治安に対する不安を感じていることがうかがえる．その背景には児童虐待やストーカー事案，特殊詐欺の被害総額が多額に上るなど，子供や女性，高齢者が被害に

なる犯罪が多発していることがあげられている。また，サイバー空間に目を向けると，サイバー犯罪が多発し，サイバー攻撃が相次ぐなど治安上の脅威が深刻化している。これらの犯罪の多発や脅威の高まりが，刑法犯認知件数の減少にもかかわらず，未だ国民が治安への不安を感じることにつながっているものと考えられている²⁾。

こうした状況下にあつて，警察活動の中における最近の大きな変革は，2009年5月から裁判員裁判が施行され，一般国民の司法参加が決まったことが挙げられる。理解しやすい開かれた司法，客観的な捜査活動，犯罪の科学的根拠に基づく立証が重視されるようになり，科学捜査の重要性が増している。科学捜査は犯罪者が犯行現場に残す情報を分析・解析し，科学的な視点にたつて犯罪者の割り出しや犯罪の証明に寄与することを目的としている。多種多様な犯罪に対応するため，各都道府県警察に配備されている科学捜査研究所（科捜研）が主体となり，各大学や民間の研究所などと協力して実践されており，幅広い様々な学問分野によって支えられている。図1.2に科学捜査分野の簡単な構成図を示す。科学捜査の高度化は，客観証拠による的確な立証を図り，複雑化・巧妙化する犯罪に対応するために，警察に課せられた重要な課題である。

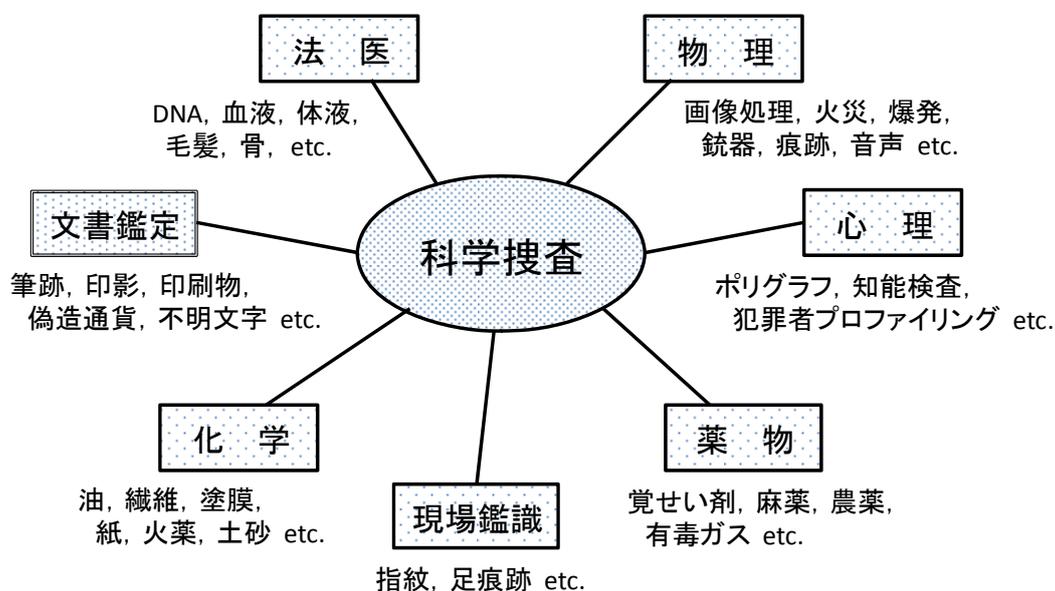


図1.2 科学捜査の各分野

(科学捜査は，法医，物理，文書鑑定，
化学，薬物などの各分野から成り立っている)

本研究は、科学捜査分野の文書鑑定における筆跡鑑定を研究対象としている。筆跡鑑定は科学捜査分野の中において、個人を特定することができる数少ない重要な鑑定の一つである。この鑑定は、遺言書、脅迫文、委任状、契約書、カード署名など主に紙面に残された文字について検査している。その鑑定内容は、①他人の文字をまねた模倣や筆跡個性を隠した^{とうかい}韜晦を含む筆跡の記載方法の識別と、②2つの筆跡が同一人によって筆記されたものかどうかを鑑定する筆者の異同識別（筆者照合）に大別される。本研究では後者の筆者異同識別に注目する。

現在、この筆者異同識別は鑑定人（科学捜査分野では鑑定受託者）とよばれる人によってなされている。鑑定人は主に捜査・鑑識活動で収集される図 1.3(a)に示したような犯罪に使用された証拠物件（鑑定資料）と同図 (b)に示したような筆者が既知の筆跡（対照資料）との比較検査を行う。



(a)鑑定資料

(犯罪で使用されたものであるため基本的に1つしか存在しない)



(b)対照資料

(恒常性を確認するために、複数回記載させる必要がある)

図1.3 鑑定で使用される資料の例

(漢字・ひらがな・カタカナ・数字など日本語全般の文字が鑑定対象筆跡となっている)

その検査は、鑑定人の学識と経験による目視検査が基本となるが、①文書の作成状態や記載年月および汚損状態などを見る文書全体の所見、②文字の震えや加筆など不自然な箇所や作為性について調べる文書全体の検査、③文字の配字をみる文字列の検査、④運筆状態、字画形態、字画構成、筆順、誤字・誤用などを確認する文字の検査といった筆跡鑑定の検査体系に含まれる各種の項目について行われている。特に図 1.4 に示した運筆状態、字画形態、字画構成、筆順の検査は鑑定上欠かすことのできない重要な項目であり、筆跡相互間の比較検査において、このような異なる事象における共通点と相違点についての検査成績を総合した結果として筆者の異同識別がなされている現状にある³⁾。科学捜査分野における筆跡鑑定の基本的な処理の流れを図 1.5 に示した。

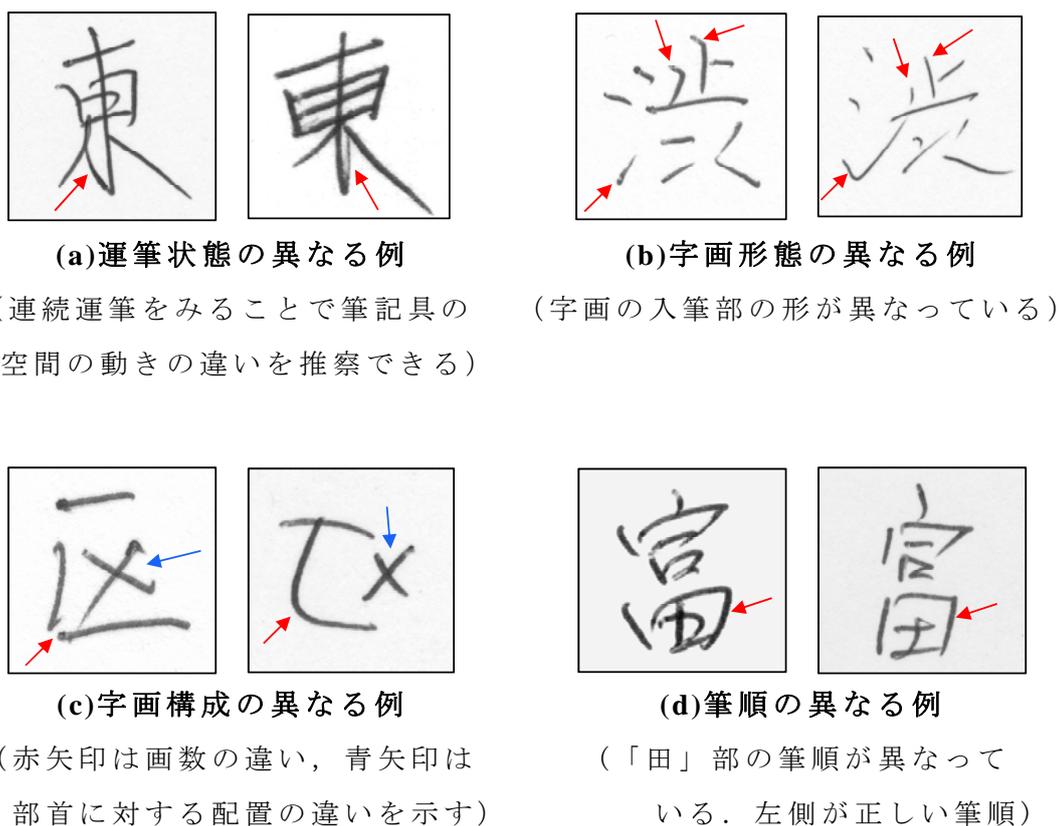


図1.4 鑑定人による筆跡特徴の着眼点

(鑑定人の学識・経験による目視検査が基本となる)

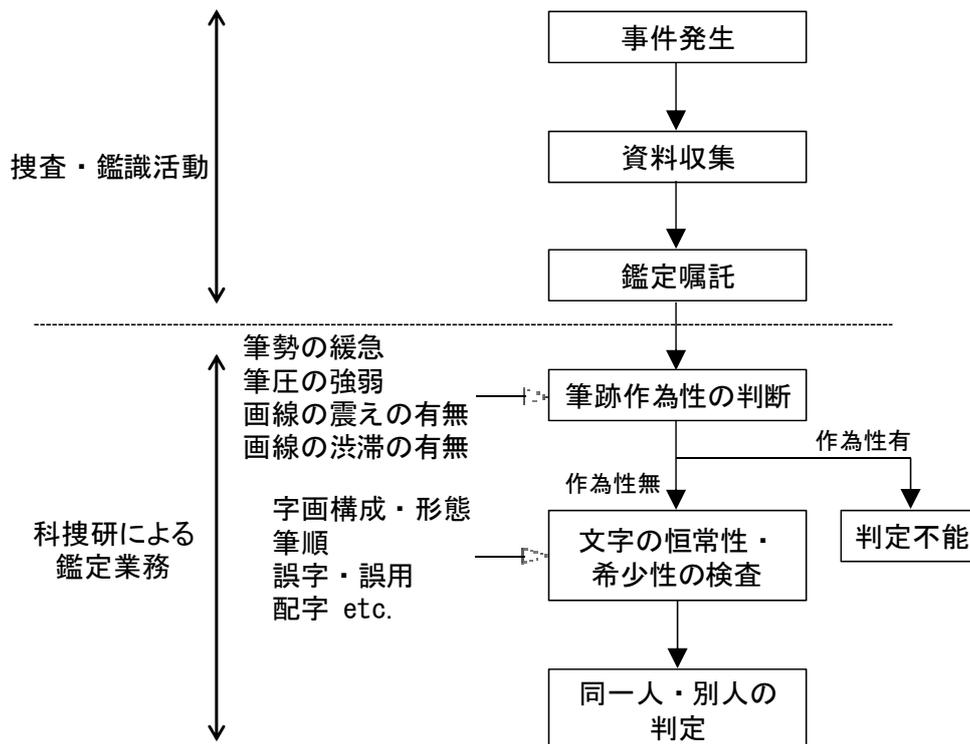


図1.5 科学捜査分野での筆跡鑑定の基本的な処理の流れ

1.2 コンピュータによる筆者異同識別の必要性と問題点

現在の筆跡鑑定は、鑑定人の学識と経験に基づく判定で行われており、運筆状態、字画形態、字画構成についてルーペなどを用いた目視検査や既存の筆跡標本に基づく出現頻度の検査などが実施されている。しかし、これはあくまで鑑定人の学識と経験による鑑定であり、その客観性についてはときに裁判などで問題となることがある⁴⁾。さらに、裁判員裁判が2009年に開始され、裁判員に対して説明しやすい客観的・定量的鑑定の必要性が増しており、この問題はコンピュータによる筆者異同識別により解決可能であると考えられる。

コンピュータによる筆者異同識別は、従来、バイオメトリックス認証としての筆者照合や筆者認識の研究としてなされている。これらの研究は、図1.6中の青丸で示したような電子ペンなどを用いて書字行動そのものを扱うオンライン型筆者照合と、同図中の赤丸で示したような書字行動の結

果として得られる筆跡を扱うオフライン型筆者照合に分かれており，様々な研究^{5)~22)}が古くから継続して行われている．しかし，科学捜査分野での実利用を考えたとき次のような問題点がある．第1に，オンライン型筆者照合に研究が偏っており，その研究成果の多くは，オフライン型を強いられる科学捜査分野の筆者異同識別への利用が困難である．

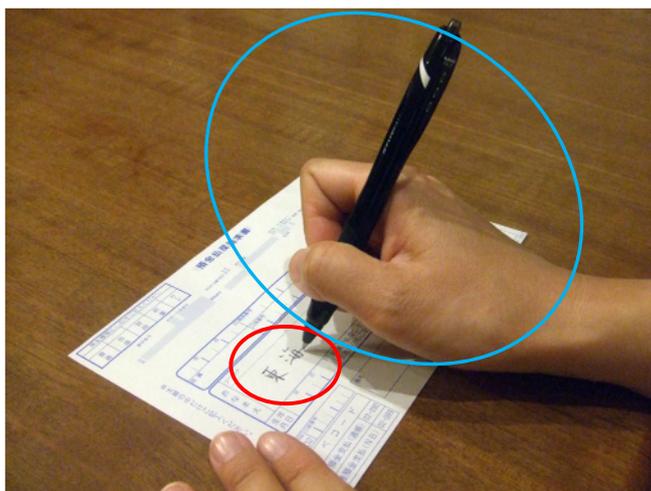
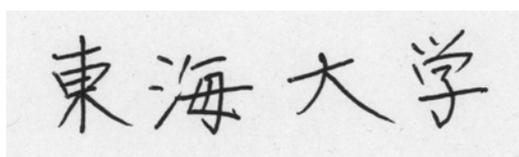


図1.6 オンライン型筆者照合とオフライン型筆者照合の相違

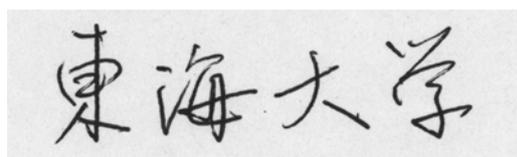
(オンライン型は書字行動そのものを扱い (青丸)，オフライン型は書字行動の一部が固定化された筆跡を扱う (赤丸))

第2に，科学捜査分野への適用性と得られる異同識別精度が両立していないことが挙げられる．たとえば，図1.7(a)，(b)に楷書体と行書体の例を示すが，対象筆跡の書体が楷書体で統一されていれば識別結果としてある程度の高い識別精度が保たれるが，行書体など複数の書体が混ざると識別精度は大きく低下する．



(a)楷書体の例

(字画が一画ずつ分かれている)



(b)行書体の例

(字画が連続し，形状も若干崩れる)

図1.7 書体の種類

記載状態についても筆記媒体（紙など）は，図 1.8 にそのごく一部を示したが無数に考えられ，実際の鑑定においても鑑定資料と対象資料で同じであることは少ない．無地で統一されていれば識別精度は保たれるが，模様や重ね書きがあったり，下線や枠線などがあると対応できなくなる．



図1.8 筆記媒体（紙など）の種類

（筆記媒体は色紙，チラシ，便箋，原稿用紙，
領収書，入金票，レシートなど無数に存在する）

筆記具についても図 1.9 に示したように様々なものが市販され使用されており，オンライン型では図 1.10 に示したような専用の電子ペンが用いられている．図 1.11 は実際の鑑定でよく見受けられる筆記具で記載した例であり，同図(a)～(d)に示したように，筆跡は画線の太さが異なり，様々な色調や濃淡をもったものとなる．また，筆記具はたとえ同種のものであってもインクの成分が異なるなど，鑑定上同一のもので揃えることは困難となる．そのため筆記具に依存しない筆者識別法が重要とされるが，鉛筆，ボールペン，サインペンなど複数の筆記具が混ざると識別精度は低下する．

また，実際の鑑定対象資料には，図 1.12(a)～(e)に示したようにインクの滲みや紙面の皺，複写による画質の変化，指紋採取によって生じる薬剤による汚染，壁に記載された文字など様々な状態の資料が存在するため，適用はより難しくなる．

さらに，識別法については識別過程が不明確な場合が多々あり，たとえば，ニューラルネットワーク識別法のように学習次第で識別精度の向上は

可能であるが、なぜそのような識別結果が得られたかについて説明しづらいという問題がある。

以上のように、従来のコンピュータによる筆者異同識別は、その多くの研究がオンライン型の研究に偏っているうえ、適用性と得られる識別精度が両立していないこと、また判定理由の説明のしにくさなどが科学捜査分野での実利用の妨げとなっている。



図1.9 筆記具の種類

(筆記具は様々なものが市販され使用されている。同種のものでもインクの成分などが異なるものがある)

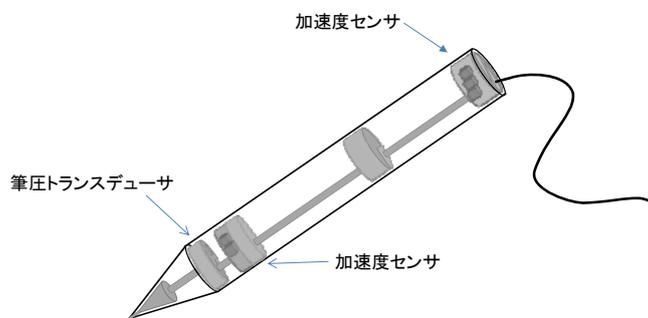
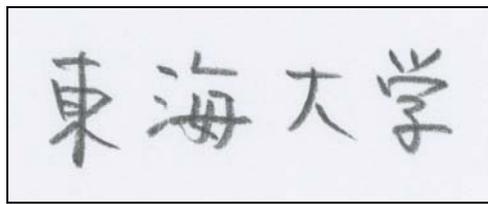
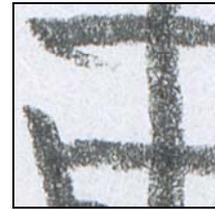


図1.10 オンライン型で使用される電子ペンの例

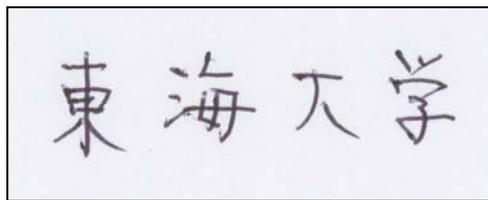
(電子ペンではペン軸方向の筆力や筆加速度が検出できる)



(a)鉛筆での記載例



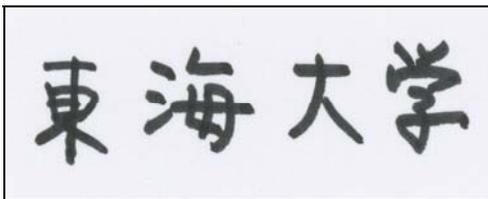
【拡大】



(b)ボールペンでの記載例



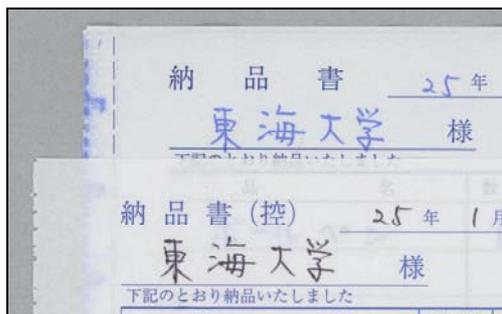
【拡大】



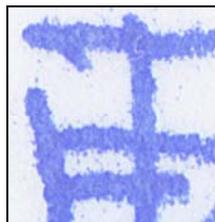
(c)サインペンでの記載例



【拡大】



(d)感圧転写による記載例



【拡大】

図1.11 筆記具の違いによる筆跡例

(筆跡は筆記具などの違いで、画線の太さが異なり、様々な色調や濃淡をもったものとなる)

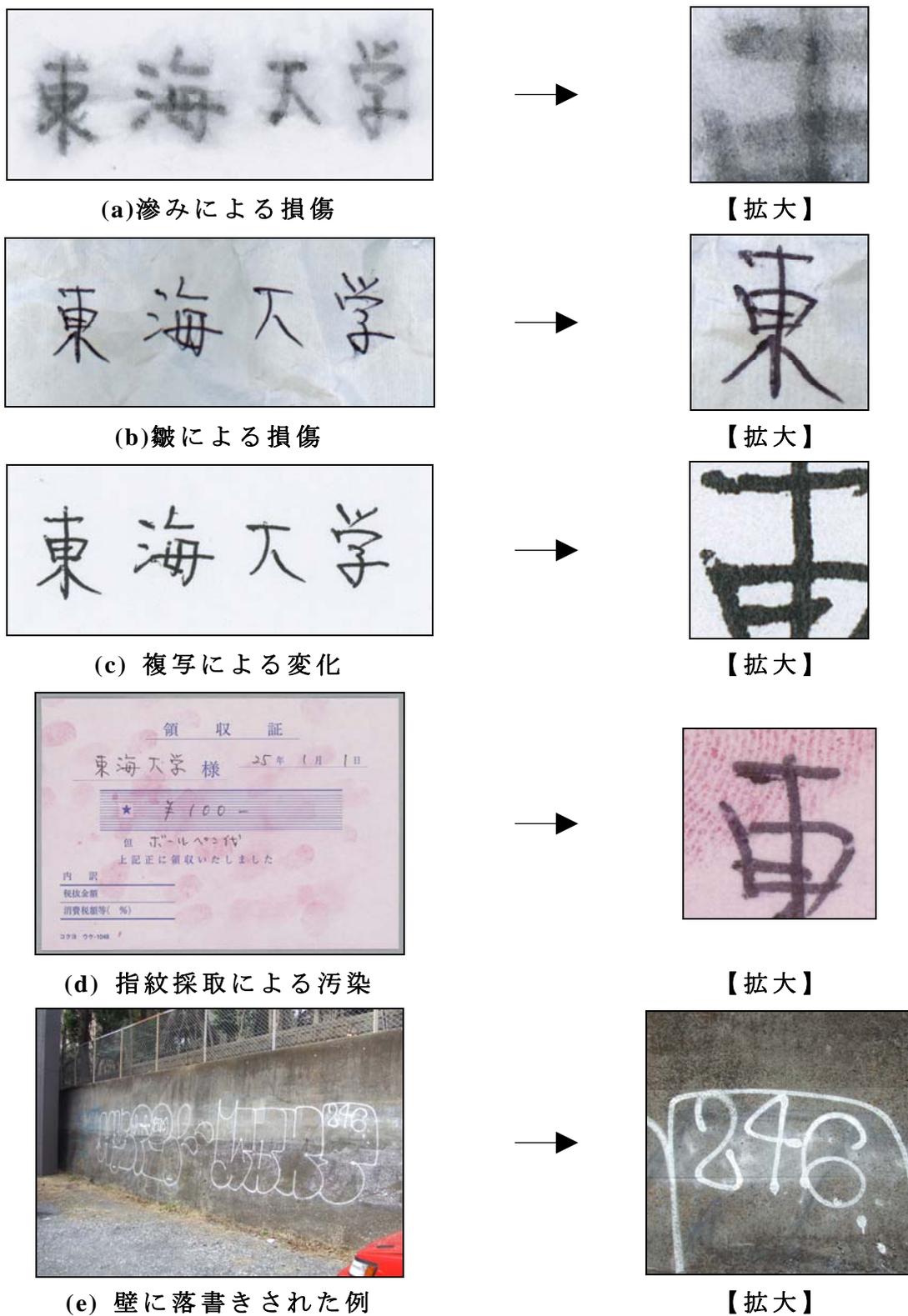


図1.12 実際の鑑定資料の例

(実際の鑑定資料には損傷，画質の変化，汚染されたものなど様々な資料が存在する)

1.3 本研究の目的

科学捜査分野における筆跡鑑定は、上述したように個人を特定することができる鑑定であり、非常に重要な鑑定の1分野をなしているが、同時に技術的問題に直面しており、その解決が望まれている。そこで、本研究では筆者異同識別に注目し、次に示す特性を持つコンピュータによる筆跡鑑定法を開発することを目的とした。

- (1) 様々な条件の鑑定対象筆跡に安定的に対応できる
- (2) 実用レベルの識別精度で異同識別ができる
- (3) 筆者異同識別の過程と根拠を定量的に説明できる

1.4 本論文の構成

本論文は、第1章序論から第7章結論までの7章からなる。本節では第2章から第7章までの概要を示す。

第2章では、科学捜査分野の筆跡鑑定で最もよく使用される漢字を対象筆跡として、筆者異同識別法の基本的な枠組みを構築した。その骨子は、次の4点からなる。第1に様々な状態にある鑑定対象筆跡から安定的に抽出可能な字画の始筆部・転折部・終筆部からなる特徴点を人が採取し、二つの筆跡間の幾何学的マッチング残差を字形の違いを表す特徴量とした。第2に、筆跡そのものの位置・大きさ・回転を安定的・高精度に一致させる新しい正規化法を考案した。第3に、従来の研究ではその発想すらなかった書きむらすなわち個人内変動の抑制処理を考案した。第4に、識別過程が明確で説明し易く、統計的に合理的な結果が安定的に得られる代表的な統計的識別法の一つである最大尤度法を採用した。科学捜査分野において要求される識別精度は、最高レベルで99.9%が1つの目安となっている。構築した筆者異同識別法は4文字を使用したときこの最高レベルの要求識別精度99.9%を達成することを被験者320人の識別実験により示した。

第3章では、前章において実用レベルの識別精度を達成するには個人内変動の抑制が必須であることが判明したことから、個人内変動の抑制に最適な幾何変換モデルについて検討した。検討した幾何変換は、2次等角変換、アフィン変換、疑似アフィン変換、射影変換、2次多項式、3次多項

式の 6 種類である。個人内変動は射影歪みでその多くを説明でき、それゆえ射影変換により個人内変動を大幅に低減できること、また同時に筆跡個性すなわち個人間変動を小さくするような悪影響を与えないことを明らかにした。結果として、検討した 6 種類の内、射影変換が個人内変動を抑制する最適な幾何変換であることを示した。

第 4 章では、構築した筆者異同識別法によって得られる異同識別精度の信頼性について論じた。前章までは全標本法とよばれる母集団推定と識別に同じサンプルを用いる方法で精度推定を行った。この方法は識別精度が高めに推定され易いことが知られていることから、全標本法の他に交差検証法、4 重交差検証法、一点除外法を用いて識別精度を推定した。いずれの精度検証法においても、4 文字を使用したときに 99.9% という実用レベルの識別精度が得られることを確認した。また、99.9% という識別精度は統計的信頼度 95% で充分有意であることを確認した。さらに、ROC カーブとよばれる照合精度特性を求め、その解析から最大尤度法が決定する識別境界は、統計的に平均識別誤差が最小となる境界となるはずであるが、実際にはそうになっていない、言い換えると、平均識別精度の向上の余地があることがわかった。

第 5 章では、前章において識別精度向上の余地があることが明確となったことから、さらなる異同識別精度向上の可能性を探った。前章の異同識別精度の信頼性を吟味する過程において、平均識別誤差が最小となる識別境界が実際には選定されていないことがわかった。本章では、まずその原因が、母集団が正規分布をしているという最大尤度法の仮定が実際には満足されていないことにあることを示した。次に、母集団分布に対する仮定を必要としないノンパラメトリックな識別法の代表例である k 近傍法を適用し、得られる識別精度について検討した。識別に 2 文字以上、特に 2, 3 文字を使用した場合、k 近傍法の方が予想通り高い識別精度が得られ、3 文字使用で 99.9% を超えることを確認した。k 近傍法の適用には、十分な数の筆跡サンプルの収集と最適な k の探索が必要となるが、これらが行えた場合、k 近傍法によって識別精度のさらなる向上が見込めることを示した。

第 6 章では、科学捜査分野の筆跡鑑定で扱われているひらがな・カタカナ・数字を含む日本語文字全般に適用できるように提案する筆者異同識別

法を拡張した。さらに、字種間での識別特性について論じた。従来、ひらがな・カタカナ・数字は字画構成が漢字に比べて単純なため、鑑定に使用しづらいと言われていたが、いずれの文字種でも 3～4 文字を識別に使用すれば 99.9%を超える実用的な識別精度が得られることを示した。また、従来、定性的にいわれていた書きむらや筆跡個性を個人内変動分布と個人間変動分布として定量的に表すことを可能とし、その解析から①日本語文字は、漢字とひらがなからなるグループと、カタカナと数字からなるグループの 2 つのグループに分けられる、②ひらがなは漢字と同程度の識別精度が得られるばかりでなく、カタカナと数字は漢字よりもむしろより高い識別精度が得られる、など従来の人による鑑定で経験的にいわれている定説とはかなり異なる新しい知見を得た。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章までで得られた成果を総括し、本論文の結論とした。

【参考文献】

- 1) 株式会社日本経済新聞社：平成 25 年 1 月 10 日 日本経済新聞朝刊.
- 2) 国家公安委員会・警察庁：“平成 25 年版 警察白書”，pp. 1-58，警察庁（2013）.
- 3) 吉田公一：“筆跡・印章鑑定の実務”，pp.54-82，東京法令出版（2004）.
- 4) 魚住和晃：“筆跡鑑定ハンドブック”，pp.242-244，三省堂（2007）.
- 5) 栗津優作，上田勝彦：“筆跡鑑定支援システムの開発”，電子情報通信学会総合大会論文集，D-11-75, p. 75 (2006).
- 6) 大川 学，丸山 稔：“正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”，第 6 回情報科学技術フォーラム(FIT2007)論文集，pp. 105-106 (2007).
- 7) 鈴木道孝，渡辺秀人，伊藤章義：“一般的な四角形枠による 2 次元の形状正規化”，信学技報，PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 8) 鈴木圭介，塩山忠義：“パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”，信学技報，PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 9) 清田公保，櫻井敏彦，山本眞司：“ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 10) 小高和己，荒川弘熊，増田 功：“ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”，電子通信学会論文誌，Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 11) 田中敬子，安藤慎吾，中島真人：“局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”，信学技報，PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 12) 梅田三千雄，三好建生，三崎揮市：“自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”，電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).
- 13) 福井隆文，梅田三千雄：“背景伝搬法による手書き漢字認識”，信学技報，PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).
- 14) 澤田武志，大橋剛介，下平美文：“視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法”，映像情報メディア学会誌，Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).

- 15) 安藤慎吾, 中島真人: “オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法”, 電子情報通信学会論文誌, No1. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
- 16) 尾崎正弘, 足達義則, 石井直宏: “ファジィ理論を用いた筆者識別”, 電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
- 17) 吉村ミツ, 吉村 功: “DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
- 18) 吉田 恵, 相澤優秀, 鮎川哲也, 小林裕幸: “固有空間法の筆者識別への適用”, 日本鑑識科学技術学会誌, Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
- 19) 菊池真美, 赤松紀男: “高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 20) 宮川 透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳: “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 21) 小宮義光, 松本 隆: “ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”, 電子情報通信学会総合大会論文集, p. 217 (1999).
- 22) 高澤則美: “筆跡鑑定”, 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1-11 (1998).

第2章 字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別法の構築

2.1 はじめに

筆者異同識別に関する様々な研究は古くから継続されてきている^{1)~20)}。しかしながら、これらの研究成果が科学捜査分野において実用されない理由は、その多くの研究がオンライン型の研究に偏っているうえ、適用性と得られる識別精度が両立していないこと、また判定理由の説明のしにくさなどにあることを前章で説明し、本研究の目的が科学捜査分野における筆者異同識別に注目したコンピュータによる筆者異同識別法の開発であることを示した。そこで、本章では科学捜査分野の筆跡鑑定で最もよく使用される漢字を対象筆跡として、コンピュータによる筆者異同識別法の基本的な枠組みを構築する。本章では、オフライン型の筆者異同識別において最も基本的な特徴である字形に注目し、確実に抽出可能な字画の配置パターン（字画を代表する特徴点群）という限られた特徴のみを使用しながらも、個人間変動に大きな影響を与えないような幾何学的変形を施すことにより、個人内変動を抑制し、結果として識別精度の向上を図ることが可能であることを示す。また、その幾何学的変形だけでなく、前処理として一般に行われる文字の切り出し・正規化や識別（照合）に使用する特徴量抽出を、二つの字画の配置パターン間の幾何学的変形（合わせ込み）操作という一つの処理概念に基づいて平易に実行でき、非常にシンプルな筆者異同識別システムを構成することができることも示す。

本章では、提案する異同識別法を2.2において述べた後、2.3においてその方法を適用した識別実験でその効果を確認する。最後に2.4において、提案法の評価をまとめるとともに、今後の課題などを整理する。なお、本章で使用する図表の一部は、参考文献21)に掲載されているものを転載している。

2.2 提案する筆者異同識別法

2.2.1 対象筆跡とそのデジタル化

本章では科学捜査分野で鑑定対象となることが最も多い自由筆記された漢字を対象とする。その筆跡は証拠物件として押収されたものであったり、被疑者により筆記されたものである。筆者が未知の筆跡を検査対象筆跡、筆者が既知の筆跡を対照筆跡とよぶが、これらをそれぞれ未知筆跡と既知筆跡とよぶ。本研究では、その双方が複数収集されていることを想定する。

筆者の年齢は、筆跡個性が定着するとされている 20 歳以上であることも想定する。筆記具としては、特に特定のものを想定しないが、使用されることの多いボールペンや鉛筆を念頭におく。

科学捜査分野における通常の筆跡鑑定では、収集された筆跡を鑑定人がルーペなどを用いて観察しているが、そのデジタル化においては、鑑定人が違和感を覚えない程度の画質が得られることを念頭に、8 ビット程度以上の多諧調かつ 600 dpi 程度以上の高解像度で幾何学的歪みがほとんど無視できるフラットベット型イメージスキャナなどを使用してコンピュータに取り込まれた白黒濃淡画像（グレースケール画像）をコンピュータで実際に扱う標本と想定する。

2.2.2 字形を特徴付ける特徴点

上述したような筆跡標本から、オフライン型において最も基本的な特徴である字形に注目し、安定的に抽出可能な特徴として文字を構成する各字画の筆が入る始筆部、筆が離れる終筆部、そして筆の向きが大きく変わる転折部の 3 種類の点に注目する（図 2.1 参照）。字画の湾曲や反りなどの情報はなくなるが、非常に小さく書かれた筆跡の場合や、紙の折り目上に筆記されている場合など標本の質が低下しているときでも大きな影響を受けにくいことを意図したものである。この 3 種類の点を字形を表す最低限の特徴点とする。これらの特徴点の抽出は自動化が可能と思われるが、人手で特徴点の画像座標を計測するものとする。これは、オフライン型であ

るので自動化のニーズが高くないこともあるが、次のことを意図したものである。第1に、文字が筆記されている紙などに模様などの濃淡がある場合や、印刷文字などの上に重ね書きされているような場合であっても確実に採取できる。第2に、連続筆記されて個々の字画が独立しておらず、特徴点の位置が不明瞭な筆跡も少なくないが、そのような場合に強引に特徴点を採取しないとといった取捨選択ができ、かつどのような特徴点に基づく識別がなされるのかを鑑定人自らが制御・認識できる。

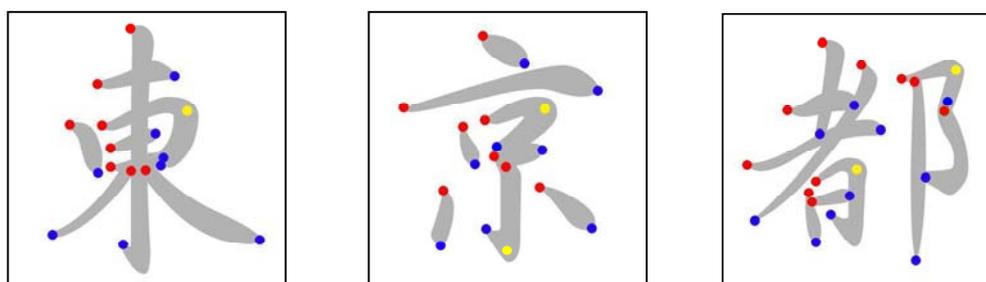


図2.1 特徴点の概念例

(文字を構成する各字画の筆が入る始筆部 (●), 筆が離れる終筆部 (●), 筆の向きが大きく変わる転折部 (●) の3種類の点に注目する)

なお、本章で提案する異同識別法では、2.2.6で後述するように対象とする筆跡から採取される特徴点の数は4点以上あればよく、明確に視認できる特徴点のみを採取するということが可能である。

2.2.3 字形の違いを表す特徴量

各筆跡は一画以上の字画があるので、最低2点以上の特徴点を持つ。識別対象とする二つの筆跡について、一方の筆跡の特徴点群を他方の筆跡の特徴点群に平均的に合わせ込む幾何変換を施したとき、残存する特徴点間の位置ズレ量すなわち幾何変換残差のRMS値(幾何変換RMS残差とよぶことにする)を字形の違いを表す特徴量とする。

使用する幾何変換は、筆跡標本画像全域(すべての特徴点)に対して均一に働く、すなわち一つの座標変換式で行うものである。具体的には、等

方性の拡大・縮小，回転，平行移動が可能な次式に示すヘルマート変換である．ここで (u,v) ， (u',v') が幾何変換前後の座標， k_i ($i=1,2,3,4$)が変換係数である．

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1 u + k_2 v + k_3 \\ v' &= k_1 v - k_2 u + k_4 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

式(2.1)に示した幾何変換式を使用して説明すると，この操作は次のようになる．一般に，2つの筆跡について抽出されている特徴点の数は，不確かな特徴点が採取されていないので同じではない．各字画を代表する特徴点のうち，2つの筆跡において同じように採取されている特徴点が N_p 個（たとえば第1画の始筆部と終筆部，第2画の始筆部，第3画の始筆部・転折部・終筆部の計6点）あったとする．一方の筆跡の特徴点座標を式(2.1)の (u,v) ，他方の筆跡のそれを (u',v') として， $2 \times N_p$ 個の式を連立させ，この連立方程式の未知数である幾何変換係数 k_i ($i=1,2,3,4$)を最小2乗法で求める．

次に，得られた幾何変換式による N_p 個の特徴点座標 (u,v) の変換座標を (u^*,v^*) とすると，本来の変換先座標 (u',v') との残差 (u^*-u') と (v^*-v') を用いて次式で与えられる2点間の距離に関するRMS値 R を算出する．この値 R を幾何学的類似度として算出し，字形の違いを表す特徴量とする．

$$R = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_p} \left\{ (u_j^* - u_j')^2 + (v_j^* - v_j')^2 \right\}} / N_p \quad (2.2)$$

この操作は，図2.2に示すように，単に2つの筆跡を重ねて，幾何学的なズレを見ていることに等しい．同図(a)は，個人内変動抑制処理後の同一人が筆記した2つの筆跡を重ねた例であり，字画パターンの違いが非常に小さくなっている．これに対して同図(b)は，異なる筆者が筆記した筆跡を重ねた場合であり，字画パターンの違いが大きくなっている．したがって，この大小を判断すれば字形に基づく筆者異同識別を行えるはずである．



(a)同一筆者の標本対

(字画パターンの違いが小さい)



(b)異なる筆者の標本対

(字画パターンの違いが大きい)

図2.2 幾何学的マッチング

(2つの筆跡を重ねて幾何学的なズレを見る)

2.2.4 特徴点座標の正規化

2.2.1 で述べたように対象とする筆跡は自由筆記されたものであって、その大きさや傾きなどはそれぞれ異なる。2.2.3 で述べた特徴量は、今、未知標本 A と既知標本 B の筆跡の一方（未知標本 A としよう）の画像座標系における位置ズレ量は $R(A,B)$ として計測される。更に、未知標本 A と既知標本 C との位置ズレ量 $R(A,C)$ を計測したとしたとき、もし未知標本 A と既知標本 B, C の大きさがそれぞれ異なっていると、 $R(A,B)$ と $R(A,C)$ との間で大小関係を論じることができない。

そこで、字種ごとに標準パターンを設け、各筆跡の特徴点群をそれに対応する標準パターンの特徴点群に平均的に合わせ込むようにヘルマート変換を行う。つまり、個々の筆跡の大きさと回転また画像中の位置を統一させる。複数文字が筆記されている場合、この変換により文字間の相対的な大きさの変化や回転、また平行移動など配字に関する情報は失われるが、個々の筆跡の字形は不変である。この操作を正規化とよぶことにする。

この正規化は、2.2.3 で述べた字形の違いを表す特徴量の算出と全く同様

に、標準パターンの特徴点座標を式(2.1)の (u',v') とし、それに対応する各筆跡の特徴点座標 (u,v) を (u',v') に平均的に合わせ込むように幾何変換することで行う。すなわち、筆跡のある特徴点の座標を (u,v) 、その特徴点に対応する標準パターンの特徴点座標を (u',v') としたとき、ヘルマート変換を表す式(2.1)にこれらの値を代入して k_i を未知数とする二つの方程式を得る。一つの特徴点あたり二つの式が得られるので、その筆跡に対して N_p 個の特徴点が存在していたとすると、 $2N_p$ 個の式が得られる。 $2N_p$ 個の連立方程式を最小2乗法で解けば、ヘルマート変換の変換係数 k_i ($i=1,2,3,4$)が求まり、その筆跡の画像座標系から標準パターンの画像座標系への幾何変換式を決定することができる。求められた幾何変換式に従ってその筆跡の各特徴点座標を標準パターンの画像座標系へ変換する。これが正規化の具体的な操作である。なお、未知数である幾何変換係数 k_i の数は四つであるので、最低二つの特徴点があれば、必ず未知数が求まる。すなわち、あらゆる筆跡(1画以上あるので、始筆部と終筆部の二つの特徴点は必ず存在する)について、この処理を行うことができる。

図 2.3 に正規化の例を示す。同図中の上段に正規化前の筆跡例、同図中の下段に正規化によって得られた筆跡例を示す。また、同図(a)は標準パターン、同図(b)は比較的小さく記載された筆跡例、同図(c)は比較的大きく記載された筆跡例、同図(d)は傾きの大きな筆跡例を示す。正規化により個々の筆跡の大きさ・回転・位置が統一されているのが分かる。

従来、この文字の切り出しなどを含む正規化は、文字の外接四辺形や文字の重心位置、線分密度など様々なパターン情報^{6),7),8)}を利用したものが提案されている。しかし、これらは文字そのものではなく文字から得られる二次的なパターン特徴を一致させようとする変換がなされるものである。また、文字の回転については考慮されていない。これに対して提案する正規化は、文字を構成する各字画の始筆部、転折部、終筆部を特徴点として、その特徴点位置を標準パターンのそれに一致させようとする変換である。言い換えれば、文字そのもの(一次的な特徴)が一致するような回転を含む変換であって、そのような変換がなされることが最小2乗近似という意味で保障される。しかも、二次的なパターン特徴を計測する必要もないという意味で簡単に正規化を行うことができる。

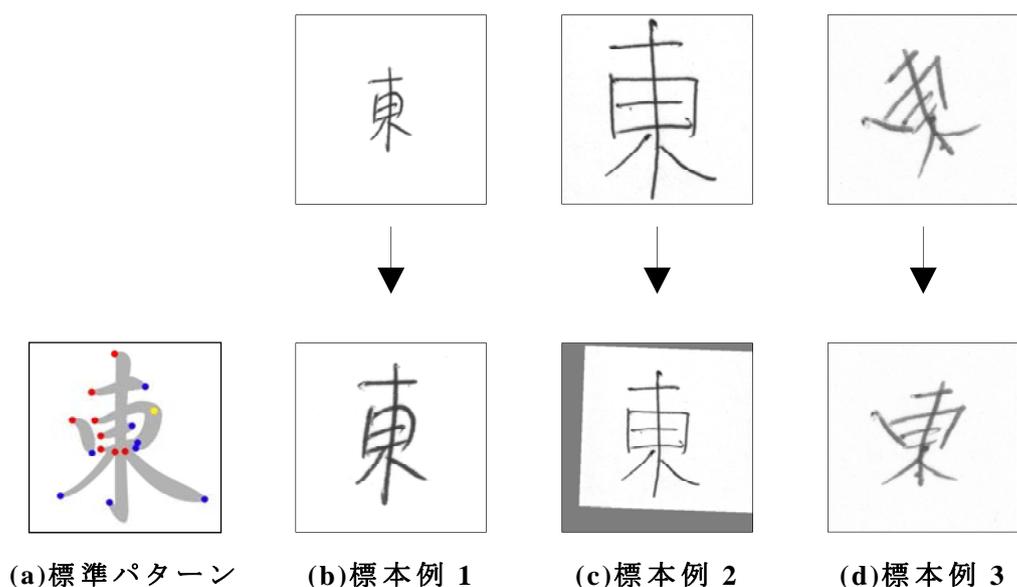


図2.3 正規化例

(正規化により個々の筆跡の大きさ・
回転・位置が統一されているのが分かる)

なお、標準パターンはどのようなものであってもよいが、筆跡を高解像度でデジタル化したときでも十分な解像度を保持する 500×500 画素のサイズの画像とした。すなわち、デジタル化された筆跡標本すべての特徴点座標は、正規化によりサイズ 500×500 画素の画像座標系に変換される。

2.2.5 個人内・個人間変動と異同識別

正規化後のある二つの筆跡間の位置ズレ量（幾何変換 RMS 残差，単位：pixel）を横軸に，その特徴量を持つ筆跡対の出現頻度を縦軸にして，数多くの筆跡対についての頻度分布を調べると，図 2.4 に示すような分布が得られる。同一筆者の筆跡対の特徴量は，字形の違いが小さくなることが予想されるが，その予想どおりに原点寄りに分布する。同一筆者の筆跡の特徴量が 0 にならず，ある程度の大きさで広がっているのは，複数の筆跡が全く同じ字形ではなく，筆記するたびに少しずつ異なった字形で筆記されていることを意味する。いわゆる書きむらである。一般に筆跡個性の恒常性が完全ではないことを個人内変動というが，特徴空間でみたそれを個人

内変動分布とよぶ．一方，異なる筆者の筆跡対の場合は字形が異なっている可能性が高いことから，個人内変動分布より右側の原点から離れる方向寄りに分布する．この分布を個人間変動分布とよぶ．

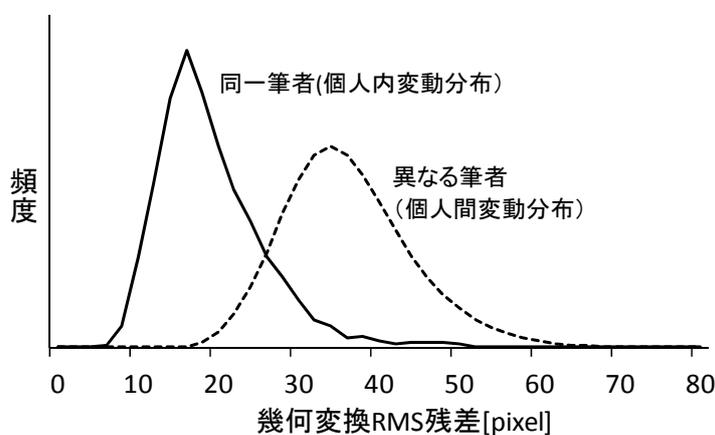


図2.4 個人内変動分布と個人間変動分布

筆者異同識別は，ある未知標本（筆跡標本対）の特徴量が図 2.4 に示したような個人内変動分布と個人間変動分布すなわち筆者が同一人というカテゴリと異なる筆者というカテゴリのどちらに所属すべきかを決定することで行うことができる．従来の研究では，筆跡対の類似度あるいは相違度を評価するという視点で異同識別がなされていることが多いが，本研究では個人内変動と個人間変動という二つの母集団を考え，どちらの母集団から生じた筆跡標本対であるのかを判定することで異同識別を行う．

このカテゴリの決定方法すなわち識別法としては様々なものが考えられるが，ここでは多くの分野で使用実績が豊富で，その挙動も明確かつパラメータも少ないという意味で適用も容易な統計的識別法の一つである最大尤度法（最尤法ともよばれる）を採用する．

最大尤度法では，よく知られているように母集団の確率密度が正規分布で表されると仮定し，カテゴリ c に対する特徴量 x の尤度 $p(x|c)$ が最大となる c に x を所属すると決定する．特徴量 x がスカラーである（特徴空間が一次元の）場合，母集団の平均と分散をそれぞれ m_c, v_c とすると $p(x|c)$ は次式で表される．

$$p(x|c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi v_c}} \exp\left\{-\frac{(x-m_c)^2}{2v_c}\right\} \quad (2.3)$$

ここで、 m_c 、 v_c はサンプルから得られる標本平均と標本分散として推定する。逆にいうと、この方法を採用するということは、標本平均と標本分散を得るために、ある程度の数の筆跡標本対がある一つの筆跡対を識別する前に必要であることを意味する。

2.2.6 個人内変動の抑制

上記の識別方法における異同識別誤差は、個人内変動分布と個人間変動分布が互いに離れ、かつその拡がり小さいほど小さくなる。そこで重要となるのが個人内変動である。図 2.5 中の上段に同一筆者が複数回筆記した筆跡例を 3 例示す。図中の上段の画像が 500×500 画素の正規化画像座標の筆跡である。これを見ると個人内変動は、幾何学的には射影歪みのような変形を伴っているように見受けられる。これは、主として筆記するときの姿勢や紙と腕や手の位置関係の変化に起因しているようにも思われるが、原因は定かではない。

もし、個人内変動がこのような幾何学的歪みを伴っているのであれば、その歪みを低減するような幾何変換を施すことによって、個人内変動を抑え、個人内・個人間変動分布の分離度を向上させることができる可能性がある。図 2.5 中の下段の画像は、同一人の複数筆跡に対して得られる各特徴点の平均座標 (u_m, v_m) に特徴点座標 (u, v) を平均的に合わせ込む射影変換を各筆跡に施した場合に得られた画像である。変換内容がわかりやすいようにグリッド線も示してある。

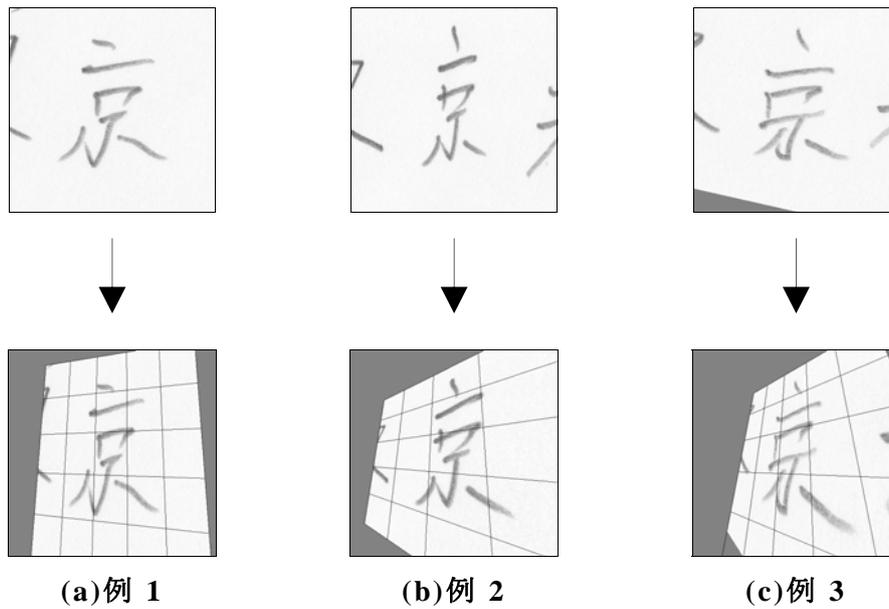


図2.5 同一人が筆記したサンプルとその射影変換結果

(射影変換後の筆跡の個人内変動は，射影変換前の画像より低減されており，字形がほぼ同じになっているのが分かる)

ここで，平均座標 (u_m, v_m) は，標準パターンに N_p 個の特徴点があったとすると， N_p 個の特徴点それぞれ $P_j(j=1,2,\dots, N_p)$ について，次式により求める．

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} u_s \\ v_m &= \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} v_s \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ただし， N_s は平均を求める同一人の筆跡数であり， (u_s, v_s) は正規化画像座標系における P_j に対応するある筆跡 s ($s=1,2,\dots, N_s$) 中の特徴点座標である．

図 2.5(a)の例 1 では，射影変換前後で横幅が少し小さくなっている程度で大きな幾何学的変形はなされていないことから，例 1 の筆跡はその筆者にとって多少横長には筆記されているが概ね平均的な特徴点パターンであったことがわかる．これに対して，同図(b)の例 2 では例 1 の射影変換前の画像と比べるとわかるように，縦長に筆記されており，かつ右払いが短く，文字の下側で横幅が特に小さい．このため，射影変換後は全体的には

横方向に引き伸ばされ、特に右下方向にやや拡大された画像となっている。同図(c)の例3では例1と比べて逆に横長に筆記されており、かつ文字の下半分が上半分とくらべ小さく筆記されている。このため射影変換後は全体的には縦に伸ばされ、かつ右下方向に拡大された画像となっている。結果として、射影変換後の筆跡の個人内変動は射影変換前の画像より低減されているのがわかる。

射影変換前後において、2.2.3で述べた幾何変換 RMS 残差がどの程度変化したかを表2.1に示す。図2.5に示した3つの筆跡について考えられるすべての標本対(3対)について、射影変換を施すと幾何変換 RMS 残差が半減していることが確認できる。ただし、このような幾何変換が個人間変動も低下させる、すなわち筆跡個性を低下させるように働くと、二つの分布の分離度は結局向上しない恐れがある。これについては、実験で検証する。

表2.1 射影変換による幾何変換 RMS 残差の変化[pixel]

(射影変換後は幾何変換 RMS 残差は半減している)

標本対	射影変換前	射影変換後
図2.5(a)と図2.5(b)	34.3	14.9
図2.5(a)と図2.5(c)	31.3	15.3
図2.5(b)と図2.5(c)	34.7	14.0

射影変換は式(2.5)で表されるが、その幾何変換係数 k_i ($i=1,2,\dots,8$) は、 (u_m, v_m) を (u', v') として正規化のときと同様に決定する。未知数である幾何変換係数の数は8であるので4点以上の特徴点が必要である。そのため2画以上の文字に対象筆跡が制限されることになる。なお、射影変換は式(2.5)に示したように有理式で表されるので、分母がたまたま0に近くなるような場合、得られる (u', v') が不安定になる。この問題を低減するために本研究では経験的な知見から、求められた幾何変換係数を用いて座標変換を行う際に、分母の (u, v) を (u_m, v_m) に置き換える。

$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{k_1 u + k_2 v + k_3}{k_7 u + k_8 v + 1} \\ v' &= \frac{k_4 u + k_5 v + k_6}{k_7 u + k_8 v + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

個人内変動の抑制を含めて，以上述べた提案する筆者異同識別法の処理の流れをまとめると図 2.6 のようになる．

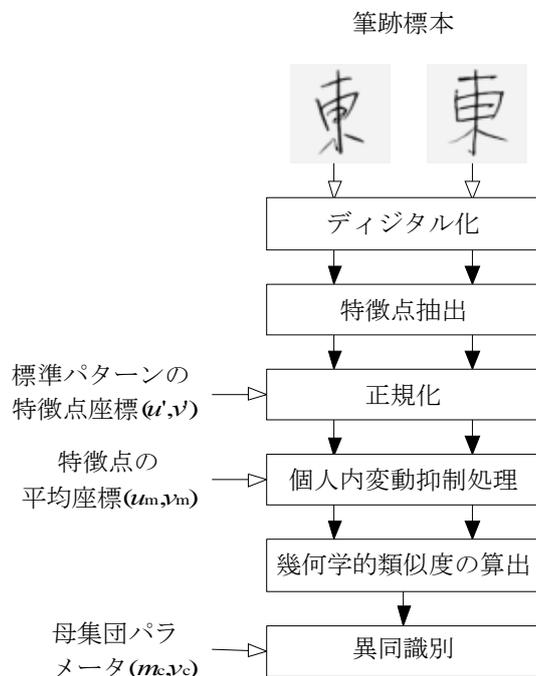


図2.6 提案する筆者異同識別の流れ

2.2.7 複数筆跡を識別対象とする場合の適用方法

検査対象筆跡が 1 文字であることは希で，通常は複数文字が対象となる．この場合，文字数 n からなる各文字 i に関する特徴量 x_i ($i=1,2,\dots,n$) が得られる．これを特徴ベクトル \mathbf{x} としよう．このようなとき，提案する異同識別で使用する最大尤度法を教科書的に適用すると，特徴ベクトル \mathbf{x} が張る n 次元の特徴空間で識別を行うことになる．

ところが連続筆記された複数文字の筆跡の場合，ある文字の筆跡はその前後の文字にある程度影響を受けることが知られている．このため，連続筆記された n 文字からなる文字列について識別を行うとなると，その n 次元特徴空間において推定される母集団の多次元正規分布は，その連続筆記された文字列固有のものと考えておいたほうがよいであろう．常用漢字だけでも 2,000 字以上あるので，それらのある順番で並べた n 文字からなる文字列について，事前に母集団パラメータ（平均ベクトルと分散・共分散

行列) を推定しておくことは実務的に不可能に近い。

そこで、本研究では文字列を構成する文字間の何らかの相関関係に識別性能ができるだけ強く依存しないように（母集団の分散・共分散行列を用いないですむように）、式(2.6)に示すように各文字の特徴量 x_i を文字数 n について和を求めたものを新たに n 文字のスカラー特徴量 x とする。すなわち、複数文字を識別に使用したときも、特徴空間は一次元のままである。

$$x = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.6)$$

これにより、各文字単独に筆記されたものとして扱いやすくなり、母集団パラメータの推定を行うための筆跡標本の収集は、ある並びの文字列を 1 セットにして収集する場合と比べてはるかに容易になる。

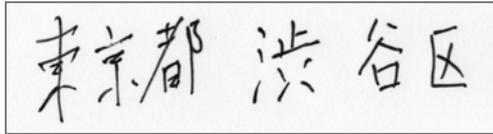
2.3 識別実験

提案する筆者異同識別法によりどの程度の識別精度が得られるのか、また、筆跡個性を低下させずに個人内変動を抑制するような幾何変換が存在するのかを明らかにするため、識別実験を行った。

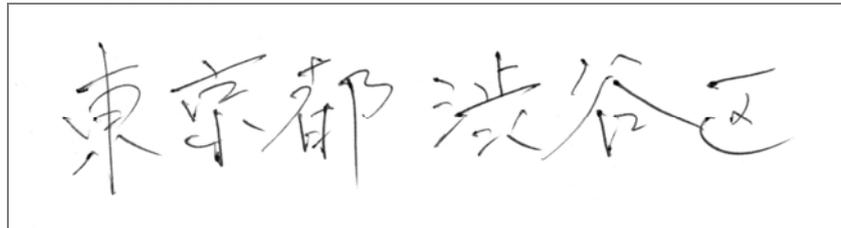
2.3.1 実験対象の筆跡標本

被験者 320 人に、線など何も書かれていない白紙の A4 コピー用紙 1 枚当たり文字列「東京都渋谷区」を横 1 行で筆記してもらい、これを 5 回反復して被験者 1 人当たり 5 枚の筆記済み A4 コピー用紙を収集した。筆記に際しては、できるだけ自然に筆記された筆跡を収集することを念頭に、横書きすること以外の楷書体といった字体などの筆記の仕方について特に制約をせず、「使いなれている筆記具で、また書き慣れている字体、大きさ、スピードで A4 コピー用紙の中央付近に、特に緊張せずいつものように筆記してください。」という指示を被験者に伝えた。

次に、収集した筆記済み A4 コピー用紙の筆記されている領域を解像度 600 dpi、量子化レベル数 256 階調でフラットベッドスキャナを使用してデジタル化した（図 2.7 参照）。



(a)比較的小さな文字で筆記された例



(b)比較的大きな文字で筆記された例

図2.7 筆跡標本例

したがって、筆跡標本は漢字「東京都渋谷区」の6文字であり、文字当たり1,600標本である。このとき生成可能な個人内標本対の数は3,200対、個人間標本対の数は1,276,000対となる。なお、個人内標本対の数を N_1 、個人間標本対の数を N_2 とすると、これらは次式で与えられる。ただし、 N_h は筆者数(=320)、 N_s は筆者あたりの筆跡数(=5)である。

$$N_1 = N_h \frac{N_s(N_s - 1)}{2} \quad (2.7)$$

$$N_2 = N_s^2 \frac{N_h(N_h - 1)}{2} \quad (2.8)$$

実験対象サンプルとしては、ノイズや濃淡むらがほとんどなく、紙のしわや凹凸など平面性も良好で、画質の高いサンプルである。ただ、提案法では人手で安定的に採取可能な特徴点の座標を識別に使用するため、この実験に使用したサンプルの画質の良さが過度に識別性能を向上させる恐れは大きくないのではないと思われる。なお、被験者の性別構成および年齢構成を図2.8に示す。性別構成についてはあまり大きな偏りはないが、年齢構成については20代の被験者が43%と多くを占めている。

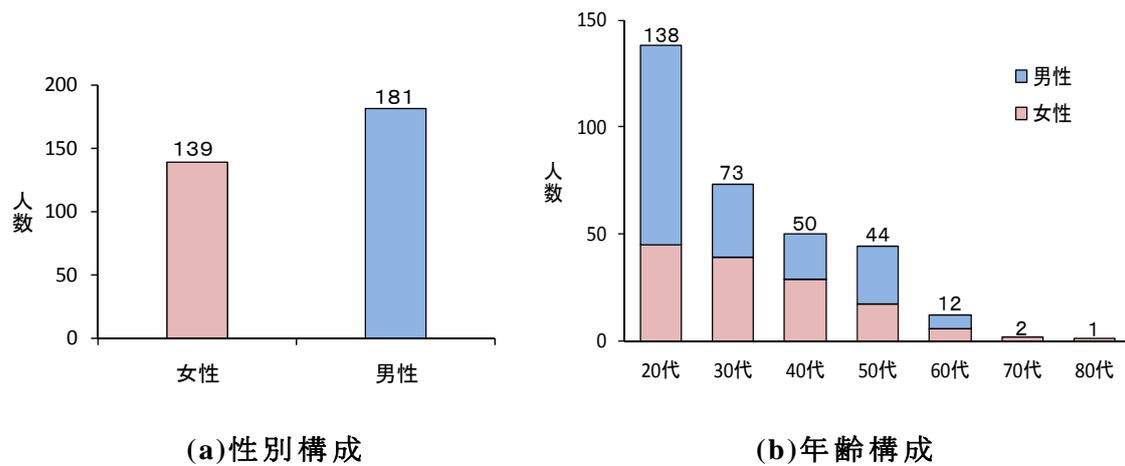


図2.8 被験者の構成

(性別構成についてはあまり大きな偏りはないが、年齢構成については20代の被験者が43%と多くを占めている.)

2.3.2 一文字の識別

図2.9に文字「東」「京」「都」「渋」「谷」「区」の各文字について、個人内変動抑制処理をしなかった場合と抑制処理をした場合の個人内・個人間変動分布を示す。この図を見ると、個人内変動抑制処理を行うと期待したように個人内変動分布の重心(平均)が左側(小さくなる方向)に移動するとともに、拡がり(分散)が大幅に小さくなっている。一方、個人間変動も左側に移動しているものの、その移動量は個人内変動分布より小幅であり、結果として個人内変動分布と個人間変動分布の分離度が向上しているのがわかる。このことから、個人内変動抑制処理について危惧された筆跡個性の低下は、二つの分布の分離度の観点では悪影響は無かったと思われる。

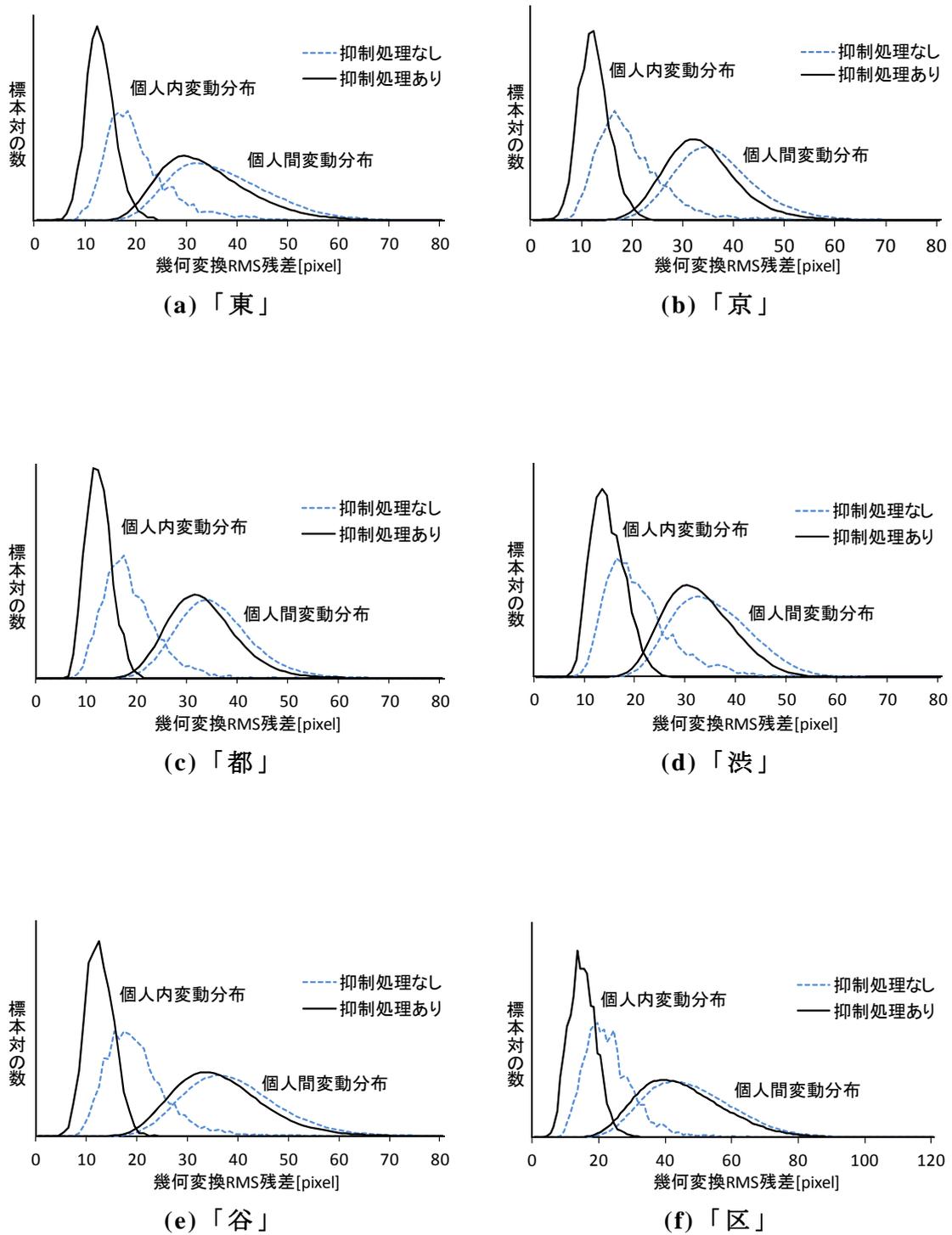


図2.9 射影変換による各文字に対する個人内変動抑制の効果

(個人内変動抑制処理を行うと個人内変動分布の重心が左側に移動するとともに、拡がりが大幅に小さくなっている。個人間変動分布も左側に移動するものの、その移動量は小幅である。結果として個人内変動分布と個人間変動分布の分離度は向上している)

これを確認するために、「東京都渋谷区」の6文字それぞれについて、個人内変動と個人間変動の二つの分布間の距離を計測した結果を表2.2に示す。距離としては、個人内変動分布から見た個人間変動分布の重心位置までのマハラノビス距離 d_{M1} と、個人間変動分布から見た個人内変動分布の重心位置までのマハラノビス距離 d_{M2} 、およびバタチャリヤ距離 d_B の3種類の距離を求めた。 d_{M1} と d_{M2} はそれぞれ個人内変動分布と個人間変動分布の標準偏差で互いの重心位置間のユークリッド距離を正規化したものを表し、 d_B は二つの分布の分離度を表す。なお、これらの距離は、個人内変動分布の平均と分散をそれぞれ μ_1, ν_1 、個人間変動分布のそれらをそれぞれ μ_2, ν_2 とすると、式(2.9)、(2.10)、(2.11)で与えられる。

表2.2 個人内変動の抑制処理の効果

(個人内変動の抑制により、個人内・個人間変動分布の分離度(d_B)は2~3倍程度大きくなっている)

字 種	距 離	個人内変動抑制処理	
		なし	あり
東	d_{M1}	2.22	7.28
	d_{M2}	1.67	2.34
	d_B	0.47	1.51
京	d_{M1}	2.29	7.00
	d_{M2}	2.02	2.96
	d_B	0.58	2.02
都	d_{M1}	2.97	8.29
	d_{M2}	2.24	2.99
	d_B	0.82	2.21
渋	d_{M1}	2.05	5.50
	d_{M2}	1.87	2.68
	d_B	0.48	1.57
谷	d_{M1}	2.58	8.71
	d_{M2}	1.94	2.68
	d_B	0.62	1.93
区	d_{M1}	2.94	7.24
	d_{M2}	1.79	2.25
	d_B	0.64	1.44

$$d_{M1}^2 = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{v_1} \quad (2.9)$$

$$d_{M2}^2 = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{v_2} \quad (2.10)$$

$$d_B = \frac{1}{4} \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{v_1 + v_2} + \frac{1}{2} \log \frac{v_1 + v_2}{2\sqrt{v_1 v_2}} \quad (2.11)$$

表 2.2 からいずれの文字種でも，個人内変動分布の平均と分散が小さくなったために d_{M1} は個人内変動の抑制処理を行うことにより 2~3 倍程度大きくなっている一方で， d_{M2} も数割大きくなっていることから，抑制処理は個人間変動に悪影響を与えていないことがわかる．また，その結果二つの分布の分離度を表す d_B も 2~3 倍程度大きくなっていることが確認できる．

識別誤差は，一般に FMR (false match rate, 他人受け入れ率) と FNMR (false non-match rate, 本人拒否率) およびその平均である平均識別誤差で表される (図 2.10 参照)．

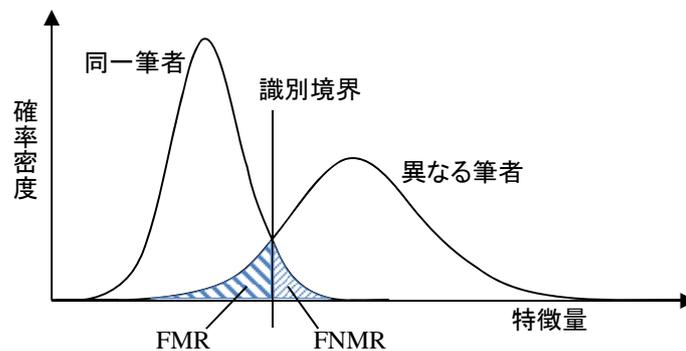


図 2.10 識別誤差

(FNMR は，同一人の筆跡対であるにも拘わらず異なる筆者の筆跡対であると判定した誤識別率であり，FMR は，異なる筆者の筆跡対であるにも拘わらず同一筆者の筆跡対であると判定した誤識別率である)

FNMR は、同一人の筆跡対であるにも拘わらず異なる筆者の筆跡対であると判定した誤識別率であり、同一筆者の筆跡対の総数に対する誤識別した筆跡対の割合で与えられる。FMR は、異なる筆者による筆跡対であるにも拘わらず同一筆者によるものであると判定した誤識別率であり、異なる筆者の筆跡対の総数に対する誤識別した筆跡対の割合で与えられる。FMR と FNMR の平均を平均識別誤差とよぶ。一方、識別精度については、式(2.12)に示すように、これらの識別誤差を 1 から引いたものとして与えられる TMR (true match rate, 本人受け入れ率), TNMR (true non-match rate, 他人拒否率), 平均識別精度を考える。

$$\left. \begin{aligned} TMR &= 1 - FNMR \\ TNMR &= 1 - FMR \\ \text{平均識別精度} &= 1 - \text{平均識別誤差} \\ &= (TMR + TNMR) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

ただし、TMR は本人受け入れ率、TNMR は他人拒否率、平均識別精度はこれらの平均値で表される。

実験対象とした 6 文字それぞれについて、個人内変動抑制処理によりどの程度の識別精度の向上が見られたのかを示すために、向上分を積み上げたグラフを図 2.11 に示す。

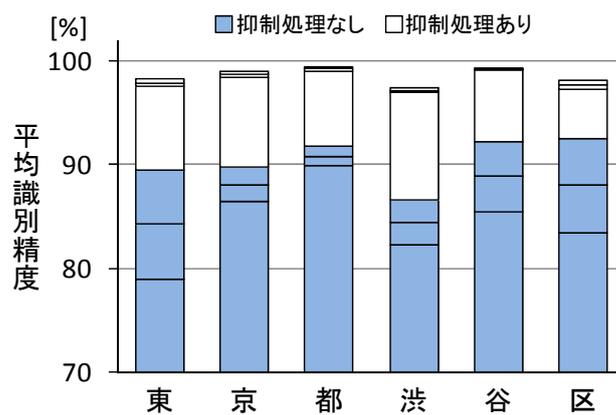


図 2.11 一文字の識別精度

(個人内変動抑制処理により、平均識別精度は約 5%~10% 向上し、約 97%~99% となる)

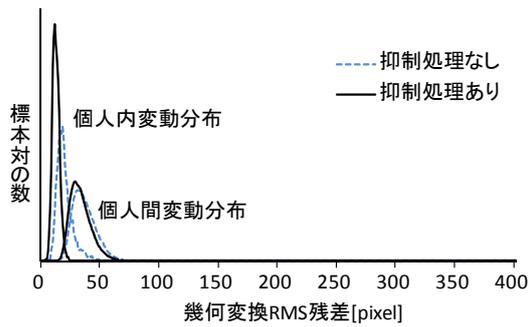
グラフ中の横線は、TMR（下端）、TNMR（上端）、平均識別精度（中間）を示す。個人内変動の抑制処理をしなかった場合、平均識別精度で約84%～90%となっている。これは、対象字種などの実験条件が異なるので一概に比べるのは難しいが、従来多く報告されている一字の識別精度と同程度である。個人内変動の抑制処理をすると、平均識別精度で約5%～10%向上し、約97%～99%となっている。

この識別実験では、最大尤度法の適用時に必要となる母集団パラメータの推定は、全標本（1字種当たり、個人内変動分布に対しては3,200対、個人間変動分布については1,276,000対存在する）を用いて行った。また、同じ標本対を識別対象とした。

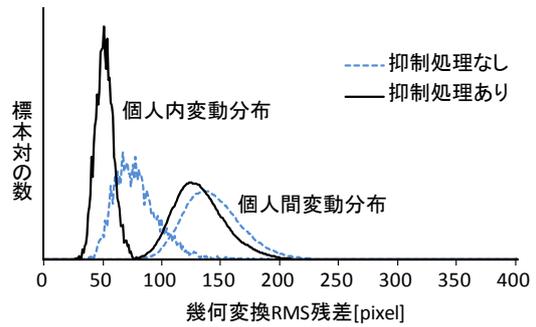
2.3.3 複数文字の識別

次に、異同識別のより一般的なケースとして、2.2.7で述べた方法で複数文字を対象に識別を行った。一文字の場合と同様に、個人内変動分布に対しては3,200対、個人間変動分布については1,276,000対を用いて母集団パラメータを推定し、またそれら同じ標本対を識別対象とした。

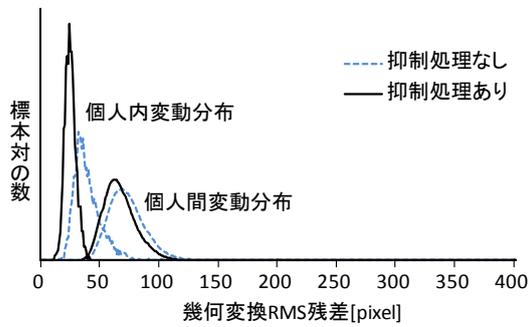
図2.12(a)～(f)は、「東」の1文字、「東京」の2文字、「東京都」の3文字、「東京都渋」の4文字、「東京都渋谷」の5文字、そして「東京都渋谷区」の6文字を対象にしたときの個人内・個人間変動分布を示したものである。使用する文字数の増加とともに幾何変換残差が加算されて個人内・個人間変動分布が右方向に移動するとともに、個人内・個人間の二つの変動分布の分離度が向上している。個人内変動分布抑制処理をしなかった場合、6文字を対象としたときでも個人内・個人間変動分布はかなりオーバーラップしているが、抑制処理を行った場合はほとんどオーバーラップが見られない。



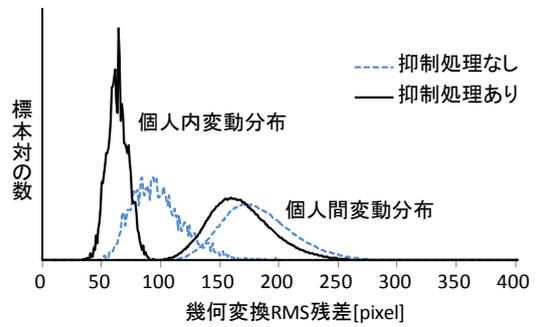
(a) 「東」



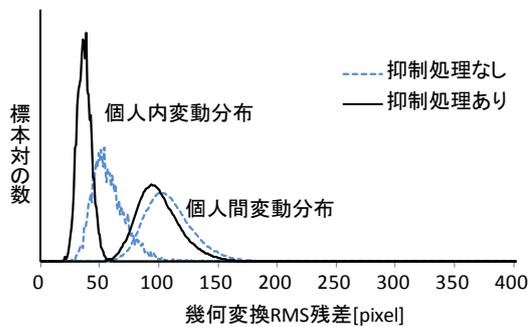
(b) 「東京都渋谷」



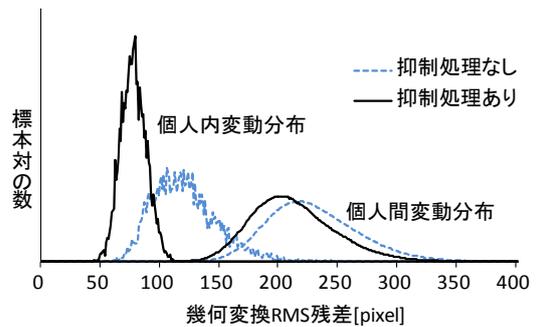
(c) 「東京」



(d) 「東京都渋谷区」



(e) 「東京都」



(f) 「東京都渋谷区」

図2.12 識別に使用する文字数を増加させたときの各文字の組み合わせによる個人内・個人間変動分布の変化

(使用する文字数の増加に伴い、幾何変換残差が加算されて個人内・個人間変動分布が右方向に移動するとともに、個人内・個人間の二つの変動分布の分離度が向上している)

複数文字の組み合わせは、たとえば2文字の場合、「東」と「京」、「東」と「都」、「京」と「渋」のように15種類ある。同様に3文字、4文字、5文字の場合は、それぞれ20種類、15種類、6種類の組み合わせがある。すべての組み合わせについて識別実験を行って、得られた平均識別精度を組み合わせた文字数ごとに平均値を求めた。個人内変動抑制処理を行わなかった場合と行った場合それぞれについて、その平均識別精度の文字数ごとの平均値を図2.13に示す。図中の平均値付近の縦線は、平均識別精度の最小値・最大値を表したものである。

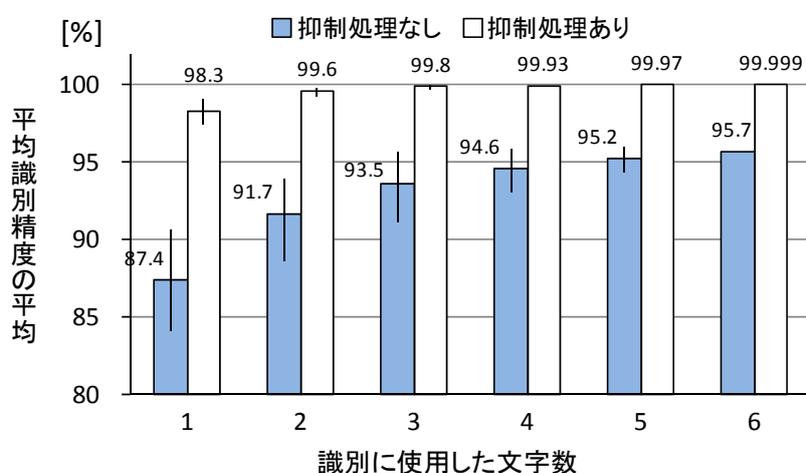
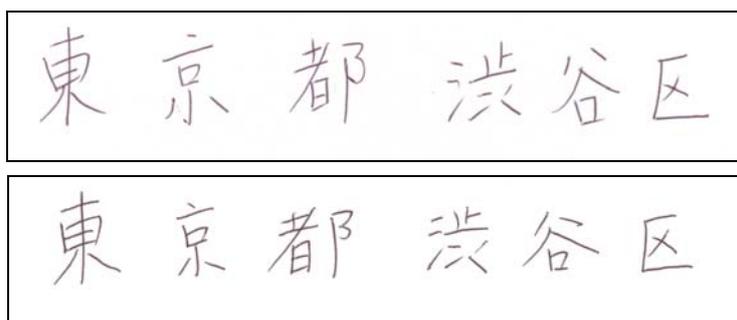


図2.13 複数文字を対象としたときの識別精度

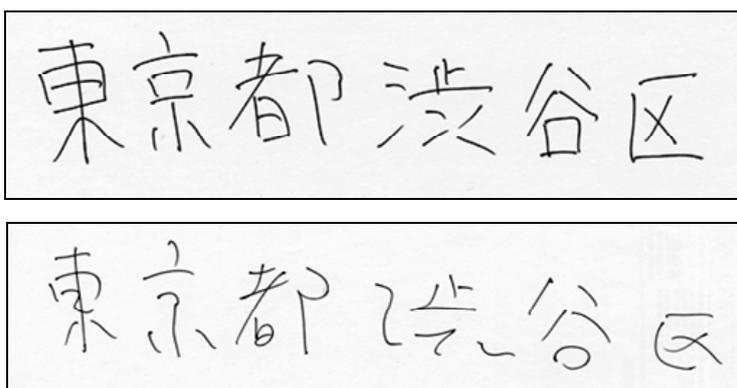
(個人内変動抑制処理の有無にかかわらず、識別に使用した文字数の増加とともに識別精度は上昇する。個人内変動抑制処理により4文字を使用したとき99.9%以上、6文字を使用すると99.99%を超える)

個人内変動抑制処理の有無にかかわらず、期待されたように識別に使用した文字数の増加とともに得られる識別精度が高くなっていくのがわかる。個人内変動抑制処理の効果は、1文字のとき約11%の向上、6文字のとき約4%の向上が見られる。科学捜査分野では、従来鑑定精度の要求精度の目安として最高の第1レベルが99.9%以上、第2レベルが89%~99%、第3レベルは89%未満とされている。提案手法は、1文字を使用したとき、平均識別精度の平均では第2レベルを、4文字を使用したとき第1レベルを満足し、6文字を使用すると99.99%を超えている。

6 文字を使用したとき誤識別を起こした筆跡標本対の例を図 2.14 に示す。字形だけの情報でどの程度字形が似ていたら異なる筆者の筆跡を同一人による筆跡であると誤識別するのか、またどの程度字形が異なっていたら同一人の筆跡を異なる筆者によるものであると誤識別するかを、それぞれ同図(a), (b)により垣間見ることができる。



(a)異なる筆者の筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例



(b)同一人による筆跡を異なる筆者による筆跡と誤識別した例

図2.14 誤識別された筆跡標本対の例

2.4 本章のまとめ

本章では、科学捜査分野の筆跡鑑定で最もよく使用される漢字を対象筆跡として、筆者異同識別法の基本的な枠組みを構築した。この筆者異同識別法は、安定的に抽出可能なごく基本的な字形を表す字画の始筆部・転折部・終筆部からなる特徴点を使用し、一般的に曖昧な字画形態を持つ筆跡標本に対して、2値化や細線化といった不安定な2値画像処理を行わずに、鑑定人自身が確実に抽出できる字画あるいはその特徴点を採取する。これは実用化を考慮したとき重要であると考えられる。文字の正規化は、従来の筆

跡の重心位置による位置合わせや、文字の外接四辺形やモーメント特徴などによる筆記文字サイズの正規化と比べ、筆跡の特徴点による回転を含むはるかに正確で信頼性の高い正規化法を考案した。また、従来の研究ではその発想すらなかった書きむらすなわち個人内変動の抑制処理を考案した。識別においては、識別過程が明確で説明し易く、統計的に合理的な結果が安定的に得られる代表的な統計的識別法の一つである最大尤度法により識別を行う。また、得られる識別精度は要求精度の観点からは実用化レベルを達成しているのではないかと考えられる。

この提案手法で筆者異同識別システムを構成する場合、必要となる機能は、1)筆跡標本をフラットベッド型スキャナなどでデジタル画像として入力する機能、2)画像中の点の座標を手で計測する機能、3)文字の切り出し・正規化、個人内変動の抑制、特徴量抽出を行うための単純な幾何学的変換（幾何変換式の係数を求め座標変換する）機能、4)筆者異同識別を行う最大尤度法による二つのカテゴリーに関する所属判定機能、の四つがあればよい。いずれも、画像処理分野で旧来一般的に使用されているものであり、動作パラメータも個人内・個人間変動分布の平均と分散の二つと少なく、システムの使用者側にも特に新たな専門的知識や技術を要求しない非常にシンプルなシステムである。それゆえある特定の条件下において想定外のことが起き難い頑健なシステムになるのではないかとと思われる。

結果として、提案法は一文字単位の字形という側面からについてだけはあるが、現在非常に多面的になされている科学捜査分野における鑑定の一助として、客観性や信頼性の向上に寄与できるのではないかと期待される。ただし、本章で示した実験条件や異同識別法について、1)字種が限られた実験である、2)用いた筆跡標本は一度に連続して5回筆記したもので、画質は良く、いわゆる質のよいサンプルを用いた実験である、3)母集団推定と識別に同じサンプルを使用しており、識別精度が高めに推定されている可能性がある、4)被験者の年齢分布が20代に偏っているが、それが識別精度にどのような影響を与えているのか検討していない、5)日本で鑑定対象となりえるひらがなや数字などの文字については検討していない、などのさらなる検討が必要と思われる点も残っている。現段階では提案法の開発と基本的な性能把握を行っている段階なので、これらについては今後の課題としたい。

【参考文献】

- 1) 吉村ミツ，吉村功：“筆者認識研究の現段階と今後の動向”，信学技報，PRUM96-48, pp.81-90 (1996).
- 2) 菊池真美，赤松紀男：“高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 3) 宮川 透，米澤義道，伊藤一典，橋本昌巳：“筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 4) 小宮義光，松本 隆：“ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”，電子情報通信学会総合大会論文集，p. 217 (1999).
- 5) 栗津優作，上田勝彦：“筆跡鑑定支援システムの開発”，電子情報通信学会総合大会論文集，D-11-75, p. 75 (2006).
- 6) 大川 学，丸山 稔：“正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”，第6回情報科学技術フォーラム(FIT2007)論文集，pp. 105-106 (2007).
- 7) 鈴木道孝，渡辺秀人，伊藤章義：“一般的な四角形枠による2次元形状正規化”，信学技報，PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 8) 鈴木圭介，塩山忠義：“パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”，信学技報，PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 9) 清田公保，櫻井敏彦，山本眞司：“ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 10) 小高和己，荒川弘熊，増田 功：“ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”，電子通信学会論文誌，Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 11) 田中敬子，安藤慎吾，中島真人：“局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”，信学技報，PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 12) 梅田三千雄，三好建生，三崎揮市：“自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”，電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).

- 13) 福井隆文, 梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 信学技報, PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).
- 14) 澤田武志, 大橋剛介, 下平美文: “視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).
- 15) 安藤慎吾, 中島真人: “オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法”, 電子情報通信学会論文誌, No. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
- 16) 尾崎正弘, 足達義則, 石井直宏: “ファジィ理論を用いた筆者識別”, 電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
- 17) 吉村ミツ, 吉村 功: “DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
- 18) 吉田 恵, 相澤優秀, 鮎川哲也, 小林裕幸: “固有空間法の筆者識別への適用”, 日本鑑識科学技術学会誌, Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
- 19) 高澤則美: “筆跡鑑定”, 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1-11 (1998).
- 20) 山崎 恭, 近藤維資, 小松尚久: “筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式”, 画像電子学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 438-444 (1994).
- 21) 常盤公德, 福江潔也, 松前義昭: “個人内変動を抑制した字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別”, 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.660-670 (2011).

第3章 個人内変動を抑制する幾何変換モデルの検討

3.1 はじめに

本章では、前章において実用レベルの識別精度を達成するには個人内変動の抑制が必須であることが判明したことから、個人内変動の抑制に最適な幾何変換モデルについて検討する。

筆者異同識別は、筆跡個性（書き癖）とその恒常性の存在を前提になされる。図3.1は、同一人が5回筆記した筆跡を重ねて表示したものであるが、このように個人内変動とよばれる書きむらが存在する。

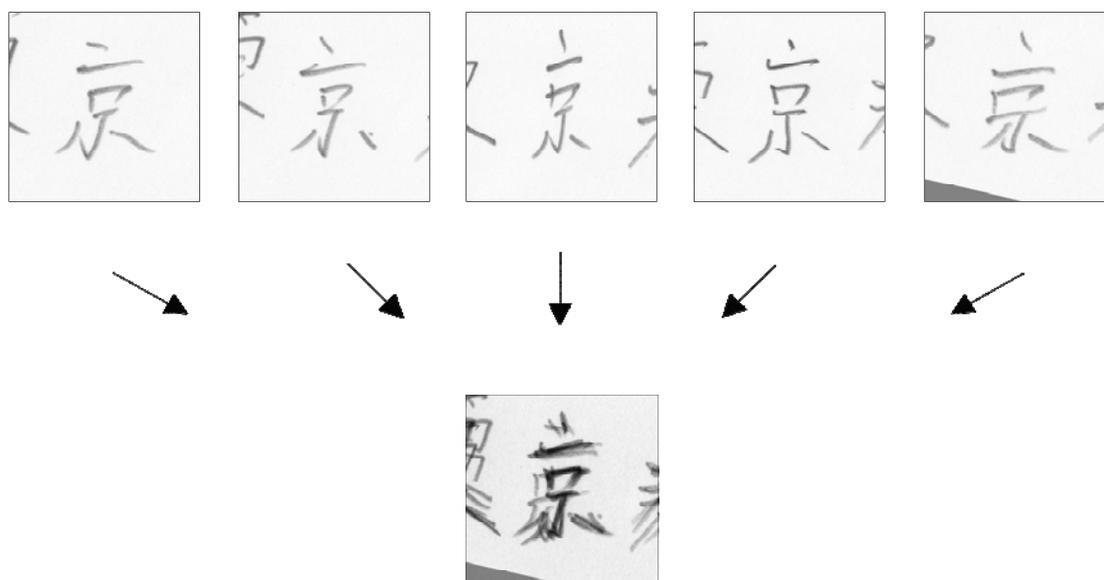


図3.1 同一人が複数回記載した筆跡を重ねた表示

(同一人が記載する筆跡には、個人内変動とよばれる書きむらが存在する)

従来の研究^{1)~19)}では、この個人内変動は存在するものとして、それを筆跡採取後に抑制するという発想はなく、それをとおして異同識別精度を向上させるという試みはなされていない。これに対して本研究では個人内変動を抑制するような幾何学的変換を筆跡に施すことで、筆者異同識別精度を向上させることが可能であることを第2章で示した²⁰⁾。しかし、どのような幾何変換モデルが適当であるかについては検討していなかった。

本章では、画像処理分野の代表的な幾何変換モデルに注目し、そのなか

ら筆者異同識別精度の観点から最適な幾何変換モデルを明らかにする．まず 3.2 において使用する筆者識別法について簡潔に述べた後，3.3 において個人内変動の抑制の原理と検討する幾何変換モデルについて説明し，3.4 において識別実験により各幾何変換モデルの有効性を比較評価する．最後に 3.5 において個人内変動を抑制する幾何変換モデルについてまとめるとともに，今後の課題を整理する．なお，本章で使用する図表の一部は，参考文献 21) に掲載されているものを転載している．

3.2 使用する筆者異同識別法

使用する筆者異同識別法について簡単に述べる．第 2 章で提案した筆者異同識別法²⁰⁾は，オフライン型の識別を使用しざるを得ない科学捜査分野において，抽出が容易な字画パターンに基づいて識別を行おうとするものである．すなわち，ある筆跡対が同一人物によって筆記されたものであれば同じような字形になるであろうし，別人によって筆記されたものであれば字形は違って来るであろうと考え，検査対象となる 2 つの筆跡間の幾何学的マッチングの度合いにより，筆者異同識別を行う．本章では，第 2 章 2.2 で述べた筆者異同識別法に沿って実験を行い，個人内変動抑制処理に用いる幾何変換モデルを変化させたときに得られる識別精度の観点から，個人内変動の抑制に使用する最適な幾何変換を検討する．

3.3 検討した幾何変換モデル

本研究では，個人内変動（書きむら）が特定の幾何学的歪みを伴っている可能性があるのではないかと考えた．もし，そうであるなら，その歪みを低減するような幾何変換を施すことによって，個人内変動を抑え，個人内・個人間変動分布の分離度を向上させることができるはずである．

そこで，同一人の複数筆跡に対して得られる各特徴点の平均座標 (u_m, v_m) に特徴点座標 (u, v) を平均的に合わせ込む幾何学的変換を各筆跡に施す．ここで，平均座標 (u_m, v_m) は，対象文字に N_p 個の特徴点があったとすると， N_p 個の特徴点それぞれ $P_j(j=1, 2, \dots, N_p)$ について，次式により求める．

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} u_s \\ v_m &= \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} v_s \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ただし、 N_s は平均を求める同一人の筆跡数であり、 (u_s, v_s) は P_j (例えば第1画の始筆部) に対応する筆跡標本 s ($s=1, 2, \dots, N_s$) 中の特徴点座標である。

このとき、第2章2.2.3で述べた方法と同様に、幾何変換式を特徴点の数だけ連立させて、幾何変換残差が最小になるように最小2乗法で連立方程式を解けば、幾何変換式の係数 k_i を決定することができる。求められた幾何変換式を用いて筆跡標本 s の各特徴点座標 (u_s, v_s) を座標変換すれば、その筆跡標本 s に関して個人内変動が抑制された特徴点座標 (u', v') が得られる。

問題は、どのような幾何変換式を用いるのが有効であるのかが不明なことである。本章では幾何変換式として比較的良好に知られている次の6種類の幾何変換モデルについて検討した。ここで、 (u, v) 、 (u', v') はそれぞれ幾何変換前と後の座標、 k_i ($i=1, 2, \dots$) は変換係数である。

(1) 2次等角変換

直線は2次曲線に変換されるが、微小部分では2つの線分のなす角(交角)が保存されるような変換であり、正方グリッドを変換した1例を図3.2に示す。座標変換式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1(u^2 - v^2) + 2k_2uv + k_3u + k_4v + k_5 \\ v' &= -k_2(u^2 - v^2) + 2k_1uv - k_4u + k_3v + k_6 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

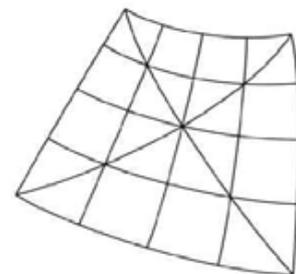


図3.2 2次等角変換の例²²⁾

(2) アフィン変換

拡大・縮小，回転，せん断などを表す1次変換（線形変換）に平行移動を組み合わせた変換であり，次式で表される．

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1u + k_2v + k_3 \\ v' &= k_4u + k_5v + k_6 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

(3) 疑似アフィン変換

アフィン変換に uv の交差項が追加されたもので，座標軸に平行な直線は直線に変換されるが，そうでない直線は2次曲線に変換される．正方グリッドを変換した1例を図3.3に示す．座標変換式は，次式で表される．

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1uv + k_2u + k_3v + k_4 \\ v' &= k_5uv + k_6u + k_7v + k_8 \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

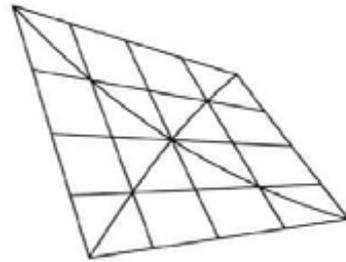


図3.3 疑似アフィン変換の例²²⁾

(4) 射影変換

3次元空間中において，ある平面上の点を，それとは別の平面に投影する変換であり，直線は直線に変換される．正方グリッドを変換した1例を図3.4に示す．座標変換式は，次式で表される．

$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{k_1u + k_2v + k_3}{k_7u + k_8v + 1} \\ v' &= \frac{k_4u + k_5v + k_6}{k_7u + k_8v + 1} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

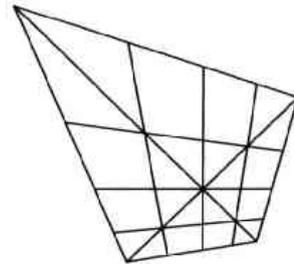


図3.4 射影変換の例²²⁾

(5) 2次多項式による変換

次式のように2次の多項式で表され、直線は2次曲線に変換される。

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1 u^2 + k_2 uv + k_3 v^2 + k_4 u + k_5 v + k_6 \\ v' &= k_7 u^2 + k_8 uv + k_9 v^2 + k_{10} u + k_{11} v + k_{12} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

(6) 3次多項式による変換

次式のように3次の多項式で表され、直線は3次曲線に変換される。

$$\left. \begin{aligned} u' &= k_1 u^3 + k_2 u^2 v + k_3 uv^2 + k_4 v^3 + \\ &\quad k_5 u^2 + k_6 uv + k_7 v^2 + k_8 u + k_9 v + k_{10} \\ v' &= k_{11} u^3 + k_{12} u^2 v + k_{13} uv^2 + k_{14} v^3 + \\ &\quad k_{15} u^2 + k_{16} uv + k_{17} v^2 + k_{18} u + k_{19} v + k_{20} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

3.4 実験

3.3 で示した幾何変換モデルによる識別誤差の低減効果を調べるために識別実験を行った。ただし、使用した筆跡標本は第2章で使用した被験者320人によるものと同じである。

3.4.1 識別結果

個人内変動抑制処理をしなかった場合と、3.3 で示した6種類の幾何変換を施した場合について、得られた平均識別精度（の平均）を図3.5に示す。図中のグラフの奥行き方向は、識別に使用した文字の数である。1文字の場合は、「東京都渋谷区」の6文字中いずれか1文字を識別に使用したときに得られた平均識別精度を、6文字について平均した値で示してある。複数文字の場合、たとえば2文字を識別に使用した場合は、6文字中2文字の組合せは「東」と「京」、「東」と「都」など15種類あるが、それら15種類に対する平均識別精度の平均値を示してある。ただし、3次多項式の幾何変換係数の数は20であるので、幾何変換係数を決定するには

最低 10 点の特徴点が必要である。しかし、実験対象文字の「区」は 4 画で転折部を含めて計 9 点しか特徴点は存在しない。このため「区」に対しては、3 次多項式を適用することができず、「区」の一文字および「区」を含む複数文字（たとえば「東」と「区」の 2 文字の組合せ時）の識別を行うことはできない。したがって「区」を含む場合の平均識別精度は平均値には含まれていない。

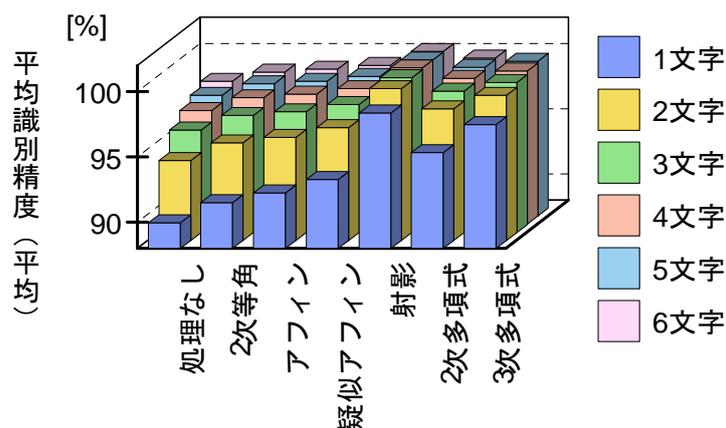


図 3.5 幾何変換の種類と文字の組み合わせに対する識別精度

(識別に使用する文字数にかかわらず、射影変換を施した場合、最も高い平均識別精度の平均が得られる)

図 3.5 から、識別に使用する文字数にかかわらず、射影変換を施した場合、最も高い平均識別精度 (の平均) が得られているのがわかる。3 文字以上を識別に使用した場合、射影変換について高い性能を示したのは 2 次多項式である。3 次多項式の方が低い精度となっていることから、単に自由度が高ければよいというわけでないことがわかる。この傾向は、 u と v の交差項がある疑似アフィン変換や 2 次の項が存在する 2 次等角変換と、基本的には線形な変換がなされるアフィン変換と大差がないことからわかる。これより、筆跡の個人内変動というのは、幾何学的にむやみに歪むのではなく、射影歪みを伴うような変動であることが類推できる。

最良の結果を示した射影変換に注目して、射影変換を施した場合と個人内変動抑制処理をしなかった場合とを図 3.5 から抜き出してみると、図 3.6 のようになる。識別に 1 文字を使用したとき 8% 程度、2~6 文字を使用したとき、それぞれ 6%、4%、3%、3%、2% 程度の精度向上が見られ、平均識別

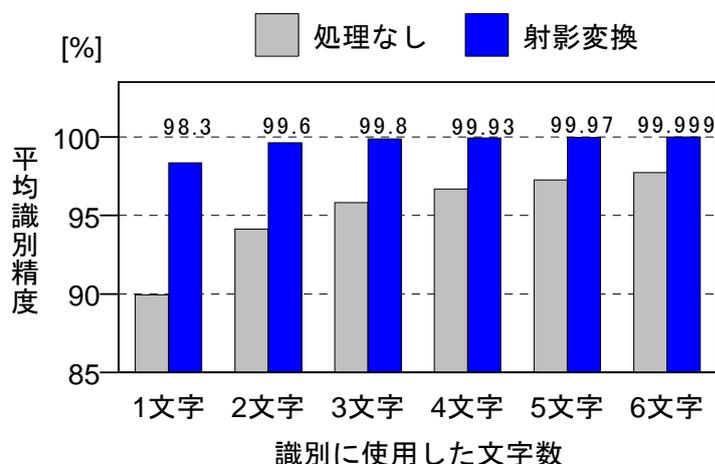


図3.6 射影変換の効果

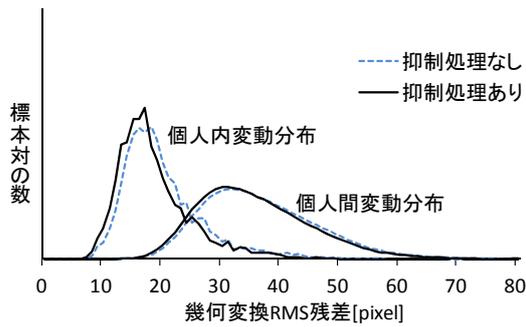
(個人内変動抑制処理により，識別精度は4文字を使用したとき99.9%以上，6文字を使用すると99.99%を超える)

精度(の平均)は4文字を使用したとき99.9%を超えている。99.9%という精度は，従来の科学捜査分野の鑑定において最高レベルとされている値であり，姓名によく使用される4文字でそれを達成できることがわかる。ちなみに，個人内変動抑制処理をしなかった場合の平均識別精度(の平均)は4文字のとき96.7%であり，これは従来の鑑定においては最低レベルの目安とされている値である。

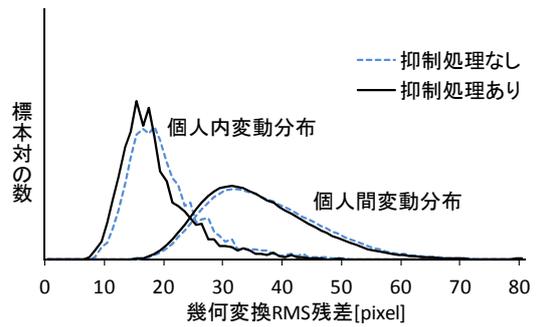
3.4.2 考察

なぜ射影変換が3.4.1に示したように高い個人内変動抑制効果を示したのかについて調べた。射影変換による個人内変動抑制処理により同一人が記載した複数の文字間における字形の変動が抑制され，ほぼ同じような字形となることを第2章2.2.6図2.5で示した。また，幾何変換RMS残差も半減することが分かった。本章では，射影変換以外の幾何変換式を使用したときに得られた個人内変動分布と個人間変動分布とを比較することでその効果について調べた。図3.7～図3.12に「東京都渋谷区」の各文字を識別に使用した場合について，各幾何変換前後の個人内変動分布と個人間変動分布を示す。幾何変換式の係数の数が6(特徴点数:3)以下の2次等

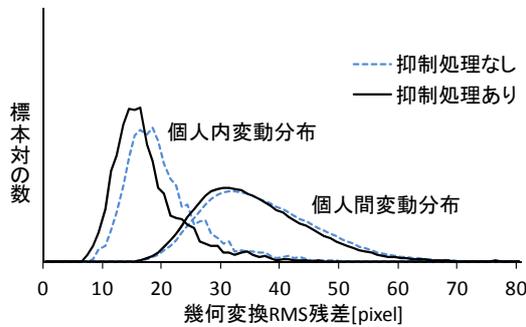
角変換，アフィン変換を個人内変動抑制処理に使用した場合，各図(a)，(b)に示したように，個人内変動分布も個人間変動分布もごくわずかに原点方向にずれるのみで，個人内変動分布の広がりにも顕著な変化はみられない．幾何変換式の係数の数が8（特徴点数：4）以上の疑似アフィン変換，射影変換，2次多項式，3次多項式を個人内変動抑制処理に使用した場合は，各図(c)～(f)に示したように，幾何変換式ごとで差はみられるものの，個人内変動抑制処理の効果が明確に現れ，個人内変動分布がグラフ上原点寄りにシフトする（幾何変換 RMS 残差が小さくなる）と同時に分布の広がりも小さくなっている．一方，個人間変動分布も少し原点よりにシフトしているが，そのシフト量は小さい．また分布の広がりはずかには小さくなっているように見られるが，ほとんど変化していない．これは，これらの幾何変換が筆跡個性を大きく損なうようには働いていないことを意味している．特に個人内変動抑制の効果は射影変換を適用したときに顕著であり，個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく，2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる．



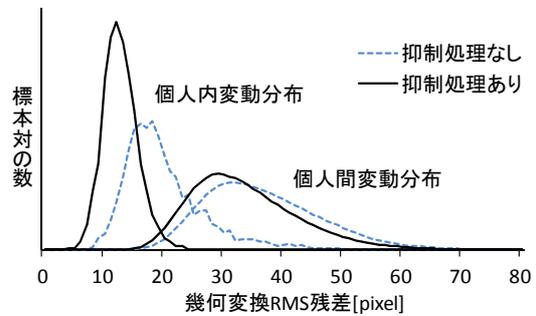
(a) 2次等角変換



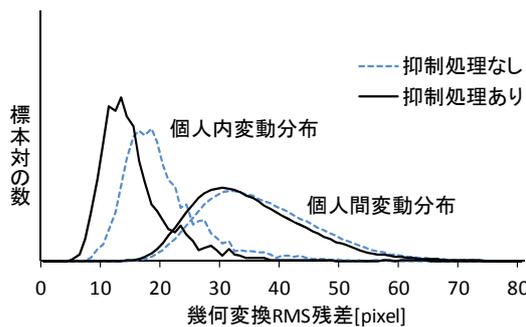
(b) アフィン変換



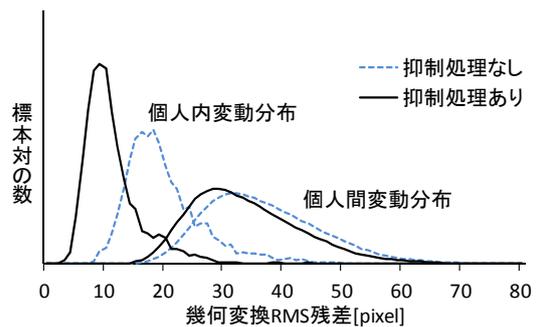
(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換

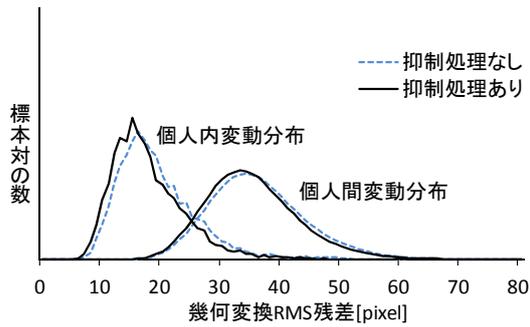


(e) 2次多項式

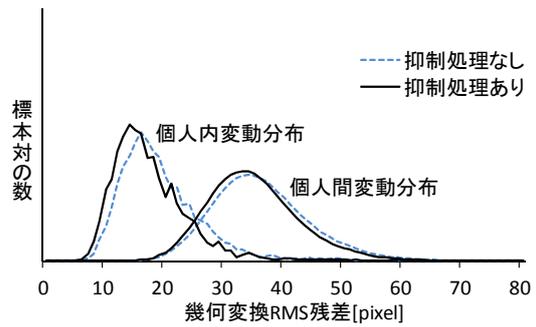


(f) 3次多項式

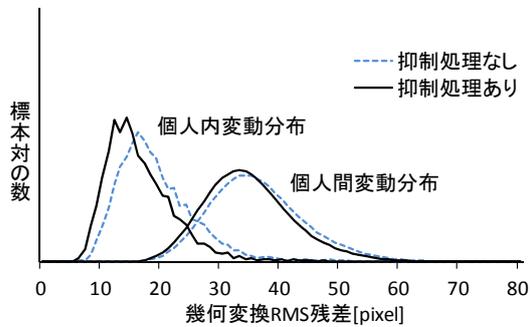
図3.7 「東」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)



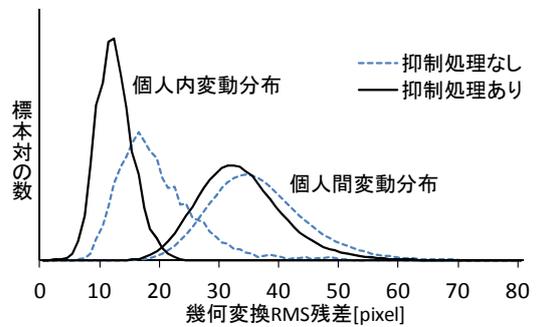
(a) 2次等角変換



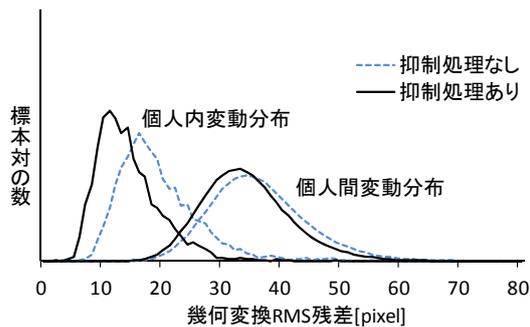
(b) アフィン変換



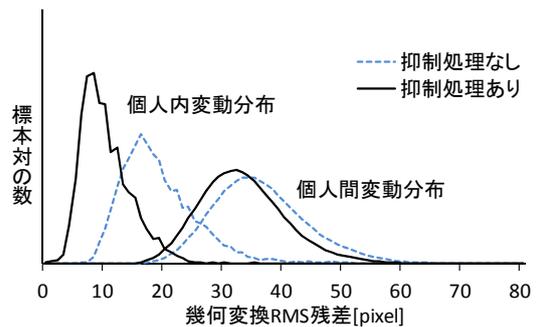
(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換

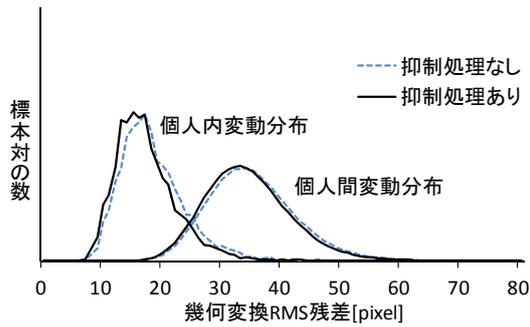


(e) 2次多項式

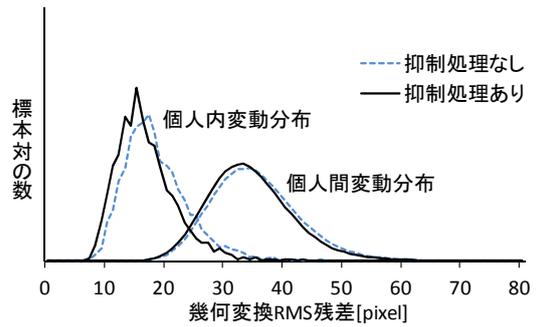


(f) 3次多項式

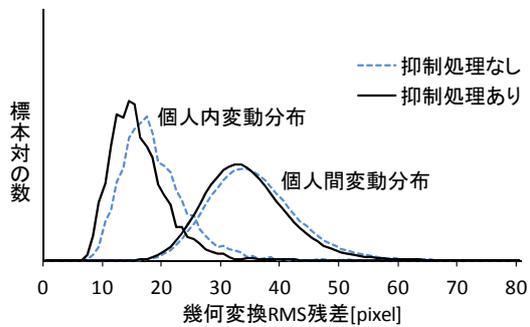
図3.8 「京」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)



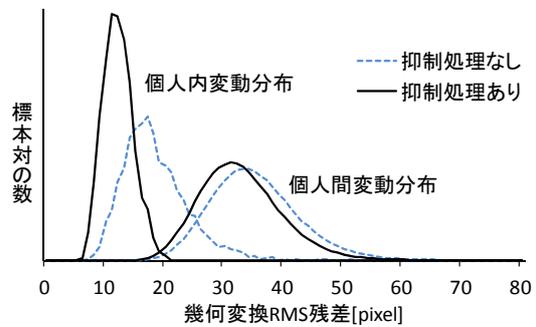
(a) 2次等角変換



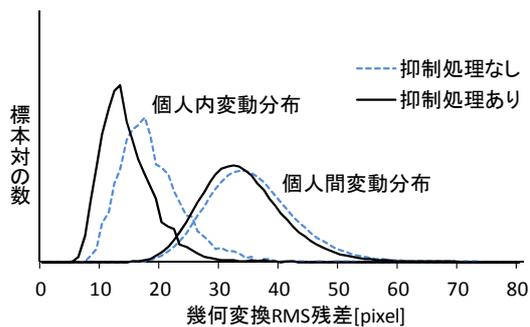
(b) アフィン変換



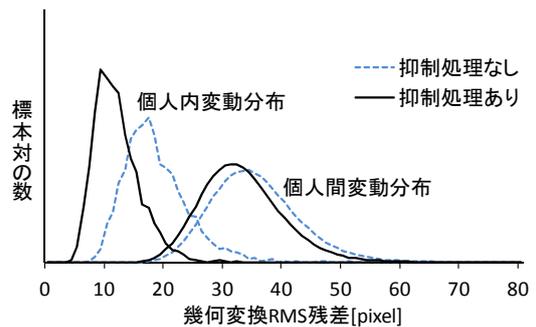
(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換

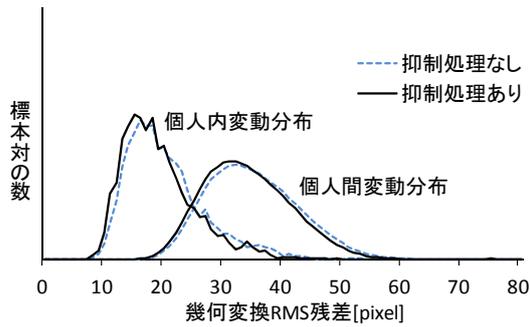


(e) 2次多項式

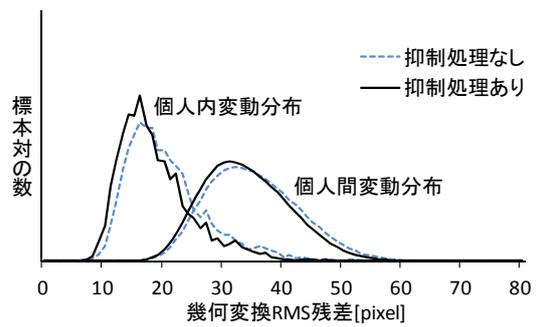


(f) 3次多項式

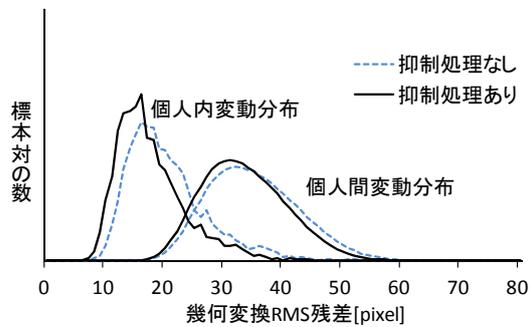
図3.9 「都」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)



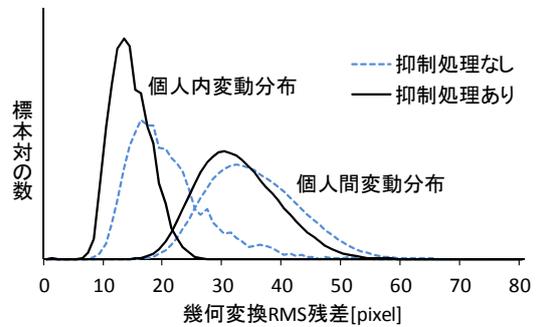
(a) 2次等角変換



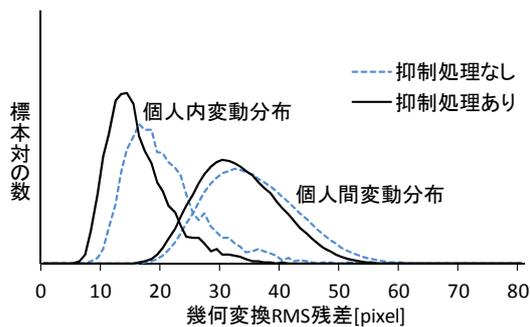
(b) アフィン変換



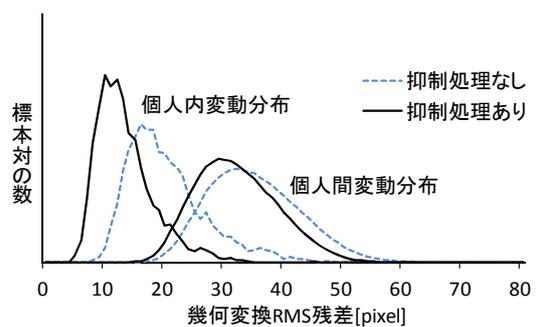
(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換

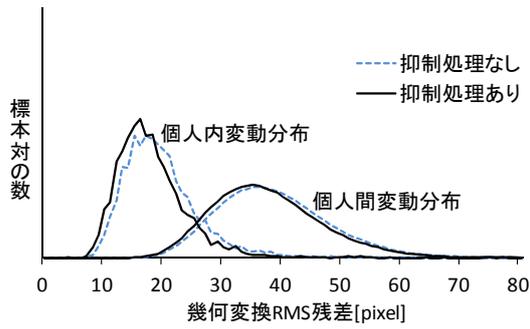


(e) 2次多項式

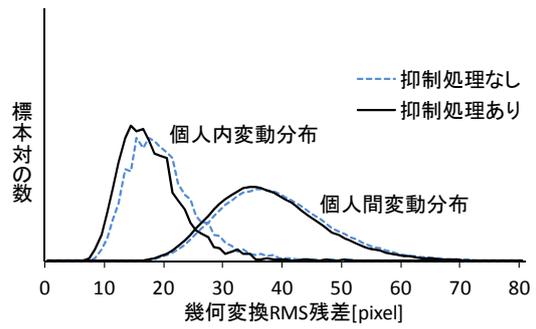


(f) 3次多項式

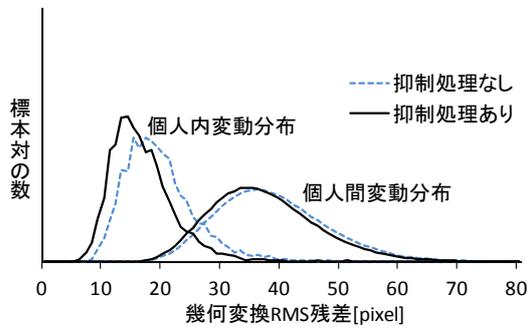
図3.10 「渋」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)



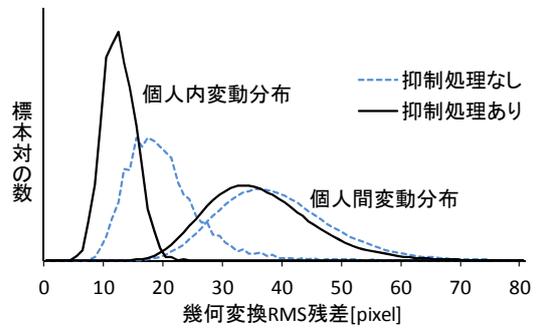
(a) 2次等角変換



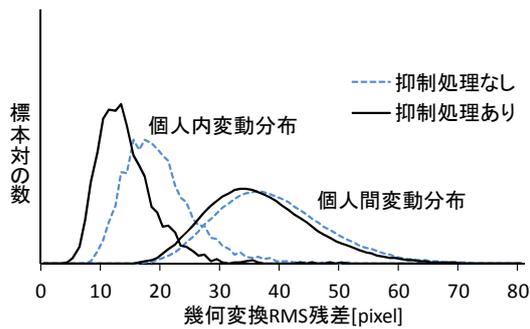
(b) アフィン変換



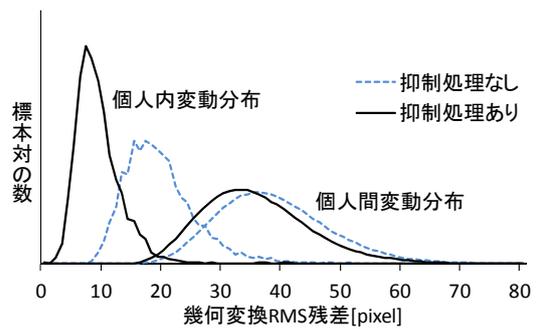
(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換

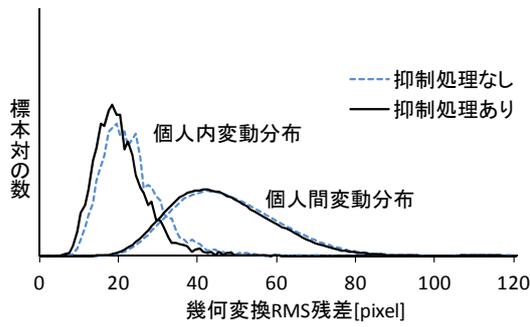


(e) 2次多項式

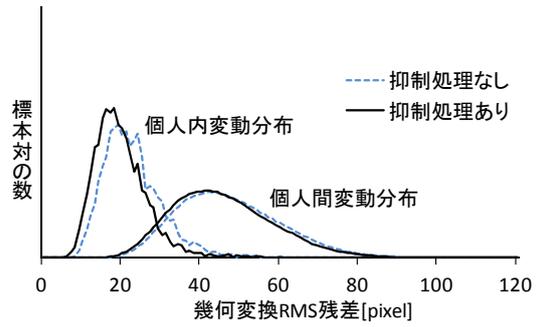


(f) 3次多項式

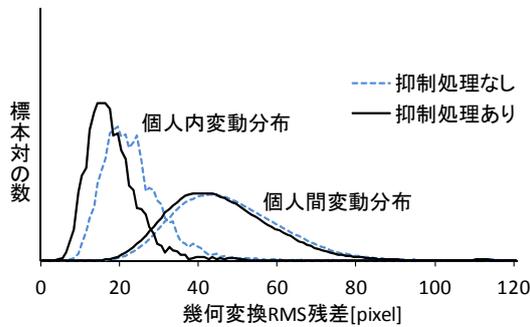
図3.11 「谷」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)



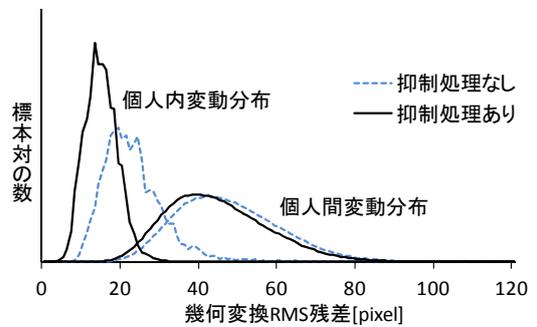
(a) 2次等角変換



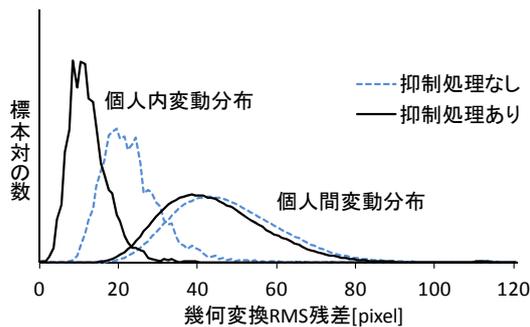
(b) アフィン変換



(c) 疑似アフィン変換



(d) 射影変換



(e) 2次多項式

図3.12 「区」に対する個人内変動抑制に使用する幾何変換式の効果
 (射影変換を適用したときに個人内変動抑制の効果は顕著であり、個人内・個人間変動分布のオーバーラップも最も小さく、2つの分布の分離度が最も向上しているのがわかる)

この分離度の向上を確認するために、「東京都渋谷区」の各文字を識別に使用した場合について、個人内変動抑制処理をしなかった場合と2次等角変換、アフィン変換、疑似アフィン変換、射影変換、2次多項式、3次多項式により個人内変動抑制処理した場合の個人内変動と個人間変動の二つの分布間の距離を計測した結果を表3.1に示す。距離としては、個人内変動分布から見た個人間変動分布の重心までのマハラノビス距離 d_{M1} と、個人間変動分布から見た個人内変動分布の重心までのマハラノビス距離 d_{M2} 、およびバタチャリヤ距離 d_B の3種類の距離を求めた。 d_{M1} と d_{M2} はそれぞれ個人内変動分布と個人間変動分布の標準偏差で互いの重心位置間のユークリッド距離を正規化したものを表し、 d_B は二つの分布間の距離を表す。なお、これらの距離は、個人内変動分布の平均と分散をそれぞれ μ_1, ν_1 、個人間変動分布のそれらをそれぞれ μ_2, ν_2 とすると、次式で与えられる。

$$d_{M1}^2 = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\nu_1} \quad (3.8)$$

$$d_{M2}^2 = \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\nu_2} \quad (3.9)$$

$$d_B = \frac{1}{4} \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{\nu_1 + \nu_2} + \frac{1}{2} \log \frac{\nu_1 + \nu_2}{2\sqrt{\nu_1 \nu_2}} \quad (3.10)$$

表3.1から、いずれの幾何変換式を用いても個人内変動分布の平均と分散が小さくなったために d_{M1} と d_{M2} は、個人内変動抑制処理の前後で、それぞれ1.1~3.4倍、1.1~1.5倍大きくなっており、その結果 d_B が1.2~3.5倍大きくなっていることが確認できる。この2つの分布の分離度の向上が、異同識別精度が向上した直接の理由であり、各種幾何変換式の中においても特に射影変換による抑制効果が顕著であることが示された。

射影変換とは数学的用語であり、図学的には中心投影変換に相当し、視点から見た物体の各点をその視点と物体の間にある平面上（投影面）に投影し、その物体に対応する図形を得る操作を表している²³⁾。このとき、平面上（投影面）に得られた図形は投影図、視点と投影図を結ぶ直線は投影線とよばれる。今、文字を書くという書字行動をこの射影変換（中心投影変換）の原理に当てはめると、筆記具を持つ指先は視点、筆記具は投影

線，文字が書かれる紙面は投影面，書かれた筆跡は投影図に対応させることが可能である．すなわち，射影変換の原理は文字を書くという書字行動とよく適合していると示唆され，個人内変動の抑制において最も効果が高かった理由と考えられた．

表3.1 幾何変換の種類による各文字の分離度

(射影変換による個人内変動の抑制効果は，いずれの文字においても分離度(d_B)を最も大きくしている)

字種	距離	抑制処理 (幾何変換種類)						
		なし	2次等角	アフィン	疑似アフィン	射影	2次多項式	3次多項式
東	d_{M1}	2.22	2.54	2.60	2.74	7.28	3.21	4.47
	d_{M2}	1.67	1.76	1.79	1.87	2.34	2.06	2.41
	d_B	0.47	0.56	0.58	0.63	1.51	0.80	1.21
京	d_{M1}	2.29	2.75	2.73	3.01	7.00	3.70	5.23
	d_{M2}	2.02	2.21	2.24	2.38	2.96	2.68	3.15
	d_B	0.58	0.75	0.76	0.88	2.02	1.21	1.88
都	d_{M1}	2.97	3.30	3.41	3.68	8.29	4.22	5.48
	d_{M2}	2.24	2.36	2.44	2.53	2.99	2.72	3.04
	d_B	0.82	0.95	1.01	1.12	2.21	1.36	1.85
渋	d_{M1}	2.05	2.34	2.40	2.56	5.50	2.97	3.67
	d_{M2}	1.87	2.00	2.07	2.18	2.68	2.39	2.69
	d_B	0.48	0.59	0.62	0.70	1.57	0.88	1.20
谷	d_{M1}	2.58	3.00	3.17	3.44	8.71	4.17	6.21
	d_{M2}	1.94	2.04	2.11	2.21	2.68	2.45	2.90
	d_B	0.62	0.75	0.81	0.91	1.93	1.19	1.86
区	d_{M1}	2.94	3.74	3.69	4.30	7.24	6.29	—
	d_{M2}	1.79	1.95	1.96	2.09	2.25	2.43	—
	d_B	0.64	0.85	0.84	1.00	1.44	1.48	—

3.5 本章のまとめ

筆者異同識別は、筆跡個性とその恒常性の存在を前提になされる。ところが実際には個人内変動とよばれるいわゆる書きむらがあり、その恒常性は高いとは言えない。本章では、個人内変動を抑制する最適な幾何変換モデルについて検討した。字形に関する個人内変動は、射影歪みでその多くを説明できること、それゆえ射影変換による個人内変動の抑制処理は、個人間変動すなわち筆跡個性の低下という副作用をほとんど与えず、個人内変動分布と個人間変動分布の2つの分布の分離度を向上させることをとおして、筆者異同識別精度の向上に寄与していることを明らかにした。その結果、検討した2次等角変換、アフィン変換、疑似アフィン変換、射影変換、2次多項式、3次多項式の6種類の内、射影変換が個人内変動を抑制する最適な幾何変換であることを示した。

実験対象とした筆跡標本は、楷書体で筆記してもらおうとか記入用の文字枠を設けるなどの制約は設けておらず、白紙に自由筆記されたものであることから、科学捜査分野で実際に扱うことが多い筆跡と大きくは違ってないと考えられる。また、識別に正規分布を仮定する最大尤度法を採用していることから、識別対象となる筆跡対が個人内標本対と個人間標本対それぞれ3,200対と1,276,000対と特に少なくはなく、偏った識別結果を与えているとは考えていない。しかし、被験者数は320人であり、現在得られている識別精度が高いことを考慮すると充分とは言えない。さらに、実験対象字種は、非常に限られた漢字6文字であり、他の字種やひらがな、カタカナ、数字などでも射影変換モデルが最適であるのか、検討していない。これらの問題点については、今後の課題としたい。

【参考文献】

- 1) 菊池真美, 赤松紀男: “高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 2) 宮川 透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳: “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 3) 小宮義光, 松本 隆: “ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”, 電子情報通信学会総合大会論文集, p. 217 (1999).
- 4) 栗津優作, 上田勝彦: “筆跡鑑定支援システムの開発”, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-11-75, p. 75 (2006).
- 5) 大川 学, 丸山 稔: “正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”, 第6回情報科学技術フォーラム(FIT2007)論文集, pp. 105-106 (2007).
- 6) 鈴木道孝, 渡辺秀人, 伊藤章義: “一般的な四角形枠による2次元形状正規化”, 信学技報, PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 7) 鈴木圭介, 塩山忠義: “パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”, 信学技報, PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 8) 清田公保, 櫻井敏彦, 山本眞司: “ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 9) 小高和己, 荒川弘熊, 増田 功: “ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 10) 田中敬子, 安藤慎吾, 中島真人: “局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”, 信学技報, PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 11) 梅田三千雄, 三好建生, 三崎揮市: “自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”, 電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).
- 12) 福井隆文, 梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 信学技報, PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).

- 13) 澤田武志, 大橋剛介, 下平美文: "視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法", 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).
- 14) 安藤慎吾, 中島真人: "オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法", 電子情報通信学会論文誌, No. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
- 15) 尾崎正弘, 足達義則, 石井直宏: "ファジィ理論を用いた筆者識別", 電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
- 16) 吉村ミツ, 吉村 功: "DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
- 17) 吉田 恵, 相澤優秀, 鮎川哲也, 小林裕幸: "固有空間法の筆者識別への適用", 日本鑑識科学技術学会誌, Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
- 18) 高澤則美: "筆跡鑑定", 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1-11 (1998).
- 19) 山崎 恭, 近藤維資, 小松尚久: "筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式", 画像電子学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 438-444 (1994).
- 20) 常盤公德, 福江潔也, 松前義昭: "個人内変動を抑制した字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別", 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.660-670 (2011).
- 21) 常盤公德, 福江潔也, : "筆者異同識別において個人内変動を抑制する幾何変換モデルの検討", 東海大学情報理工学部紀要, Vol.11, No.2, pp.1-9 (2011).
- 22) 高木幹雄, 下田陽久 (監), 「新編 画像解析ハンドブック」, 東京大学出版, 2004, p.1302, p.1304, p.1307.
- 23) 島田静雄: "インターネット時代の数学シリーズ 7 2000年の電子化版", 共立出版 (2000).

第4章 精度検証

4.1 はじめに

従来、筆者異同識別に関する研究は、文字の切り出し・正規化などの前処理から、特徴選択・抽出、識別に至る全般に渡って文献 1)~19)のように様々な研究が古くから継続されてきている。これらの研究では実用レベルから見ても分類性能、識別率などの良い数値が報告されている。しかし、これらの報告ではそれぞれが独自に収集したサンプルを用いて実験がなされており、得られた結果を分類性能や識別率などの性能評価の観点から客観的に評価することはできない。一般に認識システムには、収集サンプルの量と質、特徴量の次元数、実験材料に合わせた閾値の設定など、任意にオプションとして操作が可能な部分はいくつも存在し、こうした任意部を恣意的に調整することで見かけ上高い性能を示すことが可能となる²⁰⁾。また、企業などから提供される筆者識別を含む認証装置においても同様で、それらの認証精度を客観的に評価する尺度は存在しておらず、企業間における製品相互の比較を可能とするためにも識別精度の評価指標を明確にする必要がある。わが国における評価基準に関する標準化活動は1996年から進められ、これらの成果は日本規格協会情報技術標準化研究センター(INSTAC)バイオメトリクス標準化研究委員会に引き継がれ、標準となる精度評価方法や運用における要求精度の基準策定のための活動が行われてきた^{21)~24)}。

第2章において、オフライン型であっても確実にかつ容易に計測可能な字形に関する特徴のみに基づき、かつ実用レベルの筆者異同識別精度が得られるコンピュータによる筆者異同識別法を構築した²⁵⁾。この手法は、筆者320人の識別実験において、限られた特徴のみに基づいて識別を行うにもかかわらず、漢字4文字を使用した場合で99.9%以上という実用レベルの識別精度が得られることを示している。しかしながら、使用したサンプルは独自に収集したものであり、また、全標本法とよばれる母集団推定と識別に同じサンプルを使用しているため、識別精度が高めに推定されている可能性があり、先に述べた客観的評価の面から正しく性能評価がなされなくてはならない。

本章では，第 2 章において構築した筆者異同識別法によって得られた異同識別精度の信頼性について論じる．

まず提案する筆者異同識別法の基本的な考え方と処理の流れを 4.2 で述べた後，4.3 において精度検証の方法について述べ，各精度検証法によって得られる識別精度を比較する．4.4 で検証結果として照合精度特性と精度評価レポートを示し，最後に 4.5 で本章のまとめを行う．

なお，本章で使用する図表の一部は，参考文献 25)に掲載されているものを転載している．

4.2 提案手法の基本的な考え方と処理の流れ

提案する筆者異同識別法は，オフライン型である科学捜査分野において，抽出が容易な字画パターンに注目し，その幾何学的なマッチングの度合いを検査対象の筆跡対に関する類似度として使用する．すなわち，ある 2 つの筆跡が同一人物によって筆記されたものであれば同じような字画パターンになるであろうし，別人によって筆記されたものであれば字画パターンは違ってくるであろうと考え，検査対象の筆跡対に関する幾何学的類似度に基づき筆者異同識別を行う．

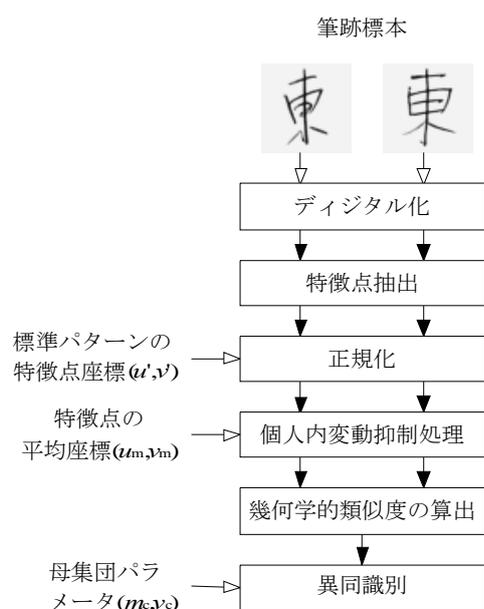


図 4.1 提案する筆者異同識別の流れ

その処理の流れは，①デジタル化，②特徴点抽出，③正規化，④個人内変動抑制処理，⑤幾何学的類似度の算出，⑥異同識別となるが，それを図 4.1 に示した．この流れに沿って以後，精度検証のための実験を行う．

なお，対象とする筆跡は，第 2 章で用いた被験者 320 人のものである．

4.3 検証方法

4.3.1 検証実験の方法

精度検証は以下の4つの方法で行った。

(1) 全標本法

全標本 X を用いて母集団推定を行い，同じ全標本での識別を行う。

(2) 交差検証法（2分割）²⁶⁾

全標本 X を2分割して得られる部分集合において，学習データ X_t とテストデータ X_v を入れ替えてそれぞれ母集団推定（訓練）と識別（検証）を行う。すなわち，最初は X_t を用いて訓練し， X_v を用いて検証する。次に， X_v を用いて訓練し， X_t を用いて検証する。検証は X_t と X_v に対してそれぞれ行われることになるが，それによって得られる識別精度 P_v を $P_{v(1)}$ ， $P_{v(2)}$ とすると，識別精度は次式で表す平均値 P_* となる。交差検証法 の概念図を 図4.2 に示す。

$$P_* = \frac{P_{v(1)} + P_{v(2)}}{2} \quad (4.1)$$

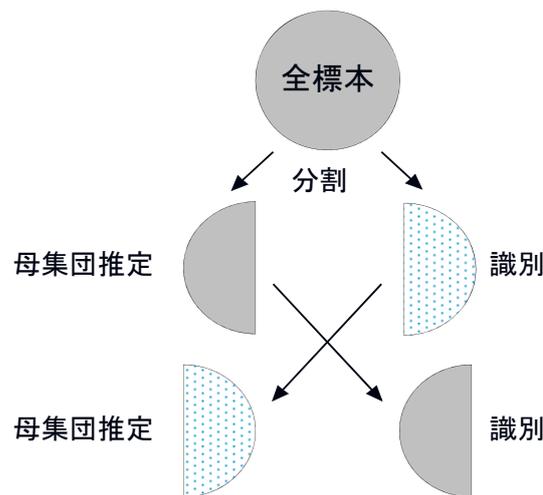


図4.2 交差検証法 の概念図

（全標本を2分割して得られる部分集合において，学習データとテストデータを入れ替えてそれぞれ母集団推定と識別を行う）

(3) m 重交差検証法²⁶⁾

全標本 X を m 分割して得られる X の部分集合を X_1, X_2, \dots, X_m とする。うち 1 つをテストデータ X_v とし、残りを学習データ X_t とする。 X_v としては m 種類あり得るので、それぞれに対して得られる識別精度 P_v を $P_{v(1)}, P_{v(2)}, \dots, P_{v(m)}$ とすると、識別精度は次式で表す平均値 P_* となる。本章では $m=4$ とし、4重交差検証を行う。概念図を図 4.3 に示す。

$$P_* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{v(i)} \tag{4.2}$$

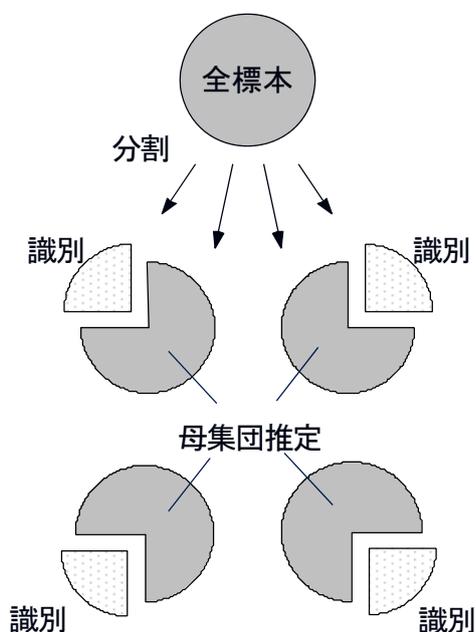


図4.3 4重交差検証法の概念図

(全標本を 4 分割して得られる部分集合のうち 1 つをテストデータとし、残りを学習データとする。テストデータは 4 種類あり得るので、それぞれに対して母集団推定と識別を行う)

(4) 1点除外法²⁶⁾²⁷⁾

全標本 X を構成するサンプル数を N とし、サンプルを x_1, x_2, \dots, x_N とする。また、 X からある 1 つのサンプル x_i を除いた部分集合を X_i とする。 X_i は N 個あるので X_i は X_1, X_2, \dots, X_N の N 種類を生成できる。このとき、ある X_i を X_i として訓練に用い、残りの唯一のサンプル x_i を対象に分類を行う。これを N 種類の X_i に対して反復すれば、 N 個のサンプルに対する分類結果が得られる。 N サンプル中、正しく分類された数（あるいは誤って分類された数）を N_* とすると、 P_v は次式で与えられる。この P_v を P_* として求める識別精度とする。一点除外法を概念を図 4.4 に示す。

$$P_v = \frac{N_*}{N_{all}} \tag{4.3}$$

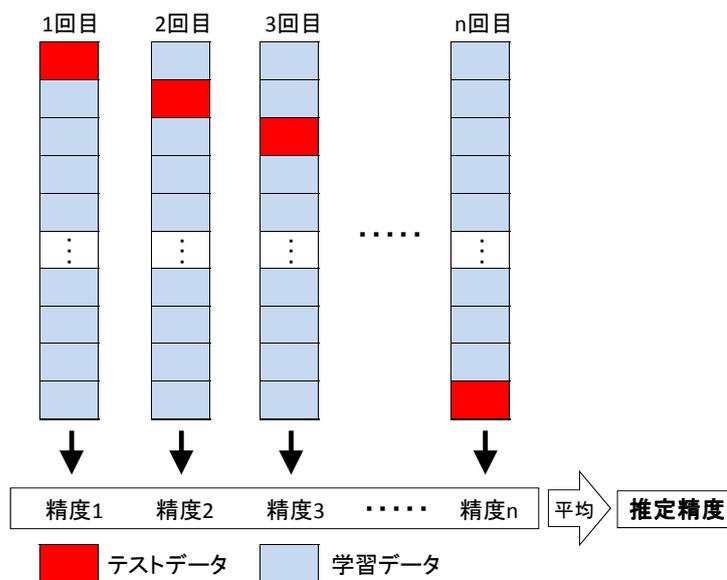


図4.4 1点除外法の概念図

(識別対象とするある 1 つの標本を全標本から取り除いて識別を行い、これを全ての標本について反復して識別誤差を求める)

4.3.2 各精度検証法による識別結果

(1) 全標本法

全標本（320人）で母集団推定（訓練）を行い、同じ全標本を用いて識別（検証）を行った。この結果を表4.1に示す。また、文字数ごとに得られた平均識別精度の平均を示したグラフを図4.5に示す。識別に4文字以上使用することで、99.9%以上の識別精度が得られることが分かる。なお、TMRとTNMRの結果も追加した。

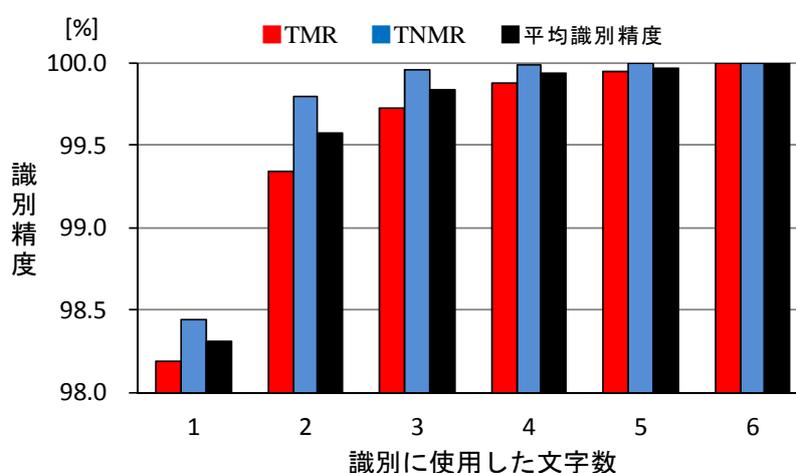


図4.5 全標本法による識別精度

表4.1 全標本法による識別結果

	FNMR	TMR	FMR	TNMR	平均識別誤差	平均識別精度
東	2.52E-02	97.4844	1.75E-02	98.2491	2.13E-02	97.8667
京	1.64E-02	98.3594	9.83E-03	99.0166	1.31E-02	98.6880
都	9.53E-03	99.0469	5.09E-03	99.4906	7.31E-03	99.2687
洪	2.98E-02	97.0156	2.65E-02	97.3464	2.82E-02	97.1810
谷	8.28E-03	99.1719	7.59E-03	99.2413	7.93E-03	99.2066
区	1.94E-02	98.0625	2.70E-02	97.2955	2.32E-02	97.6790
平均値	1.81E-02	98.1901	1.56E-02	98.4399	1.68E-02	98.3150
東京	1.03E-02	98.9687	2.38E-03	99.7617	6.35E-03	99.3652
東都	7.03E-03	99.2969	3.79E-03	99.6214	4.13E-03	99.5869
東洪	1.17E-02	98.8281	3.77E-03	99.6234	7.74E-03	99.2258
東谷	7.03E-03	99.2969	1.20E-03	99.8796	4.12E-03	99.5882
東区	1.05E-02	98.9531	3.13E-03	99.6873	6.80E-03	99.3202
京都	2.50E-03	99.7500	8.45E-04	99.9155	1.67E-03	99.8328
京洪	7.03E-03	99.2969	2.38E-03	99.7623	4.70E-03	99.5296
京谷	2.66E-03	99.7344	6.28E-04	99.9372	1.64E-03	99.8358
京区	5.16E-03	99.4844	1.85E-03	99.8152	3.50E-03	99.6498
都洪	5.78E-03	99.4219	1.85E-03	99.8145	3.81E-03	99.6186
都谷	1.72E-03	99.8281	5.64E-04	99.9436	1.14E-03	99.8859
都区	6.25E-03	99.3750	1.38E-03	99.8622	3.81E-03	99.6186
洪谷	4.69E-03	99.5313	1.59E-03	99.8414	3.14E-03	99.6863
洪区	8.75E-03	99.1250	3.51E-03	99.6492	6.13E-03	99.3871
谷区	7.66E-03	99.2344	1.45E-03	99.8550	4.55E-03	99.5447
平均値	6.58E-03	99.3417	2.02E-03	99.7980	4.22E-03	99.5784
東京都	2.81E-03	99.7188	3.81E-04	99.9619	1.60E-03	99.8403
東京洪	4.53E-03	99.5469	9.97E-04	99.9003	2.76E-03	99.7236
東京谷	2.19E-03	99.7813	2.67E-04	99.9733	1.23E-03	99.8773
東京区	3.44E-03	99.6563	5.51E-04	99.9449	1.99E-03	99.8006
東都洪	2.66E-03	99.7344	6.65E-04	99.9335	1.66E-03	99.8339
東都谷	2.97E-03	99.7031	2.21E-04	99.9779	1.60E-03	99.8405
東都区	5.00E-03	99.5000	3.29E-04	99.9671	2.66E-03	99.7335
東洪谷	3.13E-03	99.6875	4.82E-04	99.9518	1.80E-03	99.8197
東洪区	4.53E-03	99.5469	6.90E-04	99.9310	2.61E-03	99.7389
東谷区	5.16E-03	99.4844	2.96E-04	99.9704	2.73E-03	99.7274
京都洪	1.72E-03	99.8281	4.71E-04	99.9529	1.09E-03	99.8905
京都谷	1.56E-03	99.8438	1.38E-04	99.9862	8.50E-04	99.9150
京都区	1.88E-03	99.8125	2.25E-04	99.9775	1.05E-03	99.8950
京洪谷	9.38E-04	99.9063	3.01E-04	99.9699	6.19E-04	99.9381
京洪区	2.66E-03	99.7344	4.89E-04	99.9511	1.57E-03	99.8427
京谷区	1.41E-03	99.8594	1.55E-04	99.9845	7.81E-04	99.9219
都洪谷	1.56E-03	99.8438	2.82E-04	99.9718	9.22E-04	99.9078
都洪区	2.50E-03	99.7500	4.13E-04	99.9587	1.46E-03	99.8544
都谷区	1.72E-03	99.8281	1.84E-04	99.9816	9.51E-04	99.9049
洪谷区	2.81E-03	99.7188	3.38E-04	99.9662	1.58E-03	99.8425
平均値	2.76E-03	99.7242	3.94E-04	99.9606	1.58E-03	99.8424
東京都洪	1.41E-03	99.8594	2.73E-04	99.9727	8.40E-04	99.9160
東京都谷	1.88E-03	99.8125	7.92E-05	99.9921	9.77E-04	99.9023
東京都区	1.56E-03	99.8438	1.01E-04	99.9899	8.32E-04	99.9168
東京洪谷	9.38E-04	99.9063	1.72E-04	99.9828	5.55E-04	99.9445
東京洪区	1.09E-03	99.8906	2.06E-04	99.9794	6.50E-04	99.9350
東京谷区	1.41E-03	99.8594	6.90E-05	99.9931	7.38E-04	99.9262
東都洪谷	7.81E-04	99.9219	1.38E-04	99.9862	4.59E-04	99.9541
東都洪区	1.88E-03	99.8125	1.45E-04	99.9855	1.01E-03	99.8990
東都谷区	2.19E-03	99.7813	7.68E-05	99.9923	1.13E-03	99.8868
東洪谷区	1.56E-03	99.8438	9.99E-05	99.9900	8.31E-04	99.9169
京都洪谷	6.25E-04	99.9375	8.23E-05	99.9918	3.54E-04	99.9646
京都洪区	6.25E-04	99.9375	1.09E-04	99.9891	3.67E-04	99.9633
京都谷区	6.25E-04	99.9375	4.94E-05	99.9951	3.37E-04	99.9663
京洪谷区	9.38E-04	99.9063	7.60E-05	99.9924	5.07E-04	99.9493
都洪谷区	6.25E-04	99.9375	6.94E-05	99.9931	3.47E-04	99.9653
平均値	1.21E-03	99.8792	1.16E-04	99.9884	6.62E-04	99.9338
東京都洪谷	6.25E-04	99.9375	6.00E-05	99.9940	3.42E-04	99.9658
東京都洪区	3.13E-04	99.9688	5.80E-05	99.9942	1.85E-04	99.9815
東京都谷区	6.25E-04	99.9375	3.10E-05	99.9969	3.28E-04	99.9672
東京洪谷区	6.25E-04	99.9375	4.27E-05	99.9957	3.34E-04	99.9666
東都洪谷区	7.81E-04	99.9219	3.84E-05	99.9962	4.10E-04	99.9590
京都洪谷区	0.00E+00	100.0000	2.27E-05	99.9977	1.14E-05	99.9989
平均値	4.95E-04	99.9505	4.21E-05	99.9958	2.68E-04	99.9732
東京都洪谷区	0.00E+00	100.0000	1.65E-05	99.9984	8.23E-06	99.9992

(2) 交差検証法

全標本を 160 人づつ、グループ 1(G1)、グループ 2(G2)の 2 グループに分割する。次にグループ 1 で母集団推定 (訓練)、グループ 2 で識別 (検証) を行い、交差させて、グループ 2 で母集団推定 (訓練)、グループ 1 で識別 (検証) を行った。得られた 2 つの平均識別精度の平均を交差検証法での識別精度とする。この結果を表 4.2 に示す。また、図 4.6 に文字数ごとに得られる識別精度の平均を示す。全標本法と同様に、識別に 4 文字以上使用することで 99.9%以上の識別精度が得られることが分かる。

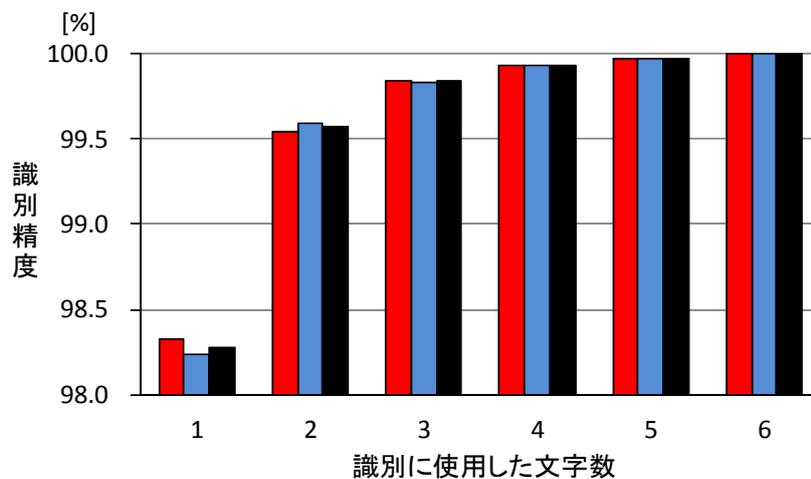


図4.6 交差検証法による平均識別精度

- : 学習データ G1, テストデータ G2
- : 学習データ G2, テストデータ G1
- : 平均識別精度

表4.2 交差検証法の識別結果

訓練 識別	G1		G2		平均	
	G2		G1			
	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度
東	2.07E-02	97.9300	2.25E-02	97.7494	2.16E-02	97.8397
京	1.22E-02	98.7829	1.71E-02	98.2936	1.46E-02	98.5383
都	7.01E-03	99.2993	7.90E-03	99.2103	7.45E-03	99.2548
洪	3.10E-02	96.8993	2.56E-02	97.4408	2.83E-02	97.1701
谷	7.57E-03	99.2432	9.08E-03	99.0918	8.32E-03	99.1675
区	2.22E-02	97.7767	2.39E-02	97.6079	2.31E-02	97.6923
平均値	1.68E-02	98.3219	1.77E-02	98.2323	1.72E-02	98.2771
東京都	7.86E-03	99.2137	5.05E-03	99.4955	6.45E-03	99.3546
東京都	4.74E-03	99.5265	3.72E-03	99.6284	4.23E-03	99.5774
東洪	7.99E-03	99.2009	7.67E-03	99.2329	7.83E-03	99.2169
東谷	4.86E-03	99.5143	3.71E-03	99.6290	4.28E-03	99.5717
東区	5.57E-03	99.4432	6.91E-03	99.3087	6.24E-03	99.3759
京都	1.66E-03	99.8344	1.73E-03	99.8271	1.69E-03	99.8307
京洪	4.95E-03	99.5052	4.72E-03	99.5282	4.83E-03	99.5167
京谷	1.27E-03	99.8728	2.28E-03	99.7716	1.78E-03	99.8222
京区	3.22E-03	99.6780	3.92E-03	99.6080	3.57E-03	99.6430
都洪	3.52E-03	99.6475	3.96E-03	99.6044	3.74E-03	99.6260
都谷	2.65E-03	99.7346	4.23E-04	99.9577	1.54E-03	99.8461
都区	4.17E-03	99.5827	3.98E-03	99.6017	4.08E-03	99.5922
洪谷	4.40E-03	99.5597	2.43E-03	99.7574	3.41E-03	99.6586
洪区	4.65E-03	99.5346	7.41E-03	99.2586	6.03E-03	99.3966
谷区	6.24E-03	99.3761	3.04E-03	99.6957	4.64E-03	99.5359
平均値	4.52E-03	99.5483	4.06E-03	99.5937	4.29E-03	99.5710
東京都	1.73E-03	99.8271	1.48E-03	99.8521	1.60E-03	99.8396
東京洪	3.24E-03	99.6755	1.98E-03	99.8023	2.61E-03	99.7389
東京谷	2.04E-03	99.7958	4.54E-04	99.9546	1.25E-03	99.8752
東京区	2.06E-03	99.7936	1.77E-03	99.8225	1.92E-03	99.8081
東都洪	1.66E-03	99.8340	1.61E-03	99.8386	1.64E-03	99.8363
東都谷	3.52E-03	99.6484	7.45E-04	99.9256	2.13E-03	99.7870
東都区	2.76E-03	99.7244	2.78E-03	99.7222	2.77E-03	99.7233
東洪谷	1.87E-03	99.8133	1.72E-03	99.8278	1.79E-03	99.8205
東洪区	1.00E-03	99.8995	4.26E-03	99.5736	2.63E-03	99.7365
東谷区	1.01E-03	99.8988	1.18E-03	99.8816	1.10E-03	99.8902
京都洪	1.01E-03	99.8991	6.93E-04	99.9307	8.51E-04	99.9149
京都谷	6.21E-04	99.9379	1.34E-03	99.8664	9.78E-04	99.9022
京都区	1.04E-03	99.8956	7.61E-04	99.9239	9.03E-04	99.9097
京洪谷	6.42E-04	99.9358	2.61E-03	99.7393	1.62E-03	99.8376
京洪区	1.22E-03	99.8783	7.08E-04	99.9292	9.62E-04	99.9038
京谷区	4.83E-04	99.9517	9.21E-04	99.9079	7.02E-04	99.9298
都洪谷	6.54E-04	99.9346	2.34E-03	99.7656	1.50E-03	99.8501
都洪区	1.20E-03	99.8801	3.85E-04	99.9615	7.92E-04	99.9208
都谷区	9.07E-04	99.9093	2.44E-03	99.7562	1.67E-03	99.8327
洪谷区	2.72E-03	99.7283	2.91E-03	99.7089	2.81E-03	99.7186
平均値	1.57E-03	99.8430	1.65E-03	99.8345	1.61E-03	99.8388
東京都洪	7.52E-04	99.9248	7.72E-04	99.9228	7.62E-04	99.9238
東京都谷	1.29E-03	99.8707	3.43E-04	99.9657	8.18E-04	99.9182
東京都区	5.54E-04	99.9446	9.70E-04	99.9030	7.62E-04	99.9238
東京洪谷	1.07E-03	99.8927	6.21E-05	99.9938	5.68E-04	99.9432
東京洪区	1.45E-04	99.9855	1.63E-03	99.8371	8.87E-04	99.9113
東京谷区	6.78E-04	99.9322	6.44E-04	99.9356	6.61E-04	99.9339
東都洪谷	7.02E-04	99.9298	3.43E-04	99.9657	5.23E-04	99.9477
東都洪区	4.23E-04	99.9577	1.62E-03	99.8381	1.02E-03	99.8979
東都谷区	4.17E-04	99.9583	1.27E-03	99.8732	8.43E-04	99.9157
東洪谷区	3.64E-04	99.9636	2.75E-05	99.9972	1.96E-04	99.9804
京都洪谷	8.18E-05	99.9918	1.12E-03	99.8884	5.99E-04	99.9401
京都洪区	5.22E-04	99.9478	2.67E-05	99.9973	2.74E-04	99.9726
京都谷区	2.09E-03	99.7909	2.04E-05	99.9980	1.06E-03	99.8944
京洪谷区	3.71E-04	99.9629	6.50E-04	99.9350	5.11E-04	99.9489
都洪谷区	1.82E-04	99.9818	3.42E-04	99.9658	2.62E-04	99.9738
平均値	6.43E-04	99.9357	6.56E-04	99.9344	6.49E-04	99.9351
東京都洪谷	6.65E-04	99.9335	1.57E-05	99.9984	3.40E-04	99.9660
東京都洪区	4.40E-05	99.9956	3.25E-04	99.9675	1.85E-04	99.9815
東京都谷区	4.25E-05	99.9958	6.31E-04	99.9369	3.37E-04	99.9663
東京洪谷区	3.47E-04	99.9653	6.34E-04	99.9366	4.91E-04	99.9509
東都洪谷区	1.18E-05	99.9988	7.86E-06	99.9992	9.83E-06	99.9990
京都洪谷区	6.45E-04	99.9355	1.02E-05	99.9990	3.27E-04	99.9673
平均値	2.93E-04	99.9707	2.71E-04	99.9729	2.82E-04	99.9718
東京都洪谷区	1.18E-05	99.9988	4.72E-06	99.9995	8.25E-06	99.9992

(3) 4重交差検証法

全標本を80人ずつ、グループ1(G1)、グループ2(G2)、グループ3(G3)、グループ4(G4)の4グループに分割する。次にグループ1, 2, 3で母集団推定(訓練)し、残りのグループ4で識別(検証)を行う。これを、グループ1, 2, 4、グループ1, 3, 4、グループ2, 3, 4で同様に母集団推定(訓練)し、グループ3, 2, 1でそれぞれ識別(検証)を行った。それぞれの結果を表4.3に示す。また、図4.7に文字数ごとに得られる識別精度の平均を示す。このときの4回の識別結果の平均を4重交差検証法の識別結果とする。全標本法、交差検証法と同様に、識別に4文字以上使用することで99.9%以上の識別精度が得られることが分かる。

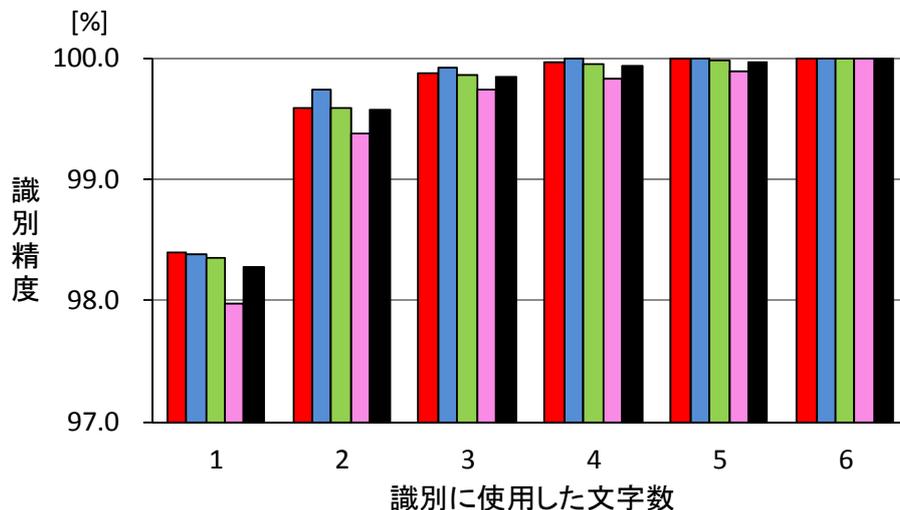


図4.7 4重交差検証法による平均識別精度

- : 学習データ G1, G2, G3. テストデータ G4.
- : 学習データ G1, G2, G4. テストデータ G3.
- : 学習データ G1, G3, G4. テストデータ G2.
- : 学習データ G2, G3, G4. テストデータ G1.
- : 平均識別精度

表4.3 4重交差検証法の識別結果

訓練 識別	G1+G2+G3		G1+G2+G4		G1+G3+G4		G2+G3+G4		平均	
	G4		G3		G2		G1			
	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度	平均識別誤差	平均識別精度
東	1.17E-02	98.8266	2.23E-02	97.7736	2.91E-02	97.0932	2.37E-02	97.6328	2.17E-02	97.8316
京	8.00E-03	99.1997	1.29E-02	98.7142	1.35E-02	98.6513	2.44E-02	97.5616	1.47E-02	98.5317
都	5.81E-03	99.4190	5.28E-03	99.4722	5.20E-03	99.4799	1.26E-02	98.7441	7.21E-03	99.2788
洪	3.53E-02	96.4653	2.79E-02	97.2055	2.73E-02	97.2675	2.25E-02	97.7512	2.83E-02	97.1724
谷	7.37E-03	99.2628	7.14E-03	99.2862	7.51E-03	99.2493	1.20E-02	98.8032	8.50E-03	99.1504
区	2.77E-02	97.2339	2.20E-02	97.8008	1.65E-02	98.3528	2.63E-02	97.3695	2.31E-02	97.6893
平均値	1.60E-02	98.4012	1.62E-02	98.3754	1.65E-02	98.3490	2.02E-02	97.9771	1.72E-02	98.2757
東京都	3.44E-03	99.6563	4.04E-03	99.5958	1.04E-02	98.9619	1.08E-02	98.9236	7.16E-03	99.2844
東京都	8.50E-04	99.9150	3.86E-04	99.9614	5.83E-03	99.4174	9.21E-03	99.0787	4.07E-03	99.5931
東京都	8.37E-03	99.1635	7.63E-03	99.2366	6.16E-03	99.3837	8.49E-03	99.1508	7.66E-03	99.2336
東京都	3.03E-03	99.6965	1.82E-03	99.8180	5.01E-03	99.4989	6.65E-03	99.3348	4.13E-03	99.5870
東京都	6.21E-03	99.3790	3.54E-03	99.6460	6.82E-03	99.3177	9.90E-03	99.0098	6.62E-03	99.3381
東京都	1.36E-04	99.9864	8.84E-04	99.9116	8.24E-04	99.9176	3.03E-03	99.6968	1.22E-03	99.8781
東京都	4.01E-03	99.5987	4.37E-03	99.5635	4.63E-03	99.5370	6.01E-03	99.3987	4.76E-03	99.5245
東京都	7.34E-04	99.9266	1.88E-03	99.8117	8.23E-05	99.9918	5.35E-03	99.4649	2.01E-03	99.7987
東京都	4.72E-03	99.5275	2.65E-03	99.7350	2.42E-03	99.7577	5.17E-03	99.4831	3.74E-03	99.6258
東京都	3.00E-03	99.6998	5.89E-04	99.9411	2.96E-03	99.7044	4.91E-03	99.5095	2.86E-03	99.7137
東京都	1.75E-03	99.8251	4.34E-04	99.9566	1.11E-03	99.8892	1.55E-03	99.8446	1.21E-03	99.8789
東京都	5.05E-03	99.4955	2.25E-04	99.9775	4.09E-03	99.5910	6.72E-03	99.3279	4.02E-03	99.5980
東京都	4.84E-03	99.5164	3.34E-03	99.6655	2.81E-03	99.7193	2.26E-03	99.7741	3.31E-03	99.6688
東京都	7.75E-03	99.2254	5.88E-03	99.4117	2.94E-03	99.7057	8.96E-03	99.1041	6.38E-03	99.3617
東京都	7.18E-03	99.2817	1.46E-03	99.8543	5.19E-03	99.4809	4.82E-03	99.5182	4.66E-03	99.5338
平均値	4.07E-03	99.5929	2.61E-03	99.7391	4.08E-03	99.5916	6.25E-03	99.3746	4.25E-03	99.5746
東京都	7.59E-05	99.9924	9.18E-05	99.9908	1.40E-03	99.8604	4.05E-03	99.5946	1.40E-03	99.8596
東京都	1.70E-03	99.8304	2.39E-03	99.7606	3.38E-03	99.6622	4.07E-03	99.5930	2.88E-03	99.7115
東京都	9.89E-04	99.9011	1.93E-04	99.9807	1.88E-03	99.8119	2.95E-03	99.7055	1.50E-03	99.8498
東京都	9.54E-04	99.9046	5.44E-04	99.9456	3.50E-03	99.6498	3.31E-03	99.6688	2.08E-03	99.7922
東京都	1.27E-03	99.8728	8.02E-04	99.9198	9.45E-04	99.9055	2.61E-03	99.7385	1.41E-03	99.8592
東京都	1.69E-03	99.8314	1.01E-04	99.9899	2.95E-03	99.7045	1.99E-03	99.8011	1.68E-03	99.8317
東京都	7.07E-04	99.9293	0.00E+00	100.0000	4.83E-03	99.5173	6.09E-03	99.3914	2.91E-03	99.7095
東京都	2.16E-03	99.7840	2.66E-03	99.7342	8.88E-04	99.9112	1.96E-03	99.8036	1.92E-03	99.8083
東京都	1.80E-03	99.8203	2.07E-03	99.7929	3.42E-04	99.9658	5.90E-03	99.4097	2.53E-03	99.7472
東京都	3.48E-05	99.9965	7.42E-04	99.9258	7.07E-04	99.9293	1.28E-03	99.8721	6.91E-04	99.9309
東京都	9.49E-05	99.9905	4.43E-05	99.9956	6.28E-04	99.9372	1.29E-03	99.8712	5.14E-04	99.9486
東京都	9.94E-04	99.9006	1.27E-05	99.9987	7.77E-04	99.9223	1.90E-03	99.8097	9.22E-04	99.9078
東京都	6.69E-04	99.9331	1.33E-04	99.9867	6.82E-04	99.9318	7.23E-04	99.9277	5.52E-04	99.9448
東京都	6.41E-04	99.9359	6.47E-04	99.9353	3.10E-04	99.9690	3.23E-03	99.6771	1.21E-03	99.8793
東京都	2.58E-03	99.7418	8.86E-05	99.9911	1.38E-03	99.8617	1.88E-03	99.8116	1.48E-03	99.8515
東京都	7.68E-04	99.9232	1.40E-03	99.8601	1.90E-05	99.9981	7.10E-04	99.9290	7.24E-04	99.9276
東京都	1.57E-03	99.8434	2.56E-03	99.7440	1.93E-04	99.9807	1.46E-03	99.8538	1.45E-03	99.8555
東京都	2.32E-03	99.7680	1.11E-04	99.9889	5.70E-05	99.9943	9.56E-04	99.9044	8.61E-04	99.9139
東京都	8.47E-04	99.9153	1.93E-03	99.8071	8.05E-04	99.9195	2.85E-03	99.7146	1.61E-03	99.8391
東京都	2.08E-03	99.7923	8.09E-04	99.9191	4.02E-03	99.5984	4.42E-03	99.5584	2.83E-03	99.7171
平均値	1.20E-03	99.8803	8.66E-04	99.9134	1.48E-03	99.8515	2.68E-03	99.7318	1.56E-03	99.8443
東京都	3.16E-06	99.9997	7.59E-05	99.9924	8.23E-05	99.9918	2.13E-03	99.7875	5.72E-04	99.9428
東京都	7.59E-05	99.9924	6.33E-06	99.9994	1.25E-03	99.8747	1.92E-03	99.8084	8.13E-04	99.9187
東京都	4.75E-05	99.9953	0.00E+00	100.0000	1.38E-03	99.8617	2.55E-03	99.7453	9.94E-04	99.9006
東京都	8.72E-04	99.9128	7.28E-05	99.9927	1.27E-05	99.9987	1.90E-03	99.8097	7.15E-04	99.9285
東京都	1.01E-04	99.9899	2.53E-05	99.9975	1.17E-04	99.9883	3.86E-03	99.6142	1.03E-03	99.8975
東京都	1.01E-04	99.9899	3.48E-05	99.9965	1.28E-03	99.8715	1.88E-03	99.8122	8.25E-04	99.9175
東京都	9.75E-04	99.9025	4.11E-05	99.9959	1.33E-04	99.9867	2.85E-05	99.9972	2.95E-04	99.9706
東京都	6.38E-04	99.9362	0.00E+00	100.0000	1.74E-04	99.9826	3.21E-03	99.6793	1.00E-03	99.8995
東京都	6.95E-04	99.9305	3.31E-04	99.9669	1.27E-04	99.9873	2.19E-03	99.7806	8.37E-04	99.9163
東京都	1.90E-05	99.9981	0.00E+00	100.0000	0.00E+00	100.0000	6.38E-04	99.9362	1.64E-04	99.9836
東京都	1.27E-05	99.9987	0.00E+00	100.0000	1.08E-04	99.9892	1.27E-03	99.8734	3.47E-04	99.9653
東京都	6.38E-04	99.9362	1.27E-05	99.9987	4.11E-04	99.9589	0.00E+00	100.0000	2.65E-04	99.9735
東京都	6.82E-04	99.9318	6.33E-06	99.9994	2.64E-03	99.7364	1.25E-03	99.8750	1.14E-03	99.8856
東京都	7.01E-04	99.9299	1.58E-05	99.9984	1.90E-05	99.9981	1.25E-03	99.8747	4.97E-04	99.9503
東京都	4.43E-05	99.9956	2.22E-05	99.9978	6.33E-06	99.9994	1.25E-03	99.8750	3.31E-04	99.9669
平均値	3.74E-04	99.9626	4.30E-05	99.9957	5.16E-04	99.9484	1.69E-03	99.8312	6.55E-04	99.9345
東京都	1.58E-05	99.9984	0.00E+00	100.0000	0.00E+00	100.0000	1.28E-03	99.8725	3.23E-04	99.9677
東京都	9.49E-06	99.9991	0.00E+00	100.0000	9.81E-05	99.9902	1.91E-03	99.8090	5.04E-04	99.9496
東京都	6.65E-05	99.9934	6.33E-06	99.9994	4.11E-05	99.9959	1.26E-03	99.8744	3.43E-04	99.9657
東京都	6.38E-04	99.9362	0.00E+00	100.0000	1.08E-04	99.9892	1.25E-03	99.8750	4.99E-04	99.9501
東京都	9.49E-06	99.9991	0.00E+00	100.0000	1.27E-05	99.9987	0.00E+00	100.0000	5.54E-06	99.9994
東京都	2.85E-05	99.9972	0.00E+00	100.0000	1.28E-03	99.8725	6.25E-04	99.9375	4.82E-04	99.9518
平均値	1.28E-04	99.9872	1.05E-06	99.9999	2.56E-04	99.9744	1.05E-03	99.8947	3.59E-04	99.9641
東京都	1.58E-05	99.9984	0.00E+00	100.0000	3.16E-05	99.9968	0.00E+00	100.0000	1.19E-05	99.9988

(4) 1点除外法

1点除外法を用いて平均識別精度を求めた結果を表4.4示す。図4.8に文字数ごとに得られる識別精度の平均を示す。全標本法，交差検証法，4重交差検証法と同様に，識別に4文字以上使用することで99.9%以上の識別精度が得られることが分かる。

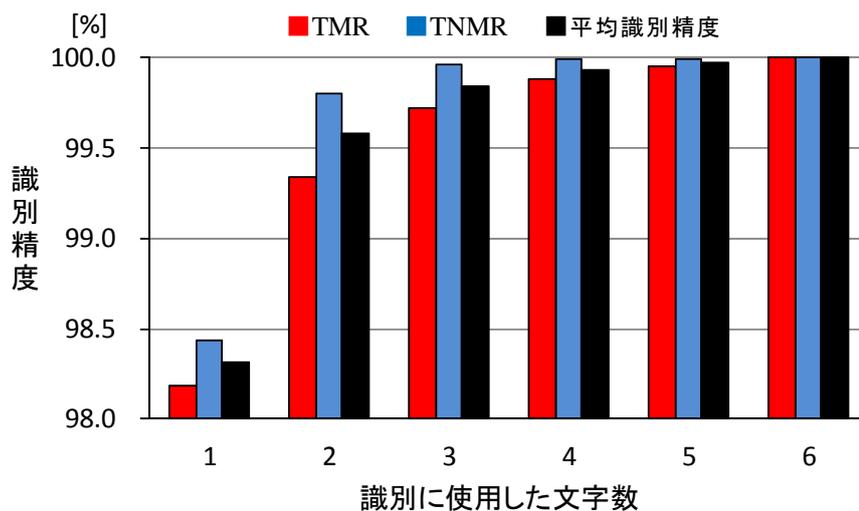


図4.8 1点除外法による平均識別精度

表4.4 1点除外法による識別精度

	FNMR	TMR	FMR	TNMR	平均識別誤差	平均識別精度
東	2.52E-02	97.4844	1.75E-02	98.2491	2.13E-02	97.8667
京	1.67E-02	98.3281	9.83E-03	99.0166	1.33E-02	98.6724
都	9.69E-03	99.0313	5.09E-03	99.4906	7.39E-03	99.2609
洪	2.98E-02	97.0156	2.65E-02	97.3464	2.82E-02	97.1810
谷	8.28E-03	99.1719	7.59E-03	99.2413	7.93E-03	99.2066
区	1.94E-02	98.0625	2.70E-02	97.2955	2.32E-02	97.6790
平均値	1.82E-02	98.1823	1.56E-02	98.4399	1.69E-02	98.3111
東京	1.03E-02	98.9687	2.38E-03	99.7617	6.35E-03	99.3652
東都	7.03E-03	99.2969	3.79E-03	99.6214	4.13E-03	99.5869
東洪	1.17E-02	98.8281	3.77E-03	99.6234	7.74E-03	99.2258
東谷	7.03E-03	99.2969	1.20E-03	99.8796	4.12E-03	99.5882
東区	1.05E-02	98.9531	3.13E-03	99.6873	6.80E-03	99.3202
京都	2.50E-03	99.7500	8.45E-04	99.9155	1.67E-03	99.8328
京洪	7.03E-03	99.2969	2.38E-03	99.7623	4.70E-03	99.5296
京谷	2.66E-03	99.7344	6.28E-04	99.9372	1.64E-03	99.8358
京区	5.16E-03	99.4844	1.85E-03	99.8152	3.50E-03	99.6498
都洪	5.78E-03	99.4219	1.85E-03	99.8145	3.82E-03	99.6182
都谷	1.72E-03	99.8281	5.64E-04	99.9436	1.14E-03	99.8859
都区	6.25E-03	99.3750	1.38E-03	99.8622	3.81E-03	99.6186
洪谷	4.69E-03	99.5313	1.59E-03	99.8414	3.14E-03	99.6863
洪区	8.75E-03	99.1250	3.51E-03	99.6492	6.13E-03	99.3871
谷区	7.66E-03	99.2344	1.45E-03	99.8550	4.55E-03	99.5447
平均値	6.58E-03	99.3417	2.02E-03	99.7980	4.22E-03	99.5783
東京都	2.81E-03	99.7188	3.81E-04	99.9619	1.60E-03	99.8403
東京洪	4.53E-03	99.5469	9.97E-04	99.9003	2.76E-03	99.7236
東京谷	2.19E-03	99.7813	2.67E-04	99.9733	1.23E-03	99.8773
東京区	3.59E-03	99.6406	5.51E-04	99.9449	2.07E-03	99.7928
東都洪	2.66E-03	99.7344	6.65E-04	99.9335	1.66E-03	99.8339
東都谷	2.97E-03	99.7031	2.21E-04	99.9779	1.60E-03	99.8405
東都区	5.00E-03	99.5000	3.29E-04	99.9671	2.66E-03	99.7335
東洪谷	3.13E-03	99.6875	4.82E-04	99.9518	1.80E-03	99.8197
東洪区	4.53E-03	99.5469	6.90E-04	99.9310	2.61E-03	99.7389
東谷区	5.16E-03	99.4844	2.96E-04	99.9704	2.73E-03	99.7274
京都洪	1.72E-03	99.8281	4.71E-04	99.9529	1.09E-03	99.8905
京都谷	1.56E-03	99.8438	1.38E-04	99.9862	8.50E-04	99.9150
京都区	1.88E-03	99.8125	2.25E-04	99.9775	1.05E-03	99.8950
京洪谷	9.38E-04	99.9063	3.01E-04	99.9699	6.19E-04	99.9381
京洪区	2.66E-03	99.7344	4.89E-04	99.9511	1.57E-03	99.8427
京谷区	1.41E-03	99.8594	1.55E-04	99.9845	7.81E-04	99.9219
都洪谷	1.56E-03	99.8438	2.82E-04	99.9718	9.22E-04	99.9078
都洪区	2.50E-03	99.7500	4.13E-04	99.9587	1.46E-03	99.8544
都谷区	1.72E-03	99.8281	1.84E-04	99.9816	9.51E-04	99.9049
洪谷区	2.81E-03	99.7188	3.38E-04	99.9662	1.58E-03	99.8425
平均値	2.77E-03	99.7234	3.94E-04	99.9606	1.58E-03	99.8420
東京都洪	1.41E-03	99.8594	2.73E-04	99.9727	8.40E-04	99.9160
東京都谷	1.88E-03	99.8125	7.92E-05	99.9921	9.77E-04	99.9023
東京都区	1.56E-03	99.8438	1.01E-04	99.9899	8.32E-04	99.9168
東京洪谷	9.38E-04	99.9063	1.72E-04	99.9828	5.55E-04	99.9445
東京洪区	1.09E-03	99.8906	2.06E-04	99.9794	6.50E-04	99.9350
東京谷区	1.41E-03	99.8594	6.90E-05	99.9931	7.38E-04	99.9262
東都洪谷	7.81E-04	99.9219	1.38E-04	99.9862	4.59E-04	99.9541
東都洪区	1.88E-03	99.8125	1.45E-04	99.9855	1.01E-03	99.8990
東都谷区	2.19E-03	99.7813	7.68E-05	99.9923	1.13E-03	99.8868
東洪谷区	1.56E-03	99.8438	9.99E-05	99.9900	8.31E-04	99.9169
京都洪谷	6.25E-04	99.9375	8.23E-05	99.9918	3.54E-04	99.9646
京都洪区	6.25E-04	99.9375	1.09E-04	99.9891	3.67E-04	99.9633
京都谷区	6.25E-04	99.9375	4.94E-05	99.9951	3.37E-04	99.9663
京洪谷区	9.38E-04	99.9063	7.60E-05	99.9924	5.07E-04	99.9493
都洪谷区	6.25E-04	99.9375	6.94E-05	99.9931	3.47E-04	99.9653
平均値	1.21E-03	99.8792	1.16E-04	99.9884	6.62E-04	99.9338
東京都洪谷	6.25E-04	99.9375	6.00E-05	99.9940	3.42E-04	99.9658
東京都洪区	3.13E-04	99.9688	5.80E-05	99.9942	1.85E-04	99.9815
東京都谷区	6.25E-04	99.9375	3.10E-05	99.9969	3.28E-04	99.9672
東京洪谷区	6.25E-04	99.9375	4.27E-05	99.9957	3.34E-04	99.9666
東都洪谷区	7.81E-04	99.9219	3.84E-05	99.9962	4.10E-04	99.9590
京都洪谷区	0.00E+00	100.0000	2.27E-05	99.9977	1.14E-05	99.9989
平均値	4.95E-04	99.9505	4.21E-05	99.9958	2.68E-04	99.9732
東京都洪谷区	0.00E+00	100.0000	1.65E-05	99.9984	8.23E-06	99.9992

4.3.3 各精度検証法の精度比較

精度検証法ごとに得られた平均識別精度を比較した結果を図 4.9 に示す。識別に使用する文字数が 1 文字の場合 98% 以上，4 文字以上で 99.9% 以上の識別精度が得られた。また，1 文字のとき $98.2 \pm 0.1\%$ ，4 文字のとき $99.93 \pm 0.01\%$ と変動幅が収束していくことから，今回試した全ての精度検証法において，4 文字以上で 99.9% 以上の平均識別精度が得られることを確認することができた。

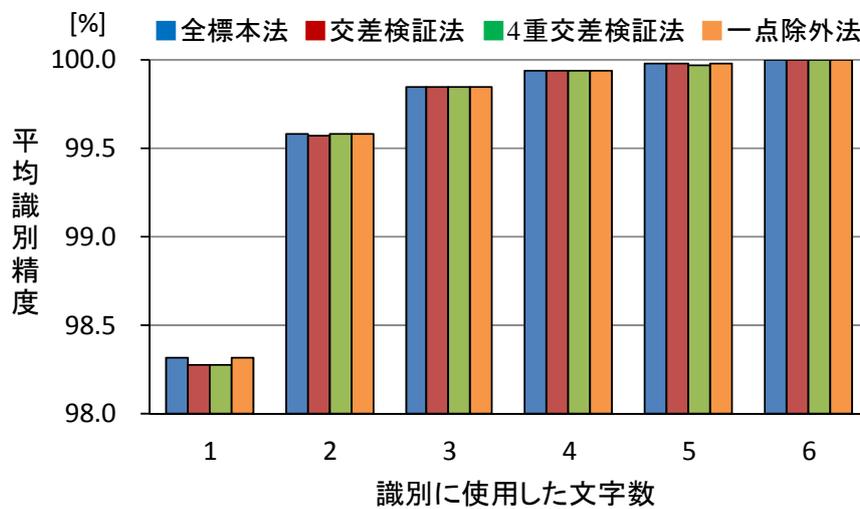


図 4.9 各精度検証による比較

(いずれの精度検証法において，4 文字以上で 99.9% 以上の平均識別精度が得られる)

4.4 検証結果

日本規格協会情報技術標準化研究センター (INSTAC) バイオメトリクス標準化研究委員会による署名に関する標準情報 (署名 TR : technical report) の検証結果は，照合精度特性および精度評価レポートの 2 つで表される。照合精度特性には横軸に FMR (false match rate, 他人受け入れ率) を縦軸に FNMR (false non-match rate, 本人拒否率) をとり，しきい値を変化させたときの結果をプロットした照合性能を表すグラフである ROC (Receiver Operating Characteristic) カーブが用いられる。また，精度評価レポートは収

集サンプルの男女構成，職業構成などをできる限り詳細に記載することとなっている²¹⁾。以下，照合精度特性および精度評価レポートについて示す。

4.4.1 照合精度特性

図 4.10 に横軸に FMR，縦軸に FNMR をとり，識別境界の変化とともに遷移するそれら 2 つの識別誤差の軌跡を示した ROC(Receiver Operating Characteristic)カーブを示した。赤色が 1 文字を識別に使用した場合，黄色，黄緑，緑，青，紫がそれぞれ 2 文字，3 文字，4 文字，5 文字，6 文字を使用した場合のカーブで。グラフ中の黒い点は最大尤度法で得られた平均識別精度に対応している。灰色で示した対角線上の点は，平均識別誤差が最小になる点であり，これは最大事後確率法で識別を行っている。これからわかるように，最大尤度法による識別精度は，高い識別精度となる特異的な点が選ばれているわけではないことがわかる。

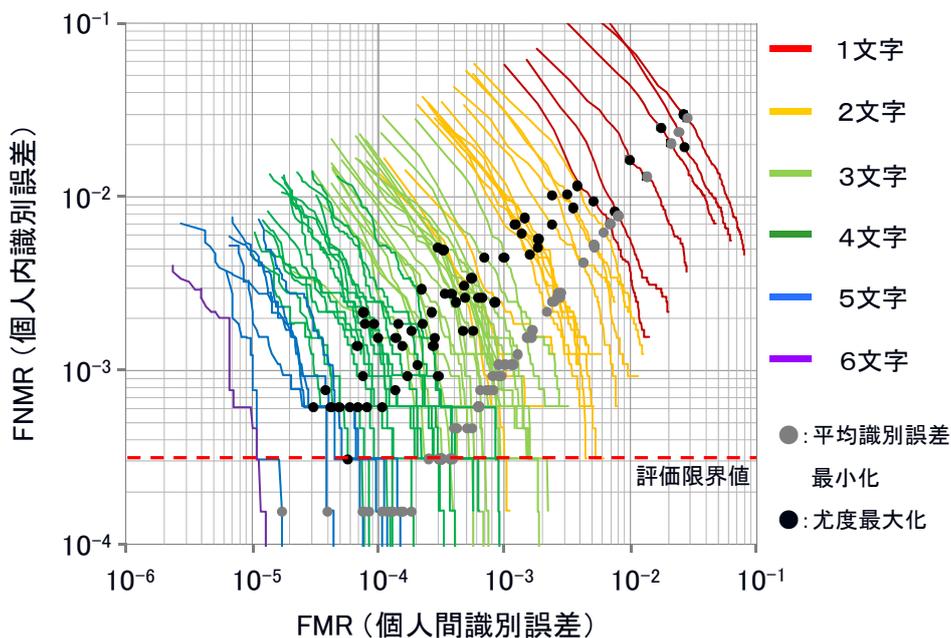


図 4.10 照合精度特性 (ROC カーブ)

(使用する文字数ごとの最大尤度法による識別精度 (●) は，最大事後確率法 (●) による識別精度との比較から，高い識別精度となる特異的な点が選ばれてはいないことがわかる)

縦軸にある赤色点線は評価限界値²¹⁾である。この評価限界値とは信頼度 95%で評価可能な FNMR に関する最低識別誤差を示している。また、横軸の FMR の評価限界値については、このグラフの横軸原点よりさらに左側である。FMR と FNMR についての評価限界値は以下の式で算出した。

$$pFNMR = \frac{3}{N} \quad (4.4)$$

$$pFMR = \frac{6}{N(N-1)} \quad (4.5)$$

ただし、 $pFNMR$ は FNMR の評価限界値、 $pFMR$ は FMR の評価限界値、 N はサンプル数。

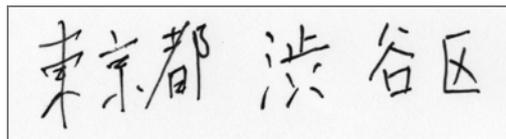
それぞれ精度換算で、約 99.97%と 99.999%となった。

本実験では識別に使用する文字数が 5 文字以上は評価限界値以下になる場合があり、逆に使用する文字数が 1~4 文字の場合は信頼度 95%以上で推定できていることがわかる。

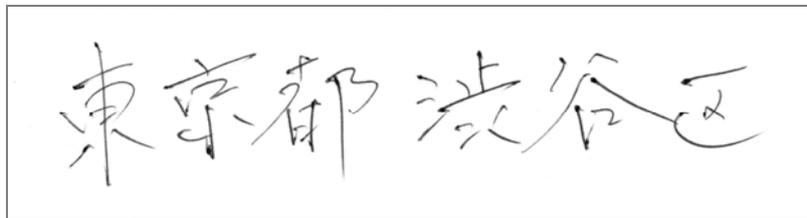
4.4.2 精度評価レポート

実験対象の筆跡標本の特徴について示す。サンプルの採取については、被験者 320 人に、線や枠など何も書かれていない白紙の A4 コピー用紙 1 枚当たり文字列「東京都渋谷区」を横 1 行で筆記してもらい、これを 5 回反復して被験者 1 人当たり 5 枚の筆記済み A4 コピー用紙を収集した。筆記に際しては、できるだけ自然に筆記された筆跡を収集することを念頭に、横書きすること以外の楷書体といった字体などの筆記の仕方について特に制約をせず、「使いなれている筆記具で、また書き慣れている字体、大きさ、スピードで A4 コピー用紙の中央付近に、特に緊張せずいつものように筆記してください。」という指示を被験者に伝えた。

次に、収集した筆記済み A4 コピー用紙の筆記されている領域を解像度 600 dpi、量子化レベル数 256 階調でフラットベッドスキャナを使用してデジタル化した（図 4.11 参照）。



(a) 比較的小さな文字で筆記された例



(b) 比較的大きな文字で筆記された例

図4.11 筆跡標本例

したがって、筆跡標本は漢字「東京都渋谷区」の6文字であり、文字当たり1,600標本である。このとき生成可能な個人内標本対の数は3,200対、個人間標本対の数は1,276,000対となる。なお、個人内標本対の数を N_1 、個人間標本対の数を N_2 とすると、これらは次式で与えられる。ただし、 N_h は筆者数(=320)、 N_s は筆者あたりの筆跡数(=5)である。

$$N_1 = N_h \frac{N_s(N_s - 1)}{2} \quad (4.6)$$

$$N_2 = N_s^2 \frac{N_h(N_h - 1)}{2} \quad (4.7)$$

実験対象サンプルとしては、ノイズや濃淡むらがほとんどなく、紙のしわや凹凸など平面性も良好で、画質の高いサンプルである。ただし、提案法では人手で安定的に採取可能な特徴点の座標を識別に使用するため、この実験に使用したサンプルの画質の良さが過度に識別性能を向上させる恐れは大きくないのではないかと考えられる。被験者の性別構成および年齢構成を図4.12に示す。性別構成についてはあまり大きな偏りはないが、年齢構成については20代の被験者が43%と多くを占めている。

なお、被験者320人は、日本全国から修学や研修のために都内とその近県に集まった学生や社会人を対象としており、様々な地域の出身者について収集したものであり、地域性による偏りは少ないものと考えられる。

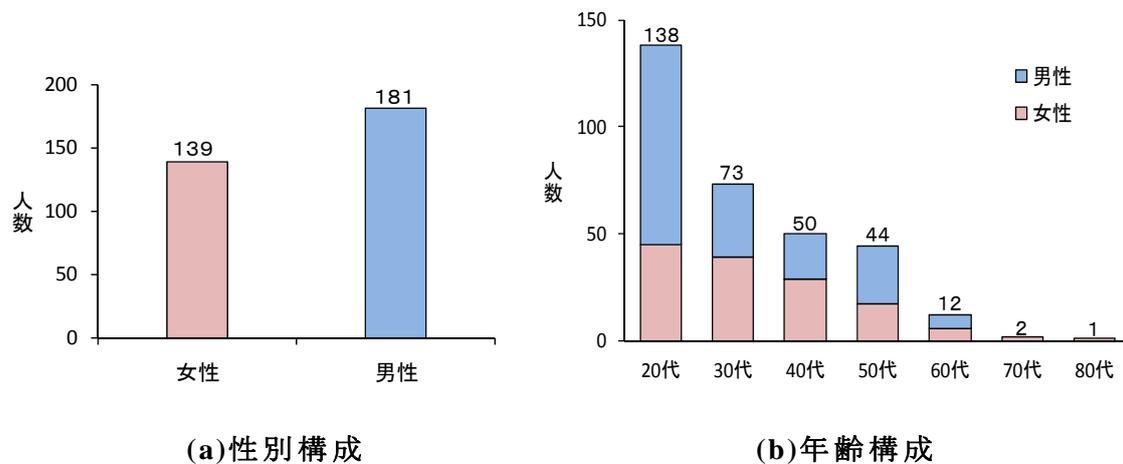


図4.12 被験者の構成

(性別構成についてはあまり大きな偏りはないが,年齢構成については20代の被験者が43%と多くを占めている.)

4.5 本章のまとめ

提案手法は,オフライン型であり字形のみの特徴と,一般的によく知られている統計的判定法を使用したごくシンプルな手法である.これは,運用性や頑健性,また判定理由の説明のし易さなど,実利用の観点から好ましい特性を持っていると考えている.

本研究で使用したサンプルは,公開されたデータベースに基づくものではないものの,日本全国から修学や研修のため都内とその近県に集まった学生や社会人を対象に320人から収集したものであり,その収集に際しては,文字の相違度(類似度)が著しいなどといった恣意的な要素は低いサンプルと考えている.また,サンプル採取時の方法においても従来の研究と使用した筆記具の種類や用紙の種類および採取時の指示の提示方法などにおいても大きな差異はないと考えている.しかし,従来の研究では文字の収集は決められた筆記具で,決められた枠内に記載させ実験対象のサンプルとして採取している研究が多い中で,本研究では,筆記具を選ばず,白紙に自由な大きさと自由な位置に記載させていることは他の研究とは異なる点であるが,むしろこの方法は統一性のない不安定な条件下での実

験と考えられ、良い条件を恣意的に揃えていないものと考えられる。

こうして収集したサンプルに対し、第2章において、提案手法は全標本とよばれる母集団推定と識別に同じサンプルを用いる方法で精度推定を行っており、識別精度が高めに推定されている可能性があった。そこで、識別精度の検証を行うため、第2章で識別に使用した全標本法の他に3種類の精度検証法を用いて、得られる識別精度について検討した。それぞれの精度検証法における使用する文字数ごとの識別精度を比較したところ、相互に大きな差異は認められず、いずれの精度検証法においても4文字を使用したときに99.9%という実用レベルの識別精度が得られることを確認した。また、99.9%という識別精度は統計的信頼度95%で充分有意であることを確認した。さらに、ROCカーブとよばれる照合精度特性を求め、その解析から最大尤度法が決定する識別境界は、統計的に平均識別誤差が最小となる境界となるはずであるが、実際にはそうになっていない、言い換えると、平均識別精度の向上の余地があることがわかった。すなわち、提案手法は、識別精度が高めに推定されている可能性が考えられたがその恐れはなく、同時に収集サンプルの質としても単に条件の良いものを集めたものではないことが示された。

また、一般に筆者認識システムにはいくつもの任意に操作できる部分が存在する。これらを恣意的に調整することにより性能をよく見せることが可能になるといわれている²⁰⁾。提案手法における調整可能な任意部としては、唯一、特徴点の位置を決定する際に人手で行うという点である。この点については、始筆部、転折部、終筆部の決定に際し、不明確な字画や判断できない転折部の位置などについては特徴点を強引に採取しておらず、また、特徴点を採取する人によって、採取する／しないの判断のブレが大きくなるようにガイドラインを用意し、それに基づくことで特徴点採取の統一性を保っている。

以上、本研究において用いたサンプルの妥当性が明らかとなり、提案する筆者識別法の有効性が示された。

【参考文献】

- 1) 菊池真美, 赤松紀男: “高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 2) 宮川 透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳: “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 3) 小宮義光, 松本 隆: “ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”, 電子情報通信学会総合大会論文集, p. 217 (1999).
- 4) 栗津優作, 上田勝彦: “筆跡鑑定支援システムの開発”, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-11-75, p. 75 (2006).
- 5) 大川 学, 丸山 稔: “正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”, 第6回情報科学技術フォーラム(FIT2007)論文集, pp. 105-106 (2007).
- 6) 鈴木道孝, 渡辺秀人, 伊藤章義: “一般的な四角形枠による2次元形状正規化”, 信学技報, PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 7) 鈴木圭介, 塩山忠義: “パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”, 信学技報, PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 8) 清田公保, 櫻井敏彦, 山本眞司: “ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 9) 小高和己, 荒川弘熊, 増田 功: “ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 10) 田中敬子, 安藤慎吾, 中島真人: “局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”, 信学技報, PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 11) 梅田三千雄, 三好建生, 三崎揮市: “自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”, 電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).
- 12) 福井隆文, 梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 信学技報, PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).

- 13) 澤田武志, 大橋剛介, 下平美文: “視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).
- 14) 安藤慎吾, 中島真人: “オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法”, 電子情報通信学会論文誌, No. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
- 15) 尾崎正弘, 足達義則, 石井直宏: “ファジィ理論を用いた筆者識別”, 電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
- 16) 吉村ミツ, 吉村 功: “DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
- 17) 吉田 恵, 相澤優秀, 鮎川哲也, 小林裕幸: “固有空間法の筆者識別への適用”, 日本鑑識科学技術学会誌, Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
- 18) 高澤則美: “筆跡鑑定”, 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1-11 (1998).
- 19) 山崎 恭, 近藤維資, 小松尚久: “筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式”, 画像電子学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 438-444 (1994).
- 20) 吉村ミツ, 吉村功: “筆者認識研究の現段階と今後の動向”, 信学技報, PRUM96-48, pp.81-90 (1996).
- 21) 小松尚久, 内田薫, 坂野鋭, 和田誓一, 池野修一: “バイオメトリクスの精度評価”, 計測と制御, Vol. 43, No. 7, pp. 539-543 (2004).
- 22) 菅知之, : “本人認証の全体像とバイオメトリクスの位置付け”, IPSJ Magazine, Vol.40, No. 11, pp. 1073-1077 (1999).
- 23) 瀬戸洋一, 三村昌弘: “バイオメトリクス認証技術における精度評価の動向”, IPSJ Magazine, Vol.40, No. 11, pp. 1099-1103 (1999).
- 24) 瀬戸洋一, 磯部義明, 三村昌弘: “バイオメトリクス認証技術の精度評価の標準化動向”, 電子情報通信学会誌, Vol.83, No.8, pp. 624-629 (2000).
- 25) 常盤公德, 福江潔也, 松前義昭: “個人内変動を抑制した字面の配置パターンのみに基づく筆者異同識別”, 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.660-670 (2011).
- 26) 高木幹雄, 下田陽久 (監), 「新編 画像解析ハンドブック」, 東

京大学出版, 2004, pp.1643-1646 .

27) <http://musashi.sourceforge.jp/tutorial/mining/xtclassify/accuracy.html> より引用.

第5章 ノンパラメトリック識別法による筆者異同識別精度の改善

5.1 はじめに

筆者異同識別に使用されるカテゴリーの決定方法すなわち識別法としては様々なものが考えられ使用されている^{1)~19)}。本研究では多くの分野で使用実績が豊富で、その挙動も明確かつパラメータも少ないという意味で適用も容易な統計的識別法の一つである最大尤度法（最尤法ともよばれる）を採用している。前章までにこの提案する筆者異同識別法により、漢字4文字を使用したとき99.9%という実用レベルの識別精度が得られることを示した²⁰⁾。しかし、前章の異同識別精度の信頼性を吟味する過程において、最大尤度法における平均識別誤差が最小となる識別境界が実際には選定されていないことがわかった。最大尤度法はパラメトリックな統計的分類法であるために、識別対象の母集団が正規分布をしているという前提条件が満たされていない場合、識別精度が低下するという問題がある。そこで本章では、ノンパラメトリック分類法の代表例であるk近傍法により、さらなる異同識別精度向上の可能性を探った。本章では、まず使用する筆者識別法の概要を5.2で述べた後、5.3において最大尤度法の問題点を示したうえで、その問題点に対する改善策としてk近傍法の適用を提案する。5.4において、その効果を筆者異同識別実験をとおして検証する。最後に5.5において、検証結果の評価を行うとともに、今後の課題を整理する。なお、本章で使用する図表の一部は、参考文献21)に掲載されているものを転載している。

5.2 使用する筆者異同識別法

提案する筆者異同識別法は、第2章で述べたとおり、抽出が容易な字画パターンに注目し、その幾何学的なマッチングの度合いを検査対象の筆跡対に関する類似度として使用する。すなわち、ある2つの筆跡が同一人物によって筆記されたものであれば同じような字画パターンになるであろうし、別人によって筆記されたものであれば字画パターンは違ってくるであろうと考え、検査対象の筆跡対に関する幾何学的類似度に基づき筆者異

同識別を行う。その処理の流れは、第2章図2.6に示したとおり、①デジタル化、②特徴点抽出、③正規化、④個人内変動抑制処理、⑤幾何学的類似度の算出、⑥異同識別となる。

5.3 最大尤度法の問題点とその改善策

最大尤度法では、母集団の確率密度が正規分布で表されると仮定し、カテゴリ c に対する特徴量 x の尤度 $p(x|c)$ が最大となる c に x を所属すると決定する。識別対象の筆跡対に関するマッチング残差を特徴量 x としたとき、 x はその一文字（たとえば「東」という字種）についての特徴量であるので、 x はスカラーで表される。ところが筆跡鑑定において一般に一文字の筆跡対のみで鑑定がなされることは希で、複数文字（たとえば「東」、「京」、「都」という3字種）の筆跡対が使用される。その場合、各筆跡対に関するマッチング残差 x_1, x_2, x_3, \dots が得られるので、 \mathbf{x} は特徴ベクトルとして表される。

したがって、識別を行う特徴空間は、一般的には多次元となり、母集団の平均ベクトルと分散・共分散行列をそれぞれ m_c, v_c とすると $p(x|c)$ は次式で表される。

$$p(x|c) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2} |v_c|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - m_c) v_c^{-1} (x - m_c)^t \right\} \quad (5.1)$$

ただし、 $|*|$, $^{-1}$, t はそれぞれ行列式、逆行列、転置を表し、 K は特徴ベクトルの次元数すなわち識別に使用する文字数である。 m_c, v_c はサンプルから得られる標本平均ベクトルと標本分散・共分散行列として推定する。

ここで問題となるのは、母集団分布が正規分布で表されるという仮定である。個人内および個人間変動分布が正規分布をしているという保障はなく、図5.1に示した例でも、特に個人内変動分布の分布形状は正規分布とは異なっているように見受けられる。その場合、当然の帰結として異同識別精度が低下してしまうことが予想される。

この問題は、母集団分布として特定の分布を仮定していること、すなわち最大尤度法がパラメトリック分類法であることに起因していることか

ら，ノンパラメトリック分類法によりその問題を低減できる可能性がある．そこで，本章ではノンパラメトリック分類法の代表例である k 近傍法の適用を試みた． k 近傍法は，識別を行う特徴空間において，未知サンプルの近傍に存在する訓練・学習サンプルを未知サンプルとの距離が小さい順に k 個探索し，その訓練・学習サンプルの最大多数が所属するカテゴリーに未知サンプルが所属すると決定する． k が 1 の場合は，その訓練・学習サンプルが所属するカテゴリーに未知サンプルが所属すると決定し，特に最近傍法とよばれる²²⁾．

5.4 筆者異同識別実験

前節で述べた k 近傍法によりどの程度の異同識別精度の向上が実際に図れるのかを調べるために，5.2 で述べた既提案法で採用している最大尤度法を k 近傍法に置き換えて，筆者異同識別実験を行った．

5.4.1 筆跡標本

筆跡標本は第 2 章で使用した被験者 320 人によるものである．すなわち，漢字「東京都渋谷区」の 6 文字であり，文字あたり 1,600 標本である．このとき生成可能な個人内標本対の数は 3,200 対，個人間標本対の数は 1,276,000 対となる．

5.4.2 個人内・個人間変動分布

1 文字を識別に使用する場合，特徴空間は 1 次元であり，その個人内・個人間変動分布は 1 次元ヒストグラムとして表される．1 文字としては 6 種類あるが，例として「東」と「渋」に関して得られた個人内・個人間変動分布を図 5.1 に実線で示す．点線は，標本より推定された母集団の分布（正規分布）を重ね書きしたものである．実線と点線が同じで重なっていれば理想的であるが，個人内・個人間の両変動分布とも正規分布と比べてピークが左寄りに，裾が右側に伸びているのがわかる．

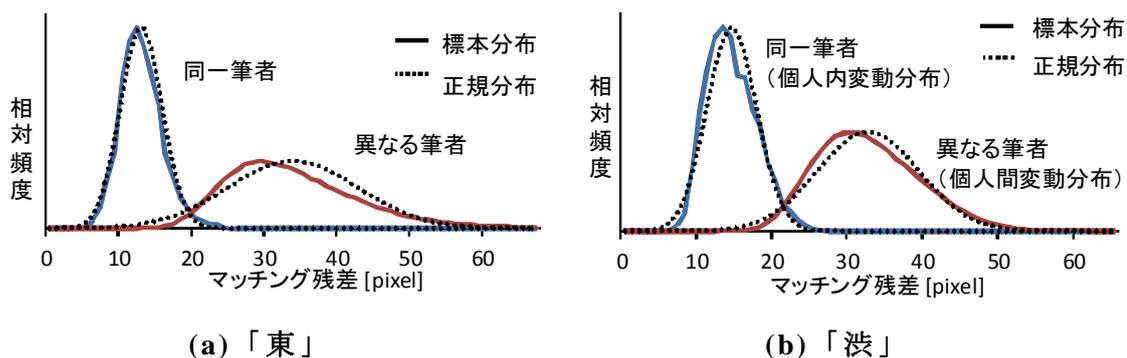


図5.1 一文字の個人内・個人間変動分例

(個人内・個人間の標本分布はともに、正規分布と比べてピークが左寄りに、裾が右側に伸びている)

「東京都渋谷区」のそれぞれ1文字に関する個人内・個人間変動分布の歪度(skewness)と尖度(kurtosis)を表5.1に示す。

表5.1 一文字に関する個人内・個人間変動分布の歪度と尖度

文字	個人内変動分布		個人間変動分布	
	歪度	尖度	歪度	尖度
東	0.471	0.459	0.764	0.598
京	0.383	0.235	0.558	0.543
都	0.336	-0.112	0.619	0.751
渋	0.41	-0.146	0.418	-0.098
谷	0.244	-0.048	0.602	0.443
区	0.364	0.113	0.784	1.278

歪度は平均値まわりの分布の左右対称性を示す指標であり、対称のとき0、ピークが左寄りのとき正、ピークが右寄りのとき負の値となる。尖度は平均値まわりに集中している度合い(分布の尖り具合)を示す指標であり、正規分布のとき0、正規分布より尖っていれば正、正規分布より丸みが強ければ負の値となる。この表からも図5.1(a), (b)に示した個人内・個人間変動分布の正規分布からのズレ具合を確認できる。なお、歪度と尖度は次式で定義される。

$$\text{歪度} = \mu_3 / \sigma^3 \quad (5.2)$$

$$\text{尖度} = \mu_4 / \sigma^4 \quad (5.3)$$

ただし、 σ は標準偏差、 μ_n は N 個のデータに対する平均値 μ まわりの n 次モーメント。

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^n \quad (5.4)$$

2 文字を識別に使用する場合、特徴空間は 2 次元であり、その個人内・個人間変動分布は 2 次元ヒストグラムとして表される。6 文字から 2 文字を取り出す組合せは、15 種類あるが、「東京」と「渋谷」の 2 種類の組合せに関して得られた個人内・個人間変動分布を例として図 5.2 に示す。図中の画像（2 次元ヒストグラム）の明るさが頻度に対応しているが、1 次元の場合と同様に明らかにピークの位置が偏心しているのがわかる。

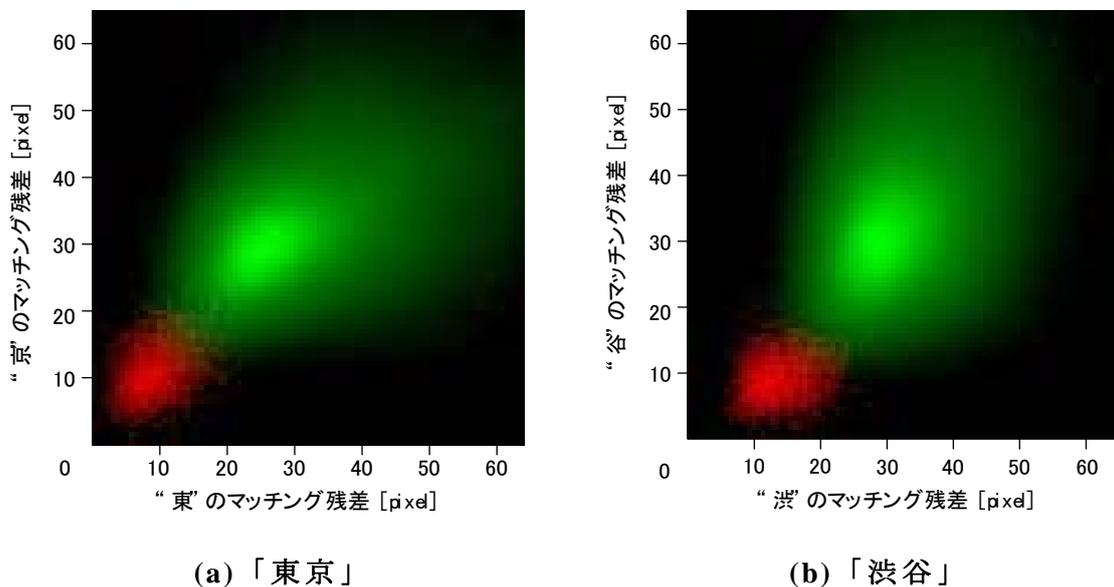


図5.2 2文字に関する個人内・個人間変動分布例

(画像の明るさが頻度に対応しているが、赤色の個人内変動分布と緑色の個人間変動分布は明るさのピークが偏心している)

5.4.3 識別結果

この識別実験では，最大尤度法の適用時に必要となる母集団パラメータの推定は，全標本（1 字種あたり，個人内変動分布については 3,200 対，個人間変動分布については 1,276,000 対存在する）を用いて行った．また，同じ標本対を識別対象とした．k 近傍法の場合は，1 点除外法(leave-one-out method)²²⁾を用いて識別誤差を求めた．すなわち，識別対象とするある 1 つの標本（筆跡対）を全標本から取り除いて識別を行い，これを全ての標本について反復して識別誤差を求めた．1 文字～6 文字それぞれを識別に使用したとき，得られた識別精度の平均値を表 5.2 に，また k 近傍法の効果が変わりやすいように平均識別精度の平均値のみを図 5.3 に示す．

表 5.2 識別精度

(a)最大尤度法適用時

文字数	最大尤度法		
	TMR	TNMR	平均
1	98.19	98.44	98.32
2	99.30	99.76	99.54
3	99.76	99.94	99.85
4	99.91	99.98	99.94
5	99.96	99.99	99.98
6	100.00	99.99	100.00

(b)k 近傍法適用時

文字数	k 近傍法			
	TMR	TNMR	平均	k (平均)
1	98.54	98.23	98.39	1599.0
2	100.00	99.79	99.86	74.3
3	100.00	99.99	99.99	3.1
4	100.00	100.00	100.00	1.1
5	100.00	100.00	100.00	1.0
6	100.00	100.00	100.00	1.0

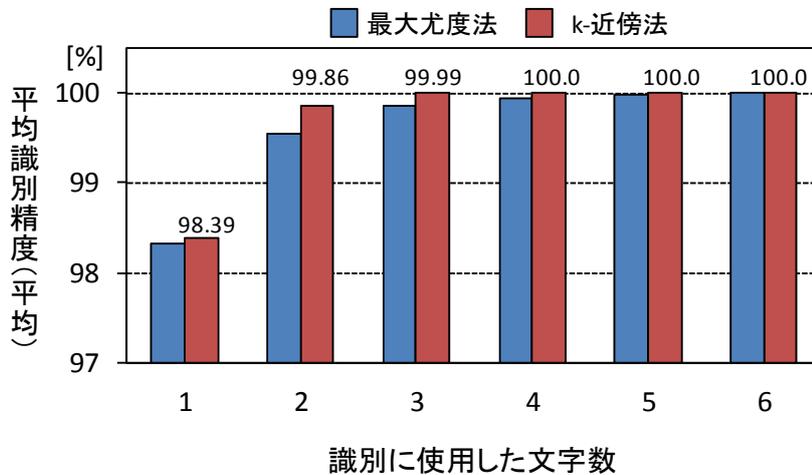


図5.3 平均識別精度の比較

(識別に2文字以上、特に2, 3文字を使用した場合、k近傍法は最大尤度法に比べ高い識別精度を示し、3文字で99.9%に達する)

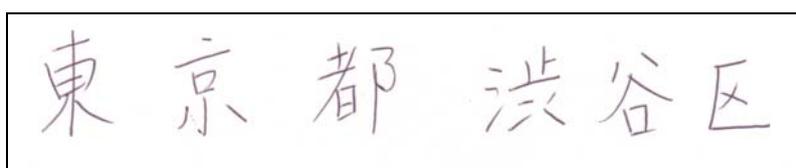
k近傍法を適用する際はkの値を定める必要があるが、本実験では平均識別精度が最大になるkの値をkを1~2,000まで変化させて求めた。表5.2にはそのkの値の平均値についても示してある。

識別に使用する文字数が少ない、言い換えると特徴空間の次元数が少ないと標本は特徴空間においてより密集することになり、筆跡標本をフラットベッド型スキャナでデジタル化する際の標本化間隔や特徴点座標の計測誤差以下に近接する標本間の距離は物理的に意味をなさなくなる。kを多くすると、それに伴い探索空間が広がっていくが、それが物理的に意味を有する程度までkを多くする必要が生じる。識別に使用する文字数が4文字以上の場合、kの最適値は1ですんでいるが、3文字以下においてkの値が1より大きくなり、1文字の場合はkの平均値が1,599と大きくなっているのは、この理由による。

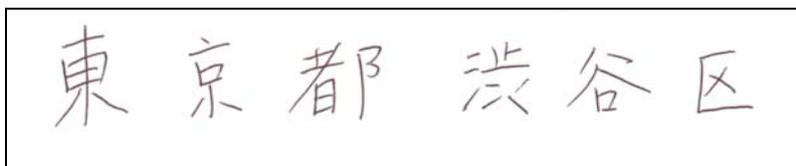
平均識別精度に注目すると、1文字~5文字を識別に使用した場合、k近傍法は最大尤度法よりそれぞれ0.07%、0.32%、0.14%、0.06%、0.02%高い精度を示しており、期待した効果が表れていることがわかる。1文字のとき0.07%の向上にとどまっているのは、1文字の字形の違いに関する特徴量のみでは、筆者の異同を識別することが本来不安定であるためと考えられ

る。また、2文字以上の場合、精度向上の幅が小さくなっているように見えるが、これは識別精度が元々高いためであり、平均識別誤差でみると、2文字～5文字それぞれの場合における識別誤差低減比は、約 1/3, 1/25, 1/239, 1/1,022 と大幅に低下している。

6文字を識別に使用したとき、最大尤度法および k 近傍法とも同一人の筆跡対を異なる筆者によるものと誤識別した標本対は無く TMR はともに 100%であった。しかし、最大尤度法では異なる筆者の標本対 1,276,000 対の中で 69 対を同一人が筆記した筆跡であると誤識別した。これに対して、k 近傍法の場合、誤識別した標本対は 0 であった。図 5.4 は、6文字を識別に使用したとき、最大尤度法において異なる筆者の標本対を同一人が筆記したものと誤識別した標本対の例である。字形がこの程度に類似していても、k 近傍法では正しく異なる筆者による標本対であると判定された。



(a) 筆者 A (関東地方在住) の筆跡標本



(b) 筆者 B (九州地方在住) の筆跡標本

図 5.4 最大尤度法ではご識別されたが、k 近傍法では正しく識別された筆跡対の例

なお、現在、鑑定人によってなされている従来の筆跡鑑定における要求精度の目安の一つは、最高レベルで 99.9%以上とされている。本実験において平均識別精度 99.9%を越えるのは最大尤度法の場合 4文字であるが、k 近傍法の場合 3文字で 99.9%を越えて 99.99%に達している。

5.5 本章のまとめ

提案する筆者異同識別法において、識別法（識別器）に採用している最大尤度法の欠点に対して、 k 近傍法を適用して識別精度の改善を試みた。被験者 320 人の筆者異同識別実験の結果、期待されたとおり識別精度の改善を図ることができ、最大尤度法適用時に平均識別精度 99.9%を越えるのは 4 文字であったが、 k 近傍法を適用すると 3 文字で 99.9%を越えて 99.99%に達することがわかった。

k 近傍法の欠点としては、一般に十分な数の標本がないと精度が低下し、多数の標本に対しては処理負荷が増大すること、さらに k の探索が必要になることなどがあげられる。 k の探索については、PC を使用した本実験でも 1 文字～6 文字のすべての組み合わせ 63 ケースに対して CPU タイムで数週間を要したが、これは筆者異同識別システムを運用する（ある検査対象の筆跡対を対象に筆者異同識別を行う）前に済ませておけるので、実運用上は問題にならない。処理負荷については、記憶と演算に関する負荷に分けられるが、320 人分の筆跡の特徴点座標に必要な記憶容量は 20MB 程度と現在の一般的な PC 環境では問題にならない。また演算負荷については、複数文字を識別に使用したときでも、ある 1 標本（筆跡対）の異同識別処理時間は CPU タイムで数十 msec 程度であり、システムの運用者からみれば瞬時に判定結果を得ることができる。したがって、システム運用の前に十分な数の標本を用意しなければならないという点が問題点として残る。この標本数の問題は、統計的識別法である最大尤度法と比べてより大きな問題となるが、識別精度の向上が図れる点は利点である。実運用システムでは、識別器として最大尤度法と k 近傍法の 2 種類を実装しておき、収集済みの筆跡標本数や識別に使用する文字数（文字数が少なく特徴空間の次元数が少ない場合はさほど大量の標本が無くてもよい）に応じて切り替えて使用するのがよいのではないかと考えられる。

なお、上記の結論は、漢字「東京都渋谷区」という 6 文字についてのみの実験結果から得られたものであり、他の字種については未確認である。また、識別誤差が非常に小さいことから、それに応じて被験者数や被験者あたりの筆跡標本数をより増加した実験も必要であろう。これらは今後の課題としたい。

【参考文献】

- 1) 菊池真美, 赤松紀男: “高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 2) 宮川 透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳: “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 3) 小宮義光, 松本 隆: “ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”, 電子情報通信学会総合大会論文集, p. 217 (1999).
- 4) 栗津優作, 上田勝彦: “筆跡鑑定支援システムの開発”, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-11-75, p. 75 (2006).
- 5) 大川 学, 丸山 稔: “正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”, 第6回情報科学技術フォーラム(FIT2007)論文集, pp. 105-106 (2007).
- 6) 鈴木道孝, 渡辺秀人, 伊藤章義: “一般的な四角形枠による2次元の形状正規化”, 信学技報, PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 7) 鈴木圭介, 塩山忠義: “パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”, 信学技報, PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 8) 清田公保, 櫻井敏彦, 山本眞司: “ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 9) 小高和己, 荒川弘熊, 増田 功: “ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 10) 田中敬子, 安藤慎吾, 中島真人: “局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”, 信学技報, PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 11) 梅田三千雄, 三好建生, 三崎揮市: “自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”, 電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).
- 12) 福井隆文, 梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 信学技報, PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).

- 13) 澤田武志, 大橋剛介, 下平美文: "視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法", 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).
- 14) 安藤慎吾, 中島真人: "オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法", 電子情報通信学会論文誌, No. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
- 15) 尾崎正弘, 足達義則, 石井直宏: "ファジィ理論を用いた筆者識別", 電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
- 16) 吉村ミツ, 吉村 功: "DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
- 17) 吉田 恵, 相澤優秀, 鮎川哲也, 小林裕幸: "固有空間法の筆者識別への適用", 日本鑑識科学技術学会誌, Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
- 18) 高澤則美: "筆跡鑑定", 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1-11 (1998).
- 19) 山崎 恭, 近藤維資, 小松尚久: "筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式", 画像電子学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 438-444 (1994).
- 20) 常盤公德, 福江潔也, 松前義昭: "個人内変動を抑制した字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別", 画像電子学会誌, Vol.40, No.4, pp.660-670 (2011).
- 21) 常盤公德, 福江潔也, 松前義明: "k 近傍法による筆者異同識別精度の改善", 東海大学情報理工学部紀要, Vol.12, No.1, pp.11-18 (2012).
- 22) 高木幹雄, 下田陽久 (監), 「新編 画像解析ハンドブック」, 東京大学出版, 2004, p.1302, p.1603, p.1645.

第6章 日本語全般を対象とする筆者異同識別法の構築とその識別特性

6.1 はじめに

従来、筆者異同識別に関する研究は、文献 1)～19)のように様々な研究が古くから継続されてきている。これらの研究では、漢字を主体とした実験が多く見受けられ、本研究においても前章までに漢字に対する筆者異同識別法を構築した。しかし、科学捜査分野において実利用を考えたとき、対象となる文字は漢字だけではない。本章では、科学捜査分野の筆跡鑑定で扱われているひらがな・カタカナ・数字を含む日本語文字全般に適用できるように提案する筆者異同識別法を拡張する。さらに、ひらがな・カタカナ・数字そして漢字という字種間でどのような識別特性に違いがあるのかを明らかにする。

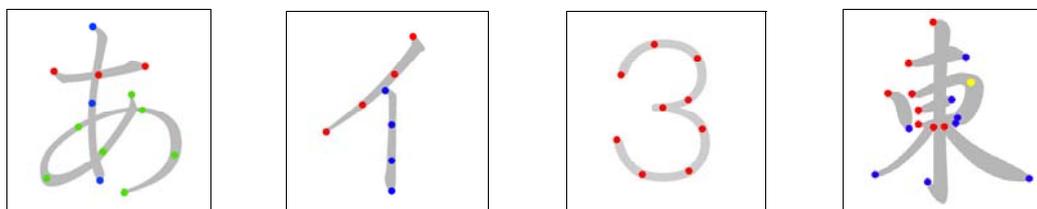
本章では、まず、ひらがな・カタカナ・数字・漢字に対する特徴点の採取法と処理の流れを 6.2 で述べた後、6.3 において、ひらがな・カタカナ・数字・漢字を識別対象として、どの程度の識別精度が得られるのかを筆者異同識別実験をとおして明らかにする。また、6.4 において字種間の識別特性の比較を行う。最後に 6.5 で本章のまとめを行って、今後の課題などを整理する。なお、本章で使用する図表の一部は、参考文献 20)に掲載されているものを転載している。

6.2 特徴点の抽出

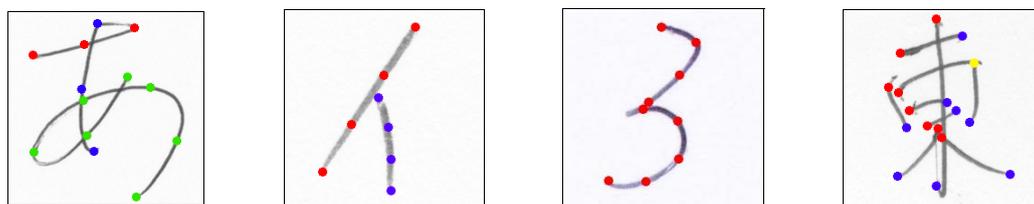
字画パターンを表す特徴点として、ひらがな、カタカナ、数字については始筆部・終筆部およびその字画を N 等分する点を採取する。漢字については、字画の始筆部・終筆部および転折部を採取する。例を図 6.1 に示す。図中ひらがな、かたかな、数字については、第 1・2・3 画の特徴点をそれぞれ赤・青・緑の色で示してある。漢字については、始筆部・終筆部・転折部の特徴点をそれぞれ赤・青・黄の色で示してある。

図 6.1(a), (b)は、それぞれ標準パターンと筆跡標本について採取された特徴点の例である。基本的には、カタカナと漢字については、字画が直線で構成されていることが多く、採取する特徴点の数は少なくとも字画パター

ンを再現できるが、ひらがなと数字については、より多くの特徴点が必要である。したがって、各字画に対する N は、字画パターン of 再現性を考慮して、標準パターン上で人が事前に設定する。



(a)標準パターンについて採取された特徴点



(b)筆跡サンプルについて採取された特徴点

図6.1 特徴点の採取例

(字画パターンを表す特徴点として、ひらがな、カタカナ、数字については始筆部・終筆部およびその字画を N 等分する点を採用する。漢字については、字画の始筆部・終筆部および転折部を採用する)

採取にあたっては、ひらがな、カタカナ、数字については、字画の始筆部と終筆部を人が指定することでコンピュータプログラムによって自動的に字画のトレースがなされ、その長さが計測されるので、特徴点も自動的に採取される。漢字については、字画の長さを計測する必要がないので、字画の始筆部と終筆部以外に、転折部についても、それが存在していれば人が直接、指定する。なお、従来の筆跡のコンピュータ処理では、2値化や細線化といった処理を経由して字画の抽出がなされることが多いが、濃淡画像から直接字画のトレースおよび特徴点抽出がなされるようにしてある。特徴点が採取される字画（始筆部と終筆部）や転折部を人が指定しているのは、連続運筆などのために字画が不明瞭な筆跡が少なからず存在することに対して、その字画についての特徴点を採取すべきか、否かを人が判断するためである。不明確な字画や転折部については特徴点を強引に採取しない。これは科学捜査分野での適用を考えた場合、曖昧な事象に基づかない、あるいは説明しやすい鑑定のために重要と考える。

特徴点を抽出しない例を図 6.2 に示す. 図 6.2(a)では「区」の第 4 画が湾曲しているために転折部の位置が曖昧である. このために転折部を採取していない. 図 6.2(b)では「東」の第 2 画～第 5 画が連続筆記されており各字画が不明瞭である. そのため, 明確に認められる第 3 画の始筆部と転折部以外の特徴点を採取していない. 図 6.2(c)では「谷」の第 5 画～第 7 画の運筆が正字とは異なっており, 各字画を特定できないことから, それら字画の特徴点すべてを採取していない. これらの例で示したように不明瞭, あるいは裁判員のような非専門家である第 3 者に説明しにくいような特徴点は採取しないということを原則としている. 本稿で示す実験では, 特徴点を採取する人によって採取する／しないの判断のブレが大きくなるように, 特徴点採取マニュアル (ガイドライン) を用意し, それに基づいて特徴点採取を行っている.

なお, この段階で得られる特徴点の座標は, 人が字画を指定するのであるから, 各字画の何番目の特徴点の座標であるのかが既にわかっていることになる.

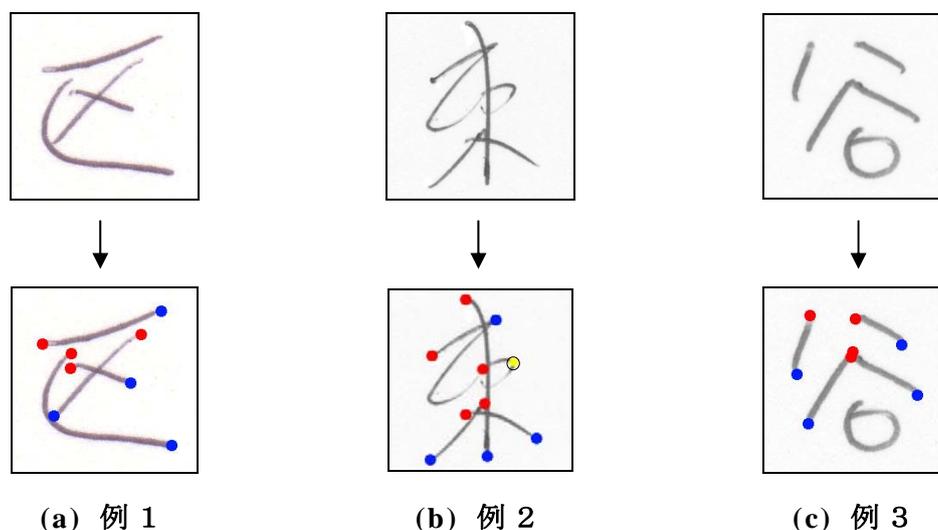


図 6.2 特徴点を採取しない例

(採取する始筆部, 転折部, 終筆部をそれぞれ赤・黄・青の色で示した. 不明確な字画や転折部については特徴点を強引に採取しない)

以上示したように日本語全般に対応できるようにひらがな・カタカナ・数字に対する特徴点の抽出方法を拡張し, 図 6.3 に示した本手法の処理の流れに沿って識別実験を行う.

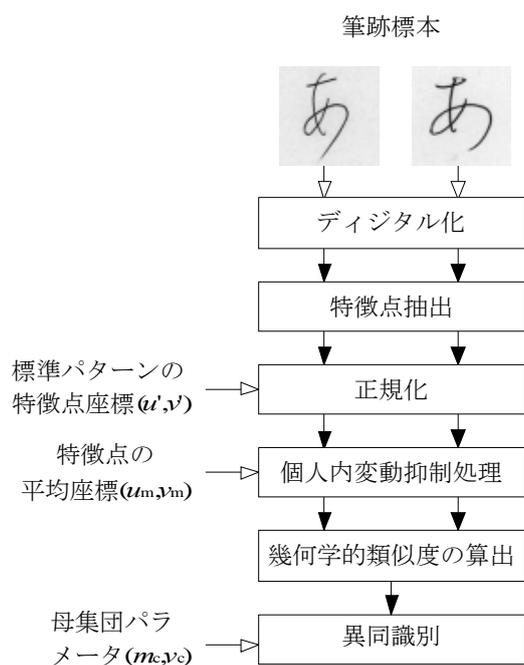


図6.3 提案法における処理の流れ

6.3 識別実験

提案する筆者異同識別法をひらがな，カタカナ，数字，漢字の各文字に適用したときに，どの程度の識別精度が得られるかを調べるために識別実験を行った．

6.3.1 実験対象データ

ひらがな，カタカナ，数字，漢字に対する被験者それぞれ 122 人，109 人，101 人，320 人に，線など何も書かれていない白紙の A4 コピー用紙 1 枚当たり文字列「あいうえお」「アイウエオ」「1234567890」「東京都渋谷区」を字種ごとに横一行で記載してもらい，これを 5 回反復して被検者 1 人当たり 5 枚の筆記済み A4 コピー用紙を収集した．

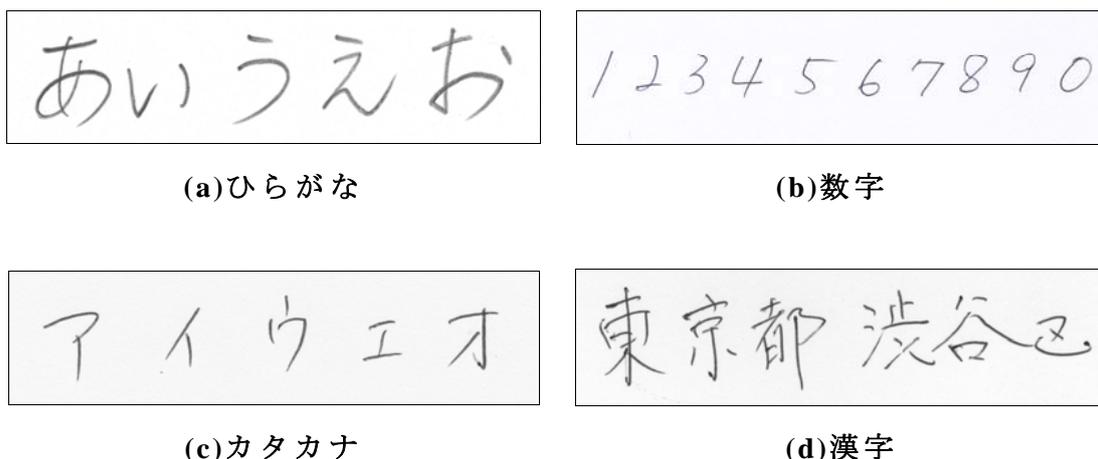


図6.4 筆跡標本例

筆記に際しては、出来るだけ自然に筆記された筆跡を収集することを念頭に、横書きすること以外の字体などの筆記の仕方について特に制約をせず、「使い慣れている筆記具で、また、書き慣れている字体、大きさ、スピードで A4 コピー用紙の中央付近に、特に緊張せずいつものように記載してください。」という指示を被験者に伝えた。

次に、収集した筆記済み A4 コピー用紙の筆記されている領域を解像度 600 dpi、量子化レベル数 256 階調でフラットベッドスキャナを使用してデジタル化した（図 6.4 参照）。

したがって、筆跡標本はひらがな「あいうえお」、カタカナ「アイウエオ」の各 5 文字、数字「1234567890」の 10 文字および漢字「東京都渋谷区」の 6 文字であり、各字種における文字当たりの標本数、生成可能な個人内標本対の数、個人間標本対の数は、表 6.1 のとおりとなる。

表6.1 文字あたりの標本数と標本対の数

	ひらがな	カタカナ	数 字	漢 字
標本数	610	545	505	1,600
個人内標本対	1,220	1,090	1,010	3,200
個人間標本対	184,525	147,150	126,250	1,276,000

なお、個人内標本対の数を N_1 、個人間標本対の数を N_2 とすると、これらは次式で与えられる。ただし、 N_n は筆者数、 N_s は筆者当たりの筆跡数 (= 5) である。

$$N_1 = N_h \frac{N_s(N_s - 1)}{2} \quad (6.1)$$

$$N_2 = N_s^2 \frac{N_h(N_h - 1)}{2} \quad (6.2)$$

被験者の性別構成および年齢構成を表 6.2 に示す。性別構成についてはあまり偏りはないが、年齢構成については 20 代の被験者が約 50%と半数を占めている。

表 6.2 被験者の性別・年齢構成 (M: 男性, F: 女性)

		ひらがな		カタカナ		数 字		漢 字	
性別		M	F	M	F	M	F	M	F
年 代	10	2	5	2	5	0	0	0	0
	20	42	14	42	16	34	19	93	45
	30	4	13	1	5	5	10	34	39
	40	2	11	2	5	4	8	21	29
	50	9	10	9	15	4	7	27	17
	60	0	1	0	0	3	2	6	6
	70	1	2	0	2	0	4	0	2
	80	1	4	1	3	0	1	0	1
	90	1	0	1	0	0	0	0	0
性別合計		62	60	58	51	50	51	181	139
合計		122		109		101		320	

6.3.2 一文字の識別結果

ひらがな, カタカナ, 数字, 漢字の各実験対象文字それぞれについて得られた識別精度を図 6.5 に示す。グラフ中の横線は TMR, TNMR, 平均識別精度を示す。平均識別精度でみると, 漢字 6 文字の平均識別精度の平均と最小値・最大値間の振れ幅が $98.3 \pm 1.0\%$ であるのに対して, ひらがな 5 文字, カタカナ 5 文字, 数字 10 文字のそれは, それぞれ $97.1 \pm 1.9\%$, $98.9 \pm 0.7\%$, $98.6 \pm 1.8\%$ となっている。

ひらがな，カタカナ，数字については，その字画構成の単純さから筆跡個性が表れにくく，筆者異同識別に使用しづらい面があるとされているが，提案手法による識別結果では，漢字の識別精度と大差はなく，カタカナと数字についてはむしろ漢字よりも少し高い識別精度が得られている．なかでも数字の「1」は，極めて単純な字画パターンをしているが，平均識別精度は96%を越えている．これは，字画パターンの曲がりに関する筆跡個性とその恒常性が提案手法により捉えられたことを示唆している．もちろん，識別精度の文字依存性は上に示したようにあるが，それも漢字と大差はない．

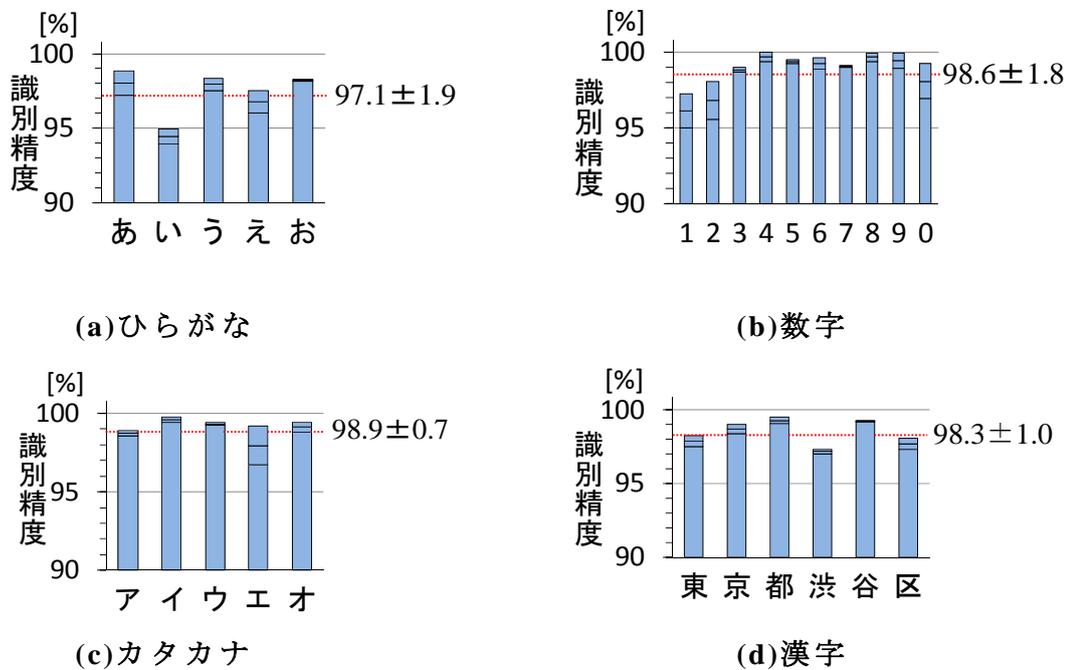


図6.5 一文字の識別精度

(ひらがな，カタカナ，数字，漢字の識別精度に大差はなく，カタカナと数字についてはむしろ漢字よりも少し高い識別精度が得られている)

6.3.3 複数文字の識別結果

科学捜査分野における筆跡鑑定では、一文字のみを使用して筆者異同識別を行うことは希で、一般的には複数文字が使用される。そこで、複数の文字を使用したときの識別実験を字種ごとに行った。複数文字の組み合わせは、たとえばひらがな2文字の場合、「あ」と「い」、「あ」と「う」、「え」と「お」のように10種類ある。同様に3文字、4文字の場合は、それぞれ10種類、5種類の組み合わせがある。すべての組み合わせについて識別実験を行って、得られた平均識別精度を識別に使用した文字数ごとに平均を求めた。それを表6.3に、また比較しやすいように5文字までのそれを図6.6に示す。

表6.3 複数文字使用時の平均識別精度（平均）[%]

文字数	ひらがな	カタカナ	数 字	漢 字
1	97.078	98.883	98.612	98.315
2	99.473	99.863	99.832	99.578
3	99.850	99.974	99.950	99.842
4	99.933	99.990	99.977	99.934
5	99.999	100.000	99.990	99.973
6	—	—	99.996	99.999
7	—	—	99.998	—
8	—	—	99.999	—
9	—	—	100.000	—
10	—	—	100.000	—

一文字を識別に使用したときは前節で述べたとおり、漢字と比べるとひらがなの識別精度が少し劣っているが、カタカナと数字はむしろ漢字より高くなっている。この傾向は、識別に使用する文字数が増えても変わらないが、字種間の差は徐々に小さくなっていき、いずれの文字種でも平均識別精度（の平均）99.9%を越えるのは、4文字を識別に使用したときとなっている。

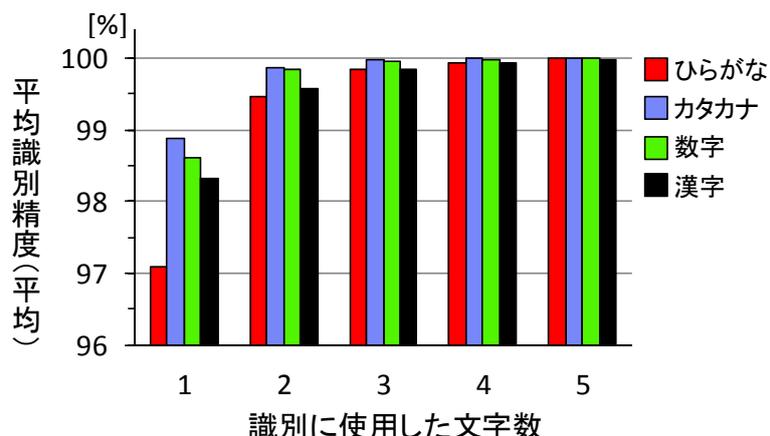


図 6.6 複数文字の識別精度

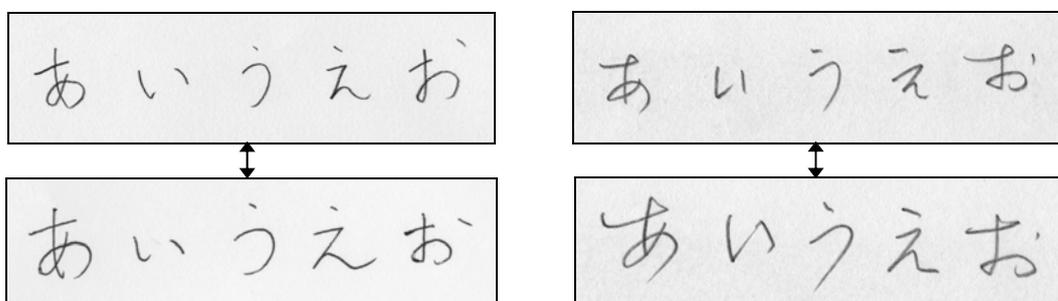
(漢字に比べてカタカナと数字の識別精度は、むしろ高くなっている。いずれの文字種でも平均識別精度 99.9%を越えるのは、4文字を使用したときである)

99.9%という値は、科学捜査分野における要求精度の目安とされている数値の一つであり、その観点からもひらがな、カタカナ、数字は、漢字と同様に充分実用的識別精度が得られることがわかる。

漢字が 99.9%を越えるのは 4文字のときであるのに対して、特にカタカナと数字は、3文字で 99.9%を越えており、一文字のときの識別精度差が複数文字の場合でも表れており、やはり漢字よりむしろ少し高めの識別精度が得られている。複数文字を使用した識別実験でも、科学捜査分野における人による筆跡鑑定では、単純な文字よりも複雑な文字の方が鑑定に有効であるという定説^{21)~23)}とはかなり異なる識別結果となった。

ひらがな・カタカナ・数字に関して誤識別した筆跡標本対の例を図 6.7～図 6.9に示す(漢字については、第 2章を参照)。図 6.7(a)は、「あ」「い」「う」「え」「お」の 5文字を識別に使用したときに別人の筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例、同図(b)は、「あ」「い」「え」「お」の 4文字を識別に使用したときに同一人による筆跡を別人による筆跡と誤識別した例を示した。図 6.8(a)は、「ア」「イ」「エ」「オ」の 4文字を識別に使用したときに別人の筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例、同

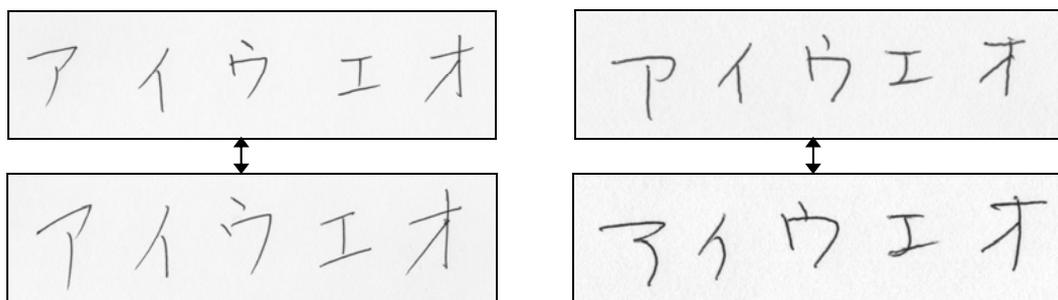
図(b)は、「ア」「イ」「ウ」「オ」の4文字を識別に使用したときに同一人による筆跡を異なる筆者による筆跡と誤識別した例を示した。図6.9(a)は、「1」「2」「3」「4」の4文字を識別に使用したときに別人の筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例、同図(b)は、「1」「2」「3」「4」の4文字を識別に使用したときに同一人による筆跡を異なる筆者による筆跡と誤識別した例を示した。字形だけの情報でどの程度字形が似ていたら異なる筆者の筆跡を同一人による筆跡であると誤識別するのか、またどの程度字形が異なっていたら同一人の筆跡を異なる筆者によるものであると誤識別するかを、それぞれの字種で垣間見ることができる。



(a) 別人による筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例

(b) 同一人による筆跡を別人による筆跡と誤識別した例

図6.7 誤識別された筆跡標本対の例－ひらがな－



(a) 別人による筆跡を同一人による筆跡と誤識別した例

(b) 同一人による筆跡を別人による筆跡と誤識別した例

図6.8 誤識別された筆跡標本対の例－カタカナ－

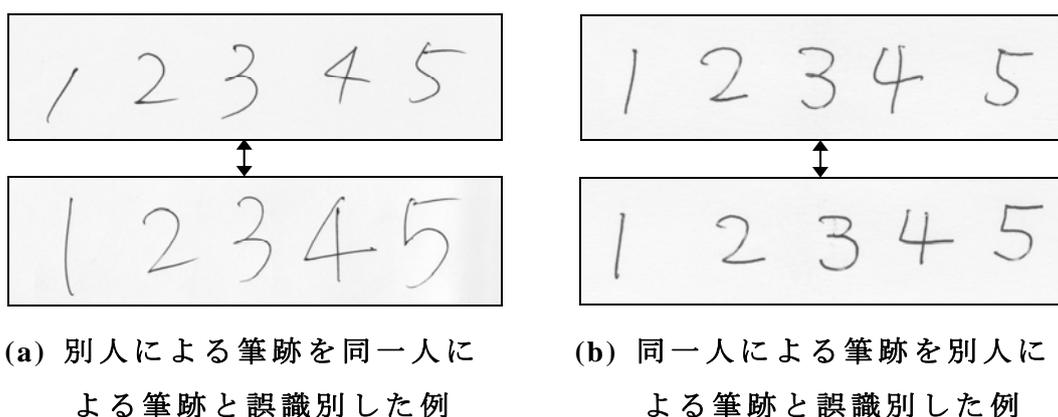


図6.9 誤識別された筆跡標本対の例－数字－

6.4 各字種の識別特性

識別精度については前節 6.3 で示したように従来の定説とはかなり異なる結果が得られたが，どうしてそのような結果が得られたのかを個人内・個人間変動分布（書きむらと筆跡個性）の観点から調べた。

6.4.1 一文字の識別時

各字種において平均的な平均識別精度を示したひらがなの「え」，カタカナの「ア」，数字の「3」，漢字の「京」の個人内・個人間変動分布を図 6.10 に示す．この図を見ると，カタカナ「ア」と数字「3」からなるグループとひらがな「え」と漢字「京」からなるグループの2つにわかれているのがわかる．まず，カタカナと数字からなるグループについては，個人間変動分布がひらがなと漢字からなるグループと比べて大きく原点寄りにシフトしており，従来言われていたように筆跡個性が漢字よりカタカナや数字で小さくなっており，字形を見ただけでは筆者の識別は漢字より相当困難であるということが確認できる．しかし，個人内変動分布も同様に大きく原点寄りにシフトしている．すなわち，書きむらも小さくなっているため，個人内・個人間の両変動分布をみる本提案手法では異同識別精度が漢字と比べて大きく低下するという結果にはならなかったことがわかる．実際に「京」の平均識別精度が 98.7%であるのに対して「ア」と「3」のそれはそれぞれ 98.7%と 98.8%とほぼ同じであった．

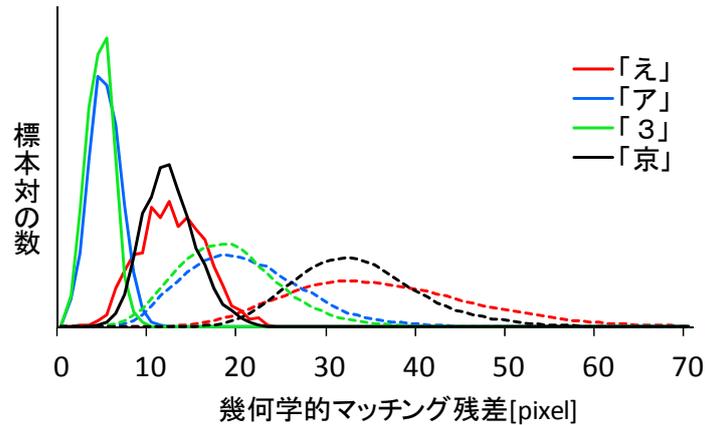


図6.10 一文字に関する個人内・個人間変動分布例

(実線は個人内変動分布，点線は個人間変動分布を示す．書きむらと筆跡個性の観点から，“カタカナと数字”からなるグループと“ひらがなと漢字”からなるグループの2つに分かれている．“カタカナと数字”は“ひらがなと漢字”に比べ，筆跡個性，書きむらともに小さくなっている)

一方，ひらがな「え」は，漢字「京」の個人内・個人間変動分布とグラフ中ほぼ同じ場所に位置していることから，書きむらと筆跡個性の表れ方は同程度であることがわかる．ただし，個人内・個人間変動分布とも，ひらがなの方の広がり漢字のそれより大きくなっている．すなわち，「京」と比べて「え」の方が同一筆者であっても書きむらがより小さく筆記されたり，より大きく筆記されることがあると同時に，異なる筆者間でも類似した字形で筆記されたり，より異なる字形で筆記されることがあることを意味している．これが，ひらがな「え」の平均識別精度が96.8%と，漢字「京」の精度98.7%より約2%低下した理由である．

6.4.2 複数文字の識別時

複数字を使用した場合の代表例として，5文字を使用したときの個人内・個人間変動分布を図6.11に示す．

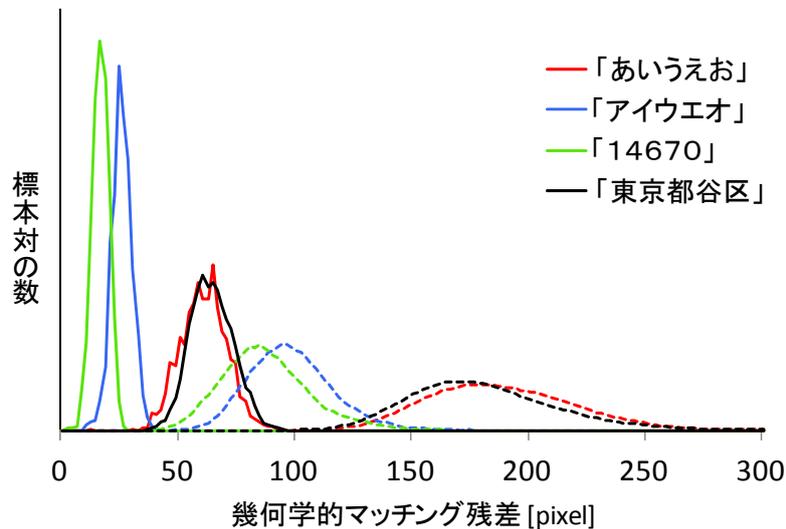


図6.11 5文字を識別に使用した場合の個人内・個人間変動分布例

(実線は個人内変動分布，点線は個人間変動分布を示す．一文字の識別時と同様に，“カタカナと数字”，“ひらがなと漢字”のグループに分かれている．複数文字の使用のとき，数字は書きむら，筆跡個性ともにカタカナより小さくなっている．また，ひらがなは漢字に比べ，書きむらはやや小さめであると同時に筆跡個性はやや大きめに表れている)

5文字の組合せについては，ひらがなとカタカナについては実験対象文字のすべてを使用した場合に対応しているが，数字と漢字については，表6.3に示した5文字を識別に使用したときの平均識別精度の平均に最も近い平均識別精度を示した「14670」と「東京都谷区」の文字をそれぞれ組み合わせたときのものである．また，その5文字の組合せ時の個人内・個人間変動分布の平均 m_1 , m_2 と分散 v_1 , v_2 およびバタチャリヤ距離 d_B を表6.4に示す．バタチャリヤ距離は，2つの分布の分離度を表す代表的な距離測度の一つであり，次式で表される²⁴⁾．

$$d_B = \frac{1}{4} \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{v_1 + v_2} + \frac{1}{2} \log \frac{v_1 + v_2}{2\sqrt{v_1 v_2}} \quad (6.3)$$

表6.4 5文字を識別に使用した場合の個人内・個人間変動分布の分離度

	ひらがな	カタカナ	数 字	漢 字
m_1	60.3	25.0	16.1	63.7
m_2	187.4	97.5	86.7	179.9
$\sqrt{v_1}$	9.9	4.2	3.5	9.1
$\sqrt{v_2}$	31.0	17.6	18.6	31.1
d_B	4.09	4.40	3.98	3.53
平均識別精度	99.999 %	100.000 %	99.999 %	99.967 %

図 6.11 を見ると、図 6.10 の場合と同様に、カタカナと数字からなるグループとひらがなと漢字からなるグループの 2 つに分かれている。すなわち、カタカナと数字の筆跡個性は、漢字と比べて個人間変動分布の平均で 179.9 から 86.7~97.5 へと 1/2 程度小さくなっているが、書きむらも個人内変動分布の平均で 63.7 から 16.1~25.0 へと 1/2.5~1/4 程度小さくなっている。また、個人内・個人間変動分布の広がりも表 6.4 の標準偏差を見るとわかるように小さくなっており、結果としてバタチャリヤ距離 d_B も漢字の 3.53 からカタカナの 4.40、数字の 3.98 へと大きくなっている。このために、カタカナと数字の識別精度が、従来の定説とは異なり、この文字の組合せの場合、漢字が識別精度 99.97% であるのに対して、いずれもそれより高い 100.00% (カタカナ)、99.99% (数字) となったことがわかる。

一方、ひらがなと漢字からなるグループに注目すると、ひらがなの個人間変動分布の広がりには図 6.10 の場合と異なり、漢字とほぼ同じ (分布の標準偏差で漢字とひらがなのそれは 31.1 と 31.0) で、分布の位置が漢字よりもやや右側 (分布の平均は漢字、ひらがなそれぞれ 179.9 と 187.4) にあり、筆跡個性が漢字よりやや大きく表れている。また、書きむらを表す個人内変動分布の広がりには、図 6.10 の場合と同様に標準偏差で漢字

の 9.1 から 9.9 へと大きくなってはいるが，個人内変動分布の平均は漢字の 63.7 から 60.3 へとやや小さくなっている．結果として，バタチャリヤ距離 d_B も漢字の 3.53 から 4.09 へと大きくなっている．これが，この 5 文字使用時において，漢字の識別精度が 99.967% であるのに対して，ひらがなの識別精度が 99.999% と漢字より高くなった理由である．

複数文字のひらがなについて書きむらが漢字よりやや小さめであると同時に，筆跡個性が漢字よりやや大きめに表れるということは，複数文字の字形を見ただけでも筆者の識別が少なくとも漢字程度に可能であることを物語っている．従来の人による鑑定では，字画構成の単純さから，ひらがなはカタカナや数字と同類であるとされているが，提案手法では漢字と同類となった．これは，ひらがなが漢字の草書体から作成された経緯を思い起こすと，運筆状態が漢字のそれと類似し，字画パターンに基づく本提案手法でそれが捉えられたのではないかと思われる．なお，ここで言う運筆状態とは，ひらがなには，漢字と同様にハネ・払い・止めが存在するが，カタカナと数字には，ハネや払いの変形が少なく，実質的には止めが主とみなせるような筆跡が多いことを指す．

6.5 本章のまとめ

日本語文字全般を対象としている提案手法は，オフライン型で確実にかつ容易に計測可能な字画パターンのみの特徴と，一般的によく知られている統計的判定法を使用したごくシンプルな手法である．これは，運用性や頑健性，また判定理由の説明のし易さなど，実利用の観点から好ましい特性を持っていると考えている．また，ひらがな・カタカナ・数字・漢字のいずれの字種に対しても，3 文字～4 文字を識別に使用した場合で平均識別精度 99.9% を越える実用的な精度が得られることを確認した．

さらに，ひらがな「あいうえお」，カタカナ「アイウエオ」，数字「1234567890」，漢字「東京都渋谷区」といった限られた文字に対する実験ではあるが，各文字種に対する識別特性を調べた．その結果，①個人内・個人間変動分布の観点から，日本語文字はカタカナと数字というグループとひらがなと漢字というグループの 2 つのグループに分けられる，②カタカナと数字は，従来言われていたように確かに筆跡個性は漢字の 1/2 程度

しか表れないが、同時に書きむらも $1/2.5 \sim 1/4$ 程度と大幅に小さく、結果として異同識別精度は漢字よりむしろ高くなる、③ひらがなはカタカナや数字とは異なり、漢字とよく似た個人内・個人間分布特性を示し、書きむらは漢字よりやや小さめに、筆跡個性はやや大きめに表れ、結果として識別精度は漢字と同等もしくは同等以上になる（一文字では文字依存性があるが一概に言えないが、特に複数文字を識別に使用した場合）、など従来の人による鑑定で経験的に言われている定説とはかなり異なる新しい知見が得られた。

提案法は一文字単位の字画パターンという側面からについてだけはあるが、現在非常に多面的になされている科学捜査分野における鑑定の一助として、客観性や信頼性の向上に寄与できるのではないかと考えられる。ただし、本章で示した実験条件や異同識別法について、1)ひらがなとカタカナそれぞれ 5 文字、数字 10 文字、漢字 6 文字と文字種が限られた実験である、2)用いた筆跡標本は一度に連続して 5 回筆記したもので、画質は良く、いわゆる質のよいサンプルを用いた実験である、3)特徴点の採取法（字画を N 等分する際の N の決定方法など）の細かな実装方法について検討していない、などのさらなる検討が必要と思われる点も残っている。現段階では提案法の開発と基本的な性能や特性の把握を行っている段階なので、これらについては今後の課題としたい。

【参考文献】

- 1) 菊池真美, 赤松紀男: “高速筆記者のための高感度筆圧ペンの試作と筆者認証実験”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J38-D-II, No.8, pp.1763-1772 (2000).
- 2) 宮川 透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳: “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J83-D-II, No. 2, pp.671-679 (2000).
- 3) 小宮義光, 松本 隆: “ペン位置・筆圧・傾き情報を用いたオンライン署名照合”, 電子情報通信学会総合大会論文集, p. 217 (1999).
- 4) 栗津優作, 上田勝彦: “筆跡鑑定支援システムの開発”, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-11-75, p. 75 (2006).
- 5) 大川 学, 丸山 稔: “正規化によるオフライン筆者認識への影響分析”, 第6回情報科学技術フォーラム論文集, pp. 105-106 (2007).
- 6) 鈴木道孝, 渡辺秀人, 伊藤章義: “一般的な四角形枠による2次元の形状正規化”, 信学技報, PRMU2007-234, pp. 117-120 (2007).
- 7) 鈴木圭介, 塩山忠義: “パターンマッチング法のための非線形正規化手法の検討”, 信学技報, PRU96-69, HC93-43, pp. 1-7 (1993).
- 8) 清田公保, 櫻井敏彦, 山本眞司: “ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715-723 (1997).
- 9) 小高和己, 荒川弘熊, 増田 功: “ストロークの点近似による手書き文字のオンライン認識”, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 2, pp. 153-160 (1980).
- 10) 田中敬子, 安藤慎吾, 中島真人: “局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”, 信学技報, PRMU2002-243, pp. 1-6 (2003).
- 11) 梅田三千雄, 三好建生, 三崎揮市: “自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”, 電学論 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869-1875 (2002).
- 12) 福井隆文, 梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 信学技報, PRMU2007-233, pp. 111-116 (2008).
- 13) 澤田武志, 大橋剛介, 下平美文: “視覚の誘導場理論を用いたテキス

- ト独立型筆者照合法”，映像情報メディア学会誌，Vol. 56, No. 7, pp. 1124-1126 (2002).
- 14) 安藤慎吾，中島真人：“オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法”，電子情報通信学会論文誌，No1. J84-D-II, No. 7, pp. 1339-1350 (2001).
 - 15) 尾崎正弘，足達義則，石井直宏：“ファジィ理論を用いた筆者識別”，電学論 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933-1939 (2000).
 - 16) 吉村ミツ，吉村 功：“DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法”，電子情報通信学会論文誌，Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259-2266 (1998).
 - 17) 吉田 恵，相澤優秀，鮎川哲也，小林裕幸：“固有空間法の筆者識別への適用”，日本鑑識科学技術学会誌，Vol. 9, p. 別冊 189 (2004).
 - 18) 山崎 恭，近藤維資，小松尚久：“筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式”，画像電子学会誌，Vol. 23, No. 5, pp. 438-444 (1994).
 - 19) 常盤公德，福江潔也，松前義昭：“個人内変動を抑制した字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別”，画像電子学会誌，Vol. 40, No. 4, pp. 660-670 (2011).
 - 20) 常盤公德，福江潔也，曾根光男，長幸平，松前義昭：“日本語全般を対象とする字形のみに基づく筆者異同識別法の提案とその識別特性”，画像電子学会誌，Vol. 42, No. 3, pp. 374-383 (2013).
 - 21) 猪刈秀一：“筆跡の同一性立証に関する研究（第1報）-平仮名について-”，科学警察研究所報告法科学編，Vol. 19, pp.292-296 (1966).
 - 22) 猪刈秀一：“筆跡の同一性立証に関する研究（第2報）-片仮名について-”，科学警察研究所報告法科学編，Vol. 20, pp.257-261 (1967).
 - 23) 猪刈秀一：“筆跡の同一性立証に関する研究（第3報）-漢字について-”，科学警察研究所報告法科学編，Vol. 21, pp.379-383 (1968).
 - 24) 高木幹雄，下田陽久（監修）：“新編 画像解析ハンドブック”，p.1590，東京大学出版会(2008).

第 7 章 結論

科学捜査分野において，実用的に十分な適用性と識別性能を持ち，識別の過程と根拠を説明し易いコンピュータによる筆者異同識別法を開発した．この方法および本研究の特徴は，以下のとおりである．

1. 様々な状態にある鑑定対象筆跡から安定的に抽出可能な字形という特徴のみに基づいた方法である．
2. 一般的に曖昧な字画形態を持つ筆跡標本に対して，2 値化や細線化といった不安定な 2 値画像処理を行わずに，鑑定人自身が確実に抽出できる字画あるいはその特徴点を採取する．また，DP マッチングなどの特徴点の対応点探索といった不安定な処理が不要である．
3. 特徴点の採取以降は，正規化から識別までよく知られた簡単なアルゴリズムによって自動処理される．シンプルで実装し易くその運用も極めて容易である．
4. 従来の筆跡の重心位置による位置合わせや，文字の外接四辺形やモーメント特徴などによる筆記文字サイズの正規化と比べ，筆跡の特徴点による回転を含むはるかに正確で信頼性の高い正規化法を考案．
5. “書きムラ（個人内変動）” は，その大部分が射影歪みであることを明らかにし，その抑制が射影変換により可能であり，その適用により異同識別精度が大幅に向上することを示した．この個人内変動の抑制という発想は，従来の研究ではまったく無かったものである．
6. 基本的な識別法として代表的な統計的識別法である最大尤度法を採用している．その識別過程は明確で統計的に合理的な識別が安定的になされ，運用しやすくかつ説明もし易い．
7. 母集団の推定に十分な数の筆跡サンプルが用意されている場合，ノンパラメトリック識別法の代表例である k 近傍法によって識別精度のさらなる向上が見込めることを示した．
8. 漢字・ひらがな・カタカナ・数字の日本語全般に適用でき，最大尤度法を使用したときに得られる筆者異同識別精度は 3~4 文字を識別に使用すれば 99.9% を越える．これは，科学捜査分野における最高の要求精度を満足する．

9. 従来、定性的に言われていた書きムラや筆跡個性を個人内変動分布と個人間変動分として定量的に表すことが可能となった。またその解析から、従来の定説を覆す次の知見が得られた。

(1)日本語文字は、漢字とひらがなからなるグループとカタカナと数字からなるグループの2つのグループに分けられる。

(2)ひらがなは漢字と同程度の識別精度が得られるばかりでなく、カタカナと数字は漢字よりもむしろより高い識別精度が得られる。

以上の特徴により、提案したコンピュータによる筆者異同識別法は、科学捜査分野で要求される適用性と高い異同識別性能を日本語文字全般に対して合わせ持つばかりではなく、従来の鑑定人の学識・経験によるアプローチとは全く異なる識別過程が合理的で説明し易い客観的・定量的鑑定手段を与えるものである。その意味で本研究は、科学捜査分野における筆跡鑑定のあり方を変革し、大きく貢献するものと期待される。

【発表論文，学会発表一覧】

第 2 章

- 1) 常盤公德，福江潔也，松前義昭：“個人内変動を抑制した字画の配置パターンのみに基づく筆者異同識別”，画像電子学会誌，Vol. 40, No. 4, pp. 660-670 (2011).

(学会発表)

- ・常盤公德，小泉崇，福江潔也，“字画の幾何学的配置からみた個人内・個人間変動”，日本法科学技術学会第 11 回学術集会講演要旨集，p.221 (2005.11).
- ・常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別”，日本法科学技術学会第 12 回学術集会講演要旨集， p.186 (2006 .11).
- ・星名昭義，大久保亮，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別（性別・年齢依存性）”，日本法科学技術学会第 14 回学術集会講演要旨集， p.187 (2008.10).
- ・小澤玲央奈，常盤公德，福江潔也，“サンプル平均を対象とした字形に基づく筆者異同識別”，日本法科学技術学会第 16 回学術集会講演要旨集， p.144 (2010.11).
- ・常盤公德，福江潔也，“対象筆跡が限られる場合における筆者異同識別”，日本法科学技術学会第 16 回学術集会講演要旨集，p.145(2010.11).
- ・小栗宜大，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別一画数依存性一”，日本法科学技術学会第 16 回学術集会講演要旨集， p.142 (2010.11).
- ・山崎智博，常盤公德，福江潔也，“KS 検定を用いた字形に基づく筆者異同識別”，日本法科学技術学会第 16 回学術集会講演要旨集， p.143 (2010.11).

第 3 章

- 1) 常盤公德，福江潔也：“筆者異同識別において個人内変動を抑制する幾何変換モデルの検討”，東海大学情報理工学部紀要，Vol.11, No.2, pp.1-9 (2011).

第 4 章

(学会発表)

- ・大久保亮，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別（識別精度とその筆記時期依存性）”，日本法科学技術学会第 14 回学術集会講演要旨集，p.186（2008.10）.

第 5 章

- 1) 常盤公德，福江潔也，松前義昭：“k 近傍法による筆者異同識別精度の改善”，東海大学情報理工学部紀要，Vol.12, No.1, pp.11-18 (2012).

(学会発表)

- ・常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別（第 3 報）”，日本法科学技術学会第 13 回学術集会講演要旨集，p.192（2007.11）.

第 6 章

- 1) 常盤公德，福江潔也，曾根光男，長幸平，松前義昭：“日本語全般を対象とする字形のみに基づく筆者異同識別法の提案とその識別特性”，画像電子学会誌，Vol. 42, No. 3, pp. 374-383 (2013).

(学会発表)

- ・常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別（数字の場合）”，日本法科学技術学会第 14 回学術集会講演要旨集，p.185（2008.10）.
- ・荘司ゆかり，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－数字－”，日本法科学技術学会第 15 回学術集会講演要旨集，p.201（2009.10）
- ・阿部由香里，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－ひらがな－”，日本法科学技術学会第 15 回学術集会講演要旨集，p.202（2009.10）
- ・大塚恭平，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－ひらがな－”，日本法科学技術学会第 16 回学術集会講演要旨集，p.141（2010.11）.

- ・小森裕介，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－ひらがな－”，日本法科学技術学会第17回学術集会講演要旨集，p.156（2011）.
- ・稲見圭亮，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－ひらがな：筆記文字サイズ依存性－”，日本法科学技術学会第17回学術集会講演要旨集，p.157（2011.11）.
- ・田村正明，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－カタカナ－”，日本法科学技術学会第17回学術集会講演要旨集，p.158（2011.11）.
- ・甲田有希恵，常盤公德，福江潔也，“字形に基づく筆者異同識別－カタカナ：筆記文字サイズ依存性－”，日本法科学技術学会第17回学術集会講演要旨集，p.159（2011.11）.

謝辞

本研究は 2006 年に東海大学情報技術センターとの共同研究として開始し、大学院博士課程を修了するまでの 8 年間の集大成である。研究を進めるに当たり、数多くの先生方、後輩、関係諸機関のご協力をいただいた。

本研究を遂行し学位論文をまとめるに当たり、終始懇切に多くのご支援とご指導を賜りました、東海大学大学院地球環境科学研究科 長 幸平教授に心から感謝申し上げます。

本研究を始める切っ掛けと研究の場を与えてくださった東海大学情報技術センター所長 松前義昭教授、東海大学情報技術センター次長 下田陽久教授に厚く御礼申し上げます。

入学するに当たり、快く引き受けてくださり、後押ししてくださった東海大学大学院地球環境科学研究科長 岡田喜裕教授に感謝申し上げます。

研究全般にわたる多大なご支援、ご指導を賜りました東海大学情報技術センター福江潔也教授に深く感謝いたします。

論文の細部まで確認していただき、きめ細かいご助言、ご指導いただきました東海大学工学部光・画像工学科虎谷充浩教授に感謝いたします。

常に前向きな思考と笑顔で力強く励ましてくださいました地球環境科学研究科中島孝教授に感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、適切なるご助言、ご提言をくださり常に激励してくださった東海大学情報理工学部 曾根光男教授に感謝の意を表します。

社会人 1 年目から文書鑑定に関するご指導、ご助言をいただき、今に至るまで暖かく見守ってくださった江戸川大学社会学部人間心理学科高澤則美教授に感謝いたします。

防犯ビデオ解析など画像処理分野の技術指導をしていただいた東海大学情報技術センター中野良志氏、立石廣康氏をはじめ、様々な形で支援いただいた鈴木清恵氏、小山和子氏にお礼申し上げます。

また、データの採取を頑張ってくくださった学生の大久保亮君、星名昭義君、甲田有希恵さん、さらに、研究対象の筆跡を提供していただいた皆様に感謝いたします。

最後に、いつも応援してくれた家族（尚子、勇人、故義母）に感謝します。