

Earth Mover's Distance を利用した 多肢選択式 e-Test のための筆記認証法の検討

古田 壮宏^{†1} 米谷 雄介^{†2} 赤倉 貴子^{†1}

本稿ではペンタブレットを利用して記述された文字を利用した受験者認証法を検討する。試験方式として多肢選択式を想定し、選択肢には「あ」行を利用する。我々はこのような試験の認証に対して、認証判定の基準となる類似性の尺度として、輸送問題の最適解である Earth Mover's Distance (EMD) を利用することを提案する。この EMD を用いて、解答記述の際にペンタブレットによって取得された 2 つ筆記行動の類似性を評価する。実際に試験形式で取得したデータに対する評価実験より、e-Test の受験者認証に対する提案手法の適用可能性を示した。

An Examinee Authentication Method for Multiple-Choice e-Tests Using the Earth Mover's Distance

TAKEHIRO FURUTA,^{†1} YUSUKE KOMETANI^{†2}
and TAKAKO AKAKURA^{†1}

In this paper, we discuss an examinee authentication method based on characters written by a pen tablet. The examination we assumed is multiple-choice examination in which five simple Japanese characters are used as choices. We propose a new similarity measure using the earth mover's distance (EMD) to calculate the similarity between two sets of dynamic information of writing. We evaluate the proposed method using answers given when examinees take an examination by e-testing. The results indicates that our method is applicable for the examinee authentication.

^{†1} 東京理科大学工学部

Faculty of Engineering, Tokyo University of Science

^{†2} 東京理科大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science

1. はじめに

近年、少子化等の社会的背景の下、高等教育機関には社会人を対象とした能力開発支援や再教育機関としての役割などの多様なニーズへの対応が求められている。この対応のひとつとして、e-Learning を利用した時間的・空間的な制約の緩和を挙げることができる。インターネットを介して学習を行う e-Learning により、学習者は好きな時間・場所で学習を行うことができる。しかしながら、高等教育機関には、e-Learning の導入が進んでいるものの、単位取得のためには大学に試験を受けに行く必要がある。インターネット上で試験を行う e-Test を利用できれば、このような空間的な制約の緩和につながり、より学びやすい環境の構築につながると考えられる。

しかしながら、この e-Test は、第三者が本人に成り代わり受験する「なりすまし」や「カンニング」という不正行為が容易であることなどから、あまり普及していない。この「なりすまし」の防止を目的として、解答選択肢に「あ」行の 5 文字を用いた多肢選択式試験を対象に、ペンタブレットによる解答を記述する際の筆記行動を利用した受験者認証法の研究が行われている^{1),2)}。既存の e-Test における受験者認証は ID とパスワードを利用したものが多く現状に対して、菊池ら¹⁾ は、試験中のペンタブレットによる解答の筆記行動そのものを利用することで、試験を妨げることなく受験者認証を行うことを提案している。さらに、あらかじめ登録されたデータと解答時に取得したデータとの類似性を測るために、解答文字の形状を利用したパターンマッチング手法を開発している。米谷ら²⁾ は、筆記情報をを用いた署名認証の研究³⁾⁻⁵⁾ では DP マッチングがよく利用されていることに着目し、同様の試験を対象として、筆記時に取得した筆圧等の動的な筆記情報を利用した DP マッチングによる受験者認証法を提案している。

筆記認証という観点から、これらの研究と、通常の筆記情報を用いた署名認証とを比較すると、記述文字の複雑さに大きな違いがある。署名認証では筆者が書き慣れた自身の氏名を表す複数文字を利用するのに対して、解答選択肢の「あ」行は、氏名ほどは筆記頻度は高くなっておかつより単純な 1 字である。そのため、これらの研究では、通常の署名認証等で得られている認証精度は得られていない。

本稿では、より高い認証精度を持つ認証方法の構築を目指して、解答時に取得した筆記情報の類似性を測る距離尺度として Earth Mover's Distance (EMD) を用いた受験者認証法を提案する。これは、類似性を測る距離として輸送問題⁶⁾ の目的関数値を用いるものであり、類似画像検索に利用する距離尺度のひとつとして提案されている⁷⁾。この EMD は、類

似画像検索のみではなく、類似音楽検索⁸⁾ や文書分類⁹⁾ などでもその有用性が示されている。提案手法では、ある解答文字を字画に分割し、その字画内での各時点における筆記情報とあらかじめ登録された同じ字画の筆記情報とで EMD により類似性を評価する。これにより、解答を記述した受験者が本人であるかどうかの認証を行う。

以下、2章では EMD を用いた受験者認証法について述べ、3章では実際に試験を行い取得したデータに対する提案手法の評価実験について述べる。最後のまとめと今後の課題について述べる。

2. Earth Mover's Distance を用いた受験者認証法

本章では、まず、EMD の定式化およびペンタブレットで取得できる筆記情報を紹介する。その後、EMD を用いた筆記情報の類似度の計算方法およびこれを用いた受験者認証法を提案する。

2.1 Earth Mover's Distance

EMD は、類似画像の検索において、画像特徴量を表す分布の距離を表すものとして提案された⁷⁾。このとき、分布間の距離として、輸送問題の最適解における目的関数値を利用している。輸送問題⁶⁾ とは、複数の供給地から複数の需要地への輸送に必要な総費用を最小にする輸送先および輸送量を求める問題である。このとき、各供給地と需要地にはそれぞれ供給量と需要量が与えられ、さらに、それらの間の輸送費用も与えられるものとする。

EMD の定式化は以下の通りである⁷⁾。

パラメータ：

I ： 供給点の添字集合

J ： 需要点の添字集合

s_i ： 供給点 i の供給量

d_j ： 需要点 j の需要量

c_{ij} ： 供給点 i から需要点 j への輸送費用

決定変数：

x_{ij} ： 供給点 i から需要点 j への輸送量

定式化：

$$\min. \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq s_i, \quad i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq d_j, \quad j \in J, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} = \min \left\{ \sum_{i \in I} s_i, \sum_{j \in J} d_j \right\}, \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, j \in J \quad (5)$$

目的関数 (1) は、総輸送費用の最小化を表す。EMD はこの最適化問題の最適解における目的関数値を総輸送量で除したものと定義される。式 (2) は供給点 i の供給量は s_i を超えないことを表し、同様に式 (3) は需要点 j に供給される総和は需要量 d_j を超えないことを表している。式 (4) は、総輸送量は多くとも供給量の総和もしくは需要量の総和であることを規定している。

2.2 ペンタブレットで取得できる筆記情報

本研究では受験者によるペンタブレットでの解答ごとに認証を行う。受験者が「本人」か「他者によるなりすまし」かを解答を記入した際の筆記情報を基に判断する。図 1 にペンタブレット (WACOM Intuos 3 A6 ワイドサイズ) から得られる筆記情報の種類を示す。ペン先の x 座標、 y 座標、筆圧 P 、ペンと筆記面のなす角度である仰角 θ 、ペンの方向を表す方位 ϕ の 5 種類が取得可能である。

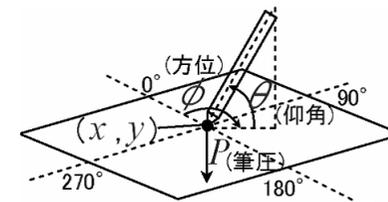


図 1 筆記情報の種類

ペン先の x 座標、 y 座標はタブレットボードの左上を原点 $(0, 0)$ として $0 \leq x \leq 8000$ [point], $0 \leq y \leq 6000$ [point] の範囲で取得でき、筆圧 P は $0 \leq P \leq 1023$ [レベル], 仰角

θ はタブレットの垂直方向を 90 度としてタブレット平面に傾くときに 1.0 度ずつ減少する範囲 $26 \leq \theta \leq 90$ [度] , 方位 ϕ はタブレットの上方向を 0 度として右回りに 1.0 度ずつ増加する範囲 $0 \leq \phi \leq 359$ [度] で取得できる . これらの筆記情報は 10 ms ごとに取得でき、時系列情報として取得できる .

2.3 EMD を用いた類似度計算

EMD を受験者認証に適用するためには、供給点と需要点およびそれらの間の輸送費用を定義する必要がある . ある 2 つの筆記行動を比較するとき、一方の筆記行動を供給側とし、他方を需要側とする . このとき、供給点 i は筆記行動が時系列情報として取得できることに着目し、書き始めから 10 ms 間隔で取得した時点 i の筆記情報を要素とする特徴ベクトル $(x_i, y_i, P_i, \theta_i, \phi_i)$ で表されるものとする . 需要点 j も同様である . さらに供給点 i と需要点 j の輸送費用 c_{ij} は 2 つの特徴ベクトルのユークリッド距離で定義する .

テストの解答は、可読性を考慮すると、一般に楷書で記述される場合が多いと考えられる . このとき筆記行動は各字画ごとに取得できる場合が多い . そこで文字を字画ごとに分け、字画ごとに個別に EMD を計算し、その距離を足し合わせたものを 2 つの筆記情報間の距離とする .

2.4 受験者認証の流れ

本研究で想定する受験者認証は、筆記情報の登録と解答ごとの認証とに大別される . まず、筆記情報の登録においては、「あ」行の各文字を複数筆記してもらい、これを登録情報として保存する . 複数ある登録情報から各文字の各字画ごとに、本人を代表する特徴を生成し、参照情報を作成する . 本稿では、登録データ内の複数回記述された各筆記情報同士で、EMD により類似性を表す距離を求め、最も他の筆記情報との距離に近いものが、その人の特徴を表していると考え、これを参照情報とする .

その後、e-Test のさいには、解答より得られる筆記情報を字画に分割し照合情報として保存する . この照合情報と事前に登録した参照情報とを EMD により距離を計算する . この距離が事前に設定した閾値より小さければ「本人」、大きければ「なりすまし」と判定する .

3. 評価実験

3.1 e-Test System

図 2 に評価実験で使用したノート PC (Fujitsu Lifebook) とペンタブレット (Wacom Intuos 3 model:PTZ-431W) を、図 3 に e-Test System を示す . e-Test System は Frame1 ~ 3 で構成される . Frame 1 はメニューであり、選択した番号に応じた問題と解答履歴が表示

され、Frame 2 に問題表示と解答記述、Frame 3 に解答履歴と文字認識結果が表示される . 被験者は e テストシステム中央の枠内にペンタブレットにより解答を記入する . 解答記入後、送信ボタンを押すと、書いた文字の筆記情報がサーバに送信される . ペンタブレットには記入の目安となる枠が表示されており (図 2 枠内)、この記入枠と e テストシステムの枠とが対応している . なお、システム開発言語は Perl/CGI と Java である .

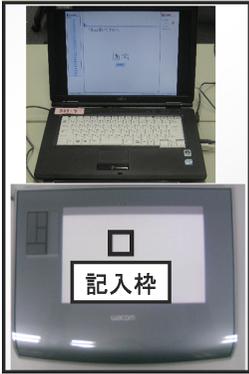


図 2 使用機器

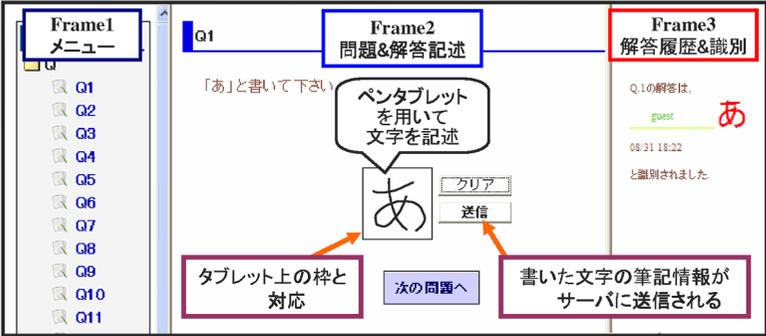


図 3 e-Test System の画面

3.2 評価基準

提案した手法の精度を客観的に知るためには、精度評価を行う必要がある。一般に生体認証における精度評価を行う際の「誤り」には2種類ある。1つ目は他者を本人と間違えて受け入れてしまう誤り、2つ目は本人を他者と間違えて拒否してしまう誤りである。これらがどの程度の割合で起こるかを示す指標が他者受け入れ率 (FAR : Fault Accept Rate) と本人拒否率 (FRR : Fault Reject Rate) である。

$$FAR = \frac{\text{距離} \leq \text{閾値} \text{ である偽筆数}}{\text{全偽筆数}} \times 100(\%)$$

$$FRR = \frac{\text{距離} > \text{閾値} \text{ である真筆数}}{\text{全真筆数}} \times 100(\%)$$

FAR と FRR が共に低くなるのが認証方法として望ましい。しかし FAR と FRR は閾値の変化に対してトレードオフの関係にある。FAR と FRR が等しくなったときの等誤り率¹⁰⁾(EER : Equal Error Rate) が認証精度の評価によく用いられることから、本研究においても認証評価に EER を用いる。

3.3 評価実験 1

3.3.1 評価実験 1 の概要

提案手法が「あ」行 1 文字に対して有効であることを確認するために、評価実験 1 を実施する。同一被験者から 2 回に分けて採取した筆記情報を基に EER を計算し、得られた EER の値から提案手法の評価をおこなう。なお被験者は東京理科大学学生 9 名であり、全員が右利きである。

● 1 回目：筆記情報の登録および参照情報作成

各被験者に「あ」～「お」を繰り返し 8 文字、合計 40 文字を筆記してもらい、それらを被験者個人の筆記情報として登録する。登録した筆記情報を基に各文字種の各字画ごとに個人を表す特徴を持った 1 つを選択し、これをその字画の参照情報として保存する。例えば、被験者 A が筆記した「あ」8 文字の中で、ある文字の 1 画目と他の 7 文字の 1 画目との間で EMD を計算し、その総和が最も小さいものを被験者 A の「あ」の 1 画目の特徴を表す字画としてを選択する。2 画目以降および残りの「い」～「お」についても同じ手順で、各文字の字画に対して最も特徴を表す字画を選択する。

● 2 回目：照合情報の登録

1 週間の間隔を空け、再び「あ」～「お」各 8 文字、合計 40 文字を筆記してもらう。ここで得られた筆記情報を照合情報とする。

2 回目で得られた照合情報と 1 回目で得られた各被験者の参照情報を用い、照合情報の各 1 文字ごとに EER を計算する。なお、1 回目の筆記情報の採取期間は 2009 年 10 月 20 日～10 月 30 日、2 回目の採取期間は 2009 年 10 月 27 日～11 月 6 日である。1 回目・2 回目ともにデータ取得前にペンタブレットに慣れてもらうために 25 回の筆記練習を実施した。実験に用いた計算機の CPU は、Intel Core i5 2.53 GHz で、メインメモリは 4 GB であった。また、輸送問題の求解には IBM ILOG CPLEX 12.2 を用いた。1 字の類似度計算に要する時間は平均 0.25 秒であった。

3.3.2 評価実験 1 の結果と考察

表 1 に被験者ごとの各文字に対する EER とその平均値を示す。

まず、被験者ごとの EER を比較すると、被験者 D が最も良く、「う」以外の文字では誤りがなかった。被験者 D の筆記データを確認すると、他の被験者よりも筆圧が平均的に高くなっていることがひとつの要因であると考えられる。加えて「あ」の形状は、他の被験者が正方形もしくは横長の長方形のような全体の輪郭をしているのに対し、被験者 D の「あ」は縦長の長方形のような全体の輪郭となっていた。このような特徴が筆記情報に現れていたと考えられる。被験者 H や I は他の被験者と比べ極端に悪い結果となった。これは、照合情報のなかで本人のデータにバラツキが大きいことが要因のひとつであると考えられ、これはペンタブレットになれることである程度改善される見込みがあると考えられる。

また、字種ごとの EER を比較すると、「お」の EER が 9.47% で最も良くなっているが、ほとんど字種間に違いがないことがわかる。

ここでは、指示した「あ」行 1 文字を単に繰り返し書かせるという条件で記述された文字に対して、提案手法の評価を行った。全平均で 10.46% という結果は、十分であるとはいえないが、単純なひらがな 1 文字であることを考慮すると、提案手法の適用可能性を示唆していると考えられる。次に実際にテスト問題を解答した際に得られる筆記情報からの認証精度を評価する。

3.4 評価実験 2

3.4.1 評価実験 2 の概要

実際の e-Test を想定した環境下における認証精度を評価するため、評価実験 2 を実施する。認証精度の評価には評価実験 1 と同様に同一被験者から 2 回に分けて採取した筆記

被験者	あ	い	う	え	お	平均
A	16.67	2.31	13.43	10.19	1.39	8.80
B	5.09	18.52	14.35	12.50	6.02	11.30
C	17.13	3.70	14.35	2.78	14.35	10.46
D	0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.09
E	0.00	7.87	12.50	9.72	1.39	6.30
F	17.13	6.02	16.20	18.52	12.50	14.07
G	5.09	8.80	12.96	4.63	8.80	8.06
H	29.63	16.67	11.57	15.28	19.44	18.52
I	3.24	25.46	11.11	21.76	21.30	16.57
平均	10.44	9.93	11.88	10.60	9.47	10.46

被験者	あ	い	う	え	お	平均
A	33.33	11.94	31.27	12.61	33.33	24.50
B	15.90	25.98	18.96	18.12	2.38	16.27
C	12.03	12.55	7.63	9.20	20.48	12.38
D	23.81	1.96	8.60	11.16	12.38	11.58
E	0.49	0.98	0.48	1.57	1.90	1.09
F	29.90	33.33	33.33	33.33	33.33	32.65
G	17.16	19.17	14.76	31.54	17.14	19.95
H	33.33	33.33	33.33	33.33	33.33	33.33
I	12.75	17.48	23.79	8.68	16.54	15.85
平均	19.86	17.42	19.13	17.73	18.98	18.62

情報を基におこなう。被験者は評価実験 1 と同じ学生 9 名を対象に、英語の語彙力を試すテスト¹¹⁾より抜粋した 40 問、制限時間 40 分という条件で実施する。

- 筆記情報の登録および参照情報作成

評価実験 2 においても、評価実験 1 の 1 回目には得られた参照情報(「あ」～「お」を繰り返し 8 文字、合計 40 文字から各文字種ごとに個人を表す特徴を持った字面を選択したもの)を使用する。

- 照合情報の登録

実際の e-Test を想定して作成した英語の語彙力を試すテストを受験してもらい、その際に解答から得られる筆記情報(全 40 問から得られる 40 文字)を照合情報として保存する。

なお、評価実験 1 で取得した 1 回目のデータを用いた。テストの実施期間は、2009 年 11 月 6 日～11 月 14 日である。また、e-Test を行う前にペンタブレットに慣れてもらうために 25 問の筆記練習を実施した。

3.4.2 評価実験 2 の結果と考察

表 2 に被験者ごとの各文字に対する EER とその平均値を示す。なお、評価実験 1 では指定された文字の筆記であったため、各字種の筆記データの個数は等しいが、この評価実験 2 では各被験者の選択した解答によって記述された字種が異なるため、それぞれの筆記データの個数は異なっている。

この実験では、解答を考えながら時間制限の中で筆記しているためか、全体的な傾向としては、単に指示された文字を筆記した評価実験 1 と比較して、精度が悪くなっている。特に被験者 F や H は精度は全文字種において大きく精度が悪化している。被験者 H の実際に筆

記された文字を確認すると、照合情報のほとんどの文字が左に傾いていた。筆記時の姿勢等が変化したことによって、筆記特徴量が変化したものと考えられる。

EER の平均は 18.62%とあまり良い結果ではなかった。しかしながら、実際の試験において、1 文字のみを「なりすまし」を行うことは考えにくい。そこで、提案手法を基に、ある一定時間内に記述された解答された文字を総合的に評価することで、より高い認証精度が実現できると考えられる。

4. おわりに

本稿では、多肢選択式 e-Test における「なりすまし」防止のために、解答選択肢をペンタブレットにより記述した際に得られる筆記情報を利用した受験者認証法を検討した。2 つの異なる筆記情報の類似性を評価する尺度として、線形計画問題のひとつである輸送問題の最適解である Earth Mover's Distance を利用することを提案した。提案手法では、比較する 2 つの筆記情報のうち、一方を供給側、他方を需要側と見なし、筆記時にデータを取得した各時点それぞれ供給地および需要地とした。さらに各供給地から各需要地への輸送費用には、各時点で取得された筆記特徴量のベクトル間の距離を利用した。これらを利用して輸送問題を解くことで、それら 2 つの類似性を測ることを提案した。さらに、試験形式で取得した筆記情報に対して評価実験を行い、提案手法の e-Test に対する適用可能性を示した。

今後の課題としては、筆記者ごとにその特徴がより現れる筆記情報や字面などを選定し適切な重み付けを行うことで、認証精度の向上を行うことを挙げることができる。また、今回の評価実験では、被験者が 9 名とあまり多くなかったため、より多人数での評価実験が必要であると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、平成 22 年度科学研究費補助金挑戦的萌芽研究（課題番号：22650210，研究代表者：赤倉貴子）の助成によるものである。

参 考 文 献

- 1) 菊池伸一，古田壮宏，赤倉貴子：e-Test における受験者認証のための筆圧局所円弧パターン法の提案，日本教育工学会論文誌，Vol.33, No.4, pp.383-392 (2010).
- 2) 米谷雄介，松本 守，古田壮宏，赤倉貴子：多肢選択式 e テストのための DP マッチングを利用した受験者認証法の提案，日本教育工学会論文誌. 掲載予定.
- 3) Munich, M.E. and Perona, P.: Visual Identification by Signature Tracking, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.25, No.2, pp.200-217 (2003).
- 4) Kholmatov, A. and Yanikoglu, B.: Biometric Authentication Using Online Signatures, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.3280, pp.373-380 (2004).
- 5) Zhao, P., Higashi, A. and Sato, Y.: On-Line Signature Verification by Adaptively Weighted DP Matching, *IEICE transactions on information and systems*, No.5, pp. 535-541 (1996).
- 6) Hitchcock, F.L.: Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities, *The Journal of Mathematics and Physics*, Vol.20, pp.224-230 (1941).
- 7) Rubner, Y., Tomasi, C. and Guibas, L.J.: The Earth Mover 's Distance as a Metric for Image Retrieval , *International Journal of Computer Vision*, Vol.40, No.2, pp. 99-121 (2000).
- 8) 獅々堀正幹，大西泰代，拓殖 覚，北 研二：Earth Mover's Distance を用いたハミングによる類似音楽検索手法，情報処理学会論文誌， Vol.48, No.1, pp.300-311 (2007).
- 9) Wan, X.: A novel document similarity measure based on earth mover's distance, *Information Sciences: an International Journal*, Vol.177, No.18, pp.3718-3730 (2007).
- 10) Jain, A.K., Griess, F.D. and Connell, S.D.: On-line signature verification, *Pattern Recognition*, Vol.35, pp.2963-2972 (2002).
- 11) Educational Testing Service: *GRE: Practicing to Take the General Test*, Educational Testing Service, 10th edition (2002).