

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00273

研究課題名(和文) 空中手書き文字の3次元軌跡分割手法の開発と空中署名認証への応用

研究課題名(英文) Development of 3D trajectory segmentation method for AHC and application to signature authentication

研究代表者

清水 忠昭 (SHIMIZU, Tadaoki)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80196518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：我々は空中手書き文字(AHC)入力システムを提案している。先行研究で筆記平面上の2次元の筆記軌跡を、奥行き方向を考慮した3次元に拡張しAHC分割の精度を向上させることが研究目的である。

提案手法では、Step1) 文字をストロークに分割し、Step2) 連続して書かれた文字をストロークの性質を利用して分割する。当初計画に従いStep2の文字分割精度は成功した。しかしStep1のストローク分割精度を向上させることは出来なかった。

Step1の改良のため、研究計画を変更してリザーブコンピューティングの技術を用いた手法を新たに提案した。これにより、Step1のストローク分割精度を向上させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然な動作で機器を操作するNatural User Interfaceが多数提案されている現在、連続して行われる人間のジェスチャを自動で分割(セグメンテーション)することは重要なキーとなる技術である。空中に指文字を描くという限られたシチュエーションとはいえ、ユーザの指動作をユーザからの明示的な操作なく自動で分割する手法を提案し、その精度を向上できたことは一つの成果といえる。

研究成果の概要(英文)：We have proposed an aerial handwritten character (AHC) input system as a character input method using hand gestures. In the previous research, the trajectory of finger movement was treated as two-dimensional data on a writing plane. The purpose of this research is to improve the accuracy of AHC segmentation by using a three-dimensional writing trajectory considering the depth direction.

In the proposed method, Step1) characters are divided into strokes, and Step2) characters written continuously are divided by using the property of strokes. According to the initial plan, we were able to improve the character division accuracy in Step 2. However, the stroke division accuracy in Step 1 could not be improved.

In order to improve Step 1, we changed the research plan and proposed a new method using the technique of reservoir computing, which is a new type of neural network. By this method, we succeeded in improving the accuracy of stroke division in Step 1.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション, 信号処理

キーワード：空中手書き文字 ジェスチャインタフェース NUI ジェスチャ・セグメンテーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

安価なジェスチャ・センサが市販され、ユーザの動作を機器の操作入力とするジェスチャ・インタフェースが注目されている。しかし、これらの入力機器は主としてゲーム用のインタフェースや簡単な家電操作作用として実用化されるのみである。

情報機器の入力インタフェースを想定すると、単純なボタン操作等のみならず文字入力のような複雑な入力が求められる。これに対して、キーボードもタッチパネルも使わない入力方法として、指で空中をなぞって文字入力する「空中手書き文字(Aerial Handwritten Character)入力」が提案されている。空中手書き文字は、通常の手書き文字と異なり、文字は切れ目ないジェスチャで書かれる。自然な空中手書き文字の実現のためには、余計なスイッチ等の導入や不自然な文字切り動作の付加をすることなく、自動で文字をセグメンテーションすることが必要である。この問題に対して、我々の研究室では、連続して書かれた空中手書き仮名文字を自動的に1文字ずつセグメンテーションする技術を開発している。

2. 研究の目的

(1) 空中手書き文字入力の概要

図1は、試作した空中手書き文字入力の実験システムの全景である。被験者の指の動きは、直下に配置された赤外線センサ(Leap Motion)で検出される。ディスプレイには、被験者の指先の動作軌跡が空中手書き文字として表示される。紙上の筆記と違って空中手書き文字にはペンを上げる動作が無く、文字は一筆書きに繋がった軌跡であり、文字と文字も切れ目なく入力されてしまう。スムーズな文字入力を達成するためには、連続した文字を切り離す必要がある。類似研究[1]-[5]では、文字の切れ目を示すために、スイッチや特別なジェスチャを導入している。しかし、自然なジェスチャ・インタフェースのためには、空中手書き文字の動作としては不自然な要素を加えず、自動的に文字分割が行われることが望ましい。図1の試作装置では、画面中央に空中手書き文字の筆記軌跡が表示され、文字が自動分割され、1文字が確定する度に右側の入力文字欄に移動する仕組みである。



図1 空中手書き文字入力試作装置

連続して書かれる空中手書き文字を分割(セグメンテーション)する手順を図2により説明する。図2は、「あい」と連続して書いた例で、「あ」を書き終わり「い」の1画目を書いている瞬間を示している。文字の全ての画が連続して書かれ、文字同士にも切れ目がないことがよく判る。以下の説明のために用語を定義しておく。文字の画とそれらを繋ぐ軌跡を「ストローク」と呼ぶ。このうち、文字を構成するストロークを「文字ストローク」、文字と文字を繋ぐストロークを「移動ストローク」と呼ぶ。

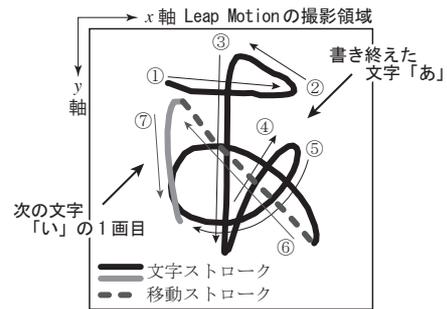


図2 空中手書き文字の例

提案する空中手書き文字の分割手法は、以下の2つの手順からなる。

- A. ストローク分割 : 筆記軌跡の性質を用いて連続した軌跡をストロークに分割する。
- B. ストローク判別(文字分割) : ストロークを文字ストロークか移動ストロークか判別することで文字を分割する。言い換えると、移動ストロークが発見された箇所が文字の分割点である。

(2) 文字分割

先行研究[6][7]では、空中に書かれた文字の筆記面上の2次元の筆記軌跡情報を用いて、上記 A、B の処理を行っていた。しかし、近年、センサの高性能化により指先の動作を3次元で精度良く検出できるようになってきた。これを受け、筆記軌跡を2次元データから3次元データに拡張することによりAHCのセグメンテーション精度を改善する手法を開発することが本研究の目的である。

3. 研究方法

(1) 従来ストローク判別の最適化^[8]

表1 ストローク判別の指標候補(2次元)

従来手法の指標		新たに加えた指標	
1)	筆記面の x 軸に対するストロークの角度	6)	1つ前のストロークの角度
2)	ストロークの長さ	7)	筆記面中心とストローク始点の距離
3)	筆記面中心に対するストローク始点の方向(角度)	8)	筆記面中心とストローク終点の距離
4)	筆記面中心に対するストローク終点の方向(角度)	9)	上記 7),8)の比率
5)	対象ストロークと次のストロークがなす角度		

※これらの指標候補は小規模な予備実験を繰り返し、多数の指標から選り出したものである

本研究の目的は先に述べた通りであるが、従来手法と3次元情報を用いた本研究の手法を公正に比較するために、まず従来手法の最適化(チューニング)を行った。従来手法では、ストローク判別に下記1)~5)の5つの指標を用いていたが、さらに6)~9)の4つの指標を加えた上で、ストローク判別の精度向上に資する指標の組み合わせを調べた。ストローク判別には、学習機械の一種であるサポートベクターマシン(SVM)を用いて最適な指標を選出するための実験を行った。

(2) 3次元情報を用いた空中手書き文字の分割^{[9][10]}

3(1)節で最適化した従来手法[2次元の6指標:表2 1)~6)]に対し、3次元空間上における3つの指標[表2 7)~9)]を加えて全ての指標の組み合わせについてSVMによるストローク判別実験を行い、最適な指標の組み合わせを調べるとともに、3次元の指標の有効性を検証した。

表2 ストローク判別の指標候補(2次元)

2次元の指標		3次元の指標	
1)	筆記面の x 軸に対するストロークの角度	7)	ストローク筆記中の奥行き方向の変化量
2)	ストロークの長さ	8)	ストロークの xz 平面での角度(偏角)
3)	筆記面中心に対するストローク始点の方向(角度)	9)	ストロークの仰角
4)	筆記面中心に対するストローク終点の方向(角度)		
5)	1つ前のストロークの角度		
6)	2つ前のストロークの角度		

※7~9)の指標候補は小規模な予備実験を繰り返し、多数の指標から選び出したものである

(3) リザーバ・コンピューティングを用いたストローク分割^[11]

4(2)節で述べるように、ストローク判別については空中手書き文字の3次元軌跡の情報を用いることで従来手法より優れた性能を示すことができた。しかし、ストローク分割については多数の予備実験にもかかわらず性能の向上の手がかりが掴めなかった。この点を改善するため、当初の研究計画を変更し、リザーバ・コンピューティングを導入したストローク分割手法を提案した。

リザーバ・コンピューティング(RC)は、図3に示すように何らかの力学系に入力を与え、その応答に重み係数を付与して出力層へ出力する。解決したい問題に対して、出力層への重み係数のみを学習する学習機械の一種である。本研究では、RCの中でも、力学系の部分をリカレント・ニューラルネットワーク(RNN)としたエコーステート・ネットワーク(ESN)を用いた。ESNでは、RNNの部分の接続重みは学習せず、出力層の重みのみを学習するため、ネットワークの規模に対して学習の計算量が少ないという利点を持っている。また、時系列信号の処理に向くと考えられている。

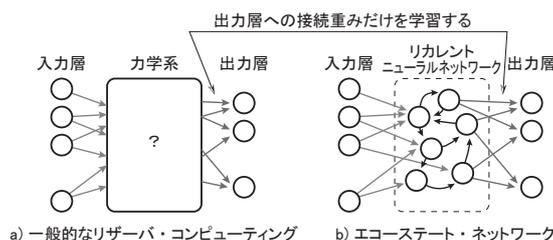


図3 リザーバ・コンピューティングの概念図

単純な発想として、ESNを用い、入力を空中手書き文字の軌跡データとし、ストローク分割の位置を出力するように学習させることも可能である。しかし、そのような方法では、1)学習のために膨大な正解データが必要であること、2)筆記者の癖等に影響を受けやすい可能性があることなどの欠点が予想される。これらを回避する方法として、以下の手法を提案した。

提案するストローク分割方法は以下の2段階からなる。

- I. 入力を軌跡データとし、出力を数点先の未来の軌跡データを予測するようにESNを学習する
- II. I.の予測誤差の各時点での大小からストロークの分割点を判定する

この手法のアイデアは、あるストロークの筆記中にはその軌跡に何らかの定常性があり未来予測がうまく働くが、ストロークの切れ目では非定常な状態となり未来予測の精度が落ち予測誤差が大きくなる傾向があるだろうというものである。提案手法では、ESNの学習の教師データは入力の軌跡データのタイミングを未来方向にずらしたただけのものである。従って、教師データを人間が苦勞して作成する必要はない。また、もし軌跡データに筆記者の書き癖が強く影響しており、筆記者毎にESNの学習を行う必要が生じた場合も対応が簡単である。

4. 研究成果

(1) 従来のストローク判別の最適化の結果

実験には、20代男性8名から得られた空中手書き文字の筆記データを用いた。日本語ひらがな46文字を3回に分けて筆記させたデータであり、理想的な場合、1被験者あたり移動ストローク344本、文字ストローク1432本となる。ただし、被験者の書きよどみ等もそのままデータとして用いたため、実際のストローク本数は被験者により異なる。

3(1)節で述べた9つの指標を1~9個含む全ての組み合わせ511通りについて評価実験を行った。評

価は、被験者7名分のデータを学習データとし残り1名分を評価データとして、SVM による学習結果を評価した。評価データとなる被験者を取り替えながら、8回実験を行い、判定精度を表すF値を求めた。その結果の上位18組を図4に示す。

ストローク判別の精度が最良となるのは、指標1, 2, 3, 4, 6の組み合わせの場合であり、先行研究の指標1, 2, 3, 4, 5の組み合わせより2%程度優れている。

また、詳細な検討により、指標6「過去のストロークの角度」が良い結果をもたらしていたため、さらに過去に遡り、指標 a, b として、もう1つ前、もう2つ前のストロークの角度を指標に加えて追加実験を行った。

追加実験の結果を図5に示す。上記で得られた最良の組み合わせにもう1つ前のストロークの角度を指標(a)として追加すると、さらに2%程度ストローク分割の精度を向上できる。しかし、もう2つ前のストロークの角度(b)を考慮しても、精度の向上は見られなかった。従って、2次元軌跡を用いる従来手法では、指標1, 2, 3, 4, 6, a の組み合わせを用いるのが最適である。

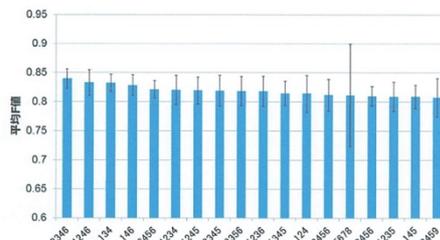


図4 有効な2次元指標の組み合わせ

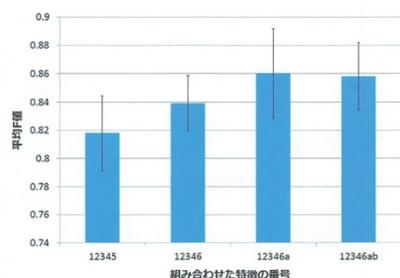


図5 過去のストローク角度の影響

(2) 3次元情報を用いた空中手書き文字の分割

実験には、20代男女6名から得られた空中手書き文字の筆記データを用いた。日本語ひらがな46文字が1回ずつ出現するように作成した5文字単語8つと6文字単語1つを含むセットを10種類準備し、各被験者には、ランダムに選んだ5セットを筆記させた。4(1)節の実験から筆記軌跡取得のプログラムが、2次元データ採取から3次元データ採取に変更になったのみならず、各種の改良が加えられているため2次元指標が4(1)節と同様に機能するか確認を行った。紙数の関係で詳細は省略するが、新たに収集したデータでも、4(1)節で得られた6つの指標の組み合わせが最良の結果を与えることを確認した。

4(1)節と同様な実験方法で、3次元指標を組み合わせた場合のストローク分割性能を評価した結果を表3に示す。

実験の結果、新たに加えた3次元の指標7, 8, 9を全て加えた組み合わせが最もストローク判別精度が高いことが示された。2次元の指標のみの場合は、組み合わせの順位で 59 位となり、それ以上の順位は何らかの形で3次元指標を含む組み合わせとなっている。

詳細な検証によると、指標8, 9を単体で加えてもストローク判別精度があがらず、指標7との組み合わせでF値を改善する効果が生まれることが示されている。これらの結果を総合して、ストローク判別においては、空中手書き文字の軌跡を3次元で分析することの有用性を示すことができた。

表3 3次元指標の評価結果(一部)

順位	特徴組合せ	F値	標準偏差
1	123456789	0.9316	0.0137
2	123789	0.9312	0.0107
3	1346789	0.9301	0.0184
4	1235678	0.9296	0.0109
5	12356789	0.9294	0.0165
(中略)			
59	123456	0.9187	0.0195

(3) リザーバ・コンピューティングを用いたストローク分割

① 評価実験の条件

3(3)節で述べた ESN を用いたストローク分割の可能性を検証した。ESN のネットワーク構造は自由度が高く、様々な構成を考慮することができる。本研究では、最も簡単な構成として、空中手書き文字の3次元軌跡の x, y, z 成分をそれぞれ独立に学習する3つの ESN を用いることとした。ESN による軌跡の未来予測は、予備実験を繰り返して 15 点先を予測するものとし、ESN に含まれる RNN のパラメータを表4の範囲で実験を行った。

② ストローク分割方法

ESN による空中手書き文字の軌跡予測の誤差は、様々な要因によって変動する。その中からストロークの切れ目を示す特徴を抽出するために、移動平均線を利用した。図6は、時々刻々変化する誤差の移動平均を取ったグラフである。青色の線は短い区間で移動平均を取った短時間移動平均を表し、オレンジ色の線は長い区間で移動平均を取った長時間移動平均を示している。図中で赤い矢印で示した短時間移動平均線(青)が長時間移動平均線(オレンジ)を追い抜く点は、元の誤差曲線が上昇トレンドに入った点とみなすことができる。この点をストロークの分割点の候補として抽出する。移動平均の長さは、短時間移動平均を3, 5, 7点、長時間移動平均を7, 9, 11, 21として実験を行った。

表4 RNN のパラメータ

p	0~1 : 0.1 刻み
g	0~1 : 0.1 刻み
α	0.5~10 : 0.5 刻み
ユニット数	100
結合次数	3

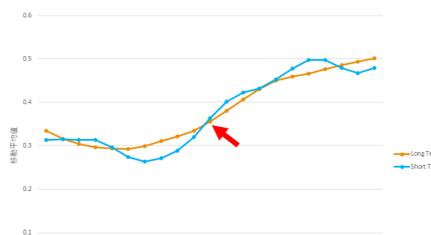


図6 誤差の移動平均線

③ 評価実験

実験には、4(2)節と同じ条件で収集した20代～60代の男女10名から採取した筆記データを用いた。実験の結果、ESNを用いた手法のみでは良い結果を得ることができなかったが、従来手法との組み合わせでストローク分割精度を向上することができた。図7に、短時間移動平均を3点、長時間移動平均を7点とした場合のストローク分割の適合率、再現率、F値を示す。

F値については、提案手法は従来手法と変わらない結果となっているが、再現率について大きな改善が見られる。再現率の高さは、ストロークの分割点の見落としが少ないことを示している。本手法は、分割されたストロークについて移動ストローク判別を行うという方法であるため、誤ってストロークを分割しすぎることにに対しては頑強であるが、ストロークの分割点の見落としは致命的である。従って、再現率が最大となる、速度条件とENSによる提案手法の組み合わせでストローク分割する方法が最も良いと言える。提案手法と筆記軌跡の速度条件を併用する方法により、従来手法に対して再現率を11%向上させることが出来た。本法では、ストローク分割の見落としは2.5%に抑えられている。

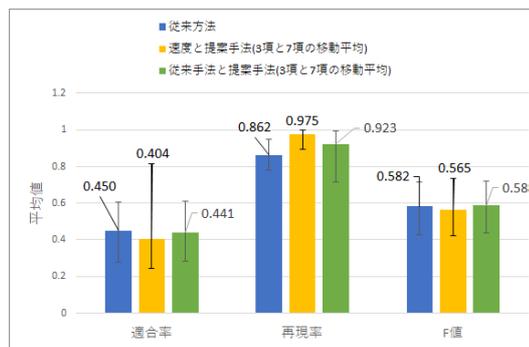


図7 ESNを用いたストローク分割の結果

(4) まとめ

研究計画では、空中手書き文字の3次元軌跡の情報を用いて文字分割の精度を向上させる手法の開発を目指していた。ストローク判別(文字分割)については、従来を2次元における手法を3次元に拡張する手法で改善できることを示せた。しかし、一方でストローク分割については、従来の手法の拡張ではうまくいかなかった。

これに対しては、研究計画にはなかった手法として、リザーバ・コンピューティングを導入したストローク分割手法を提案した。ESNに3次元の軌跡データを学習させ、その予測誤差の性質を利用してストローク分割を行うアイデアである。提案手法の可能性を評価するため、最も単純な構成のESNを使用してストローク分割実験を行った。その結果、従来手法との組み合わせにより、高い再現率を達成することができた。

先にも述べた通り、ESNを用いた新しいストローク分割手法の評価実験では、3次元の筆記軌跡の x, y, z 成分を個別に学習する最も単純なESNを使用している。これは、実験の簡便性を優先し、提案したアイデアの可能性を早く評価するための方策であった。しかし、一方でこの方法ではESNが3次元のそれぞれの成分の関係性を学習していないことは明らかである。今後は、より適切なESNの構造を検討し軌跡予測の精度を上げること、また、予測精度を向上させた場合にストローク分割にも良い影響を与えるかどうかを検証していく必要がある。また、現状では低く止まっている適合率の改善も目指したい。

参考文献

- [1] 片山喜規 他: 座標特徴と方向特徴の選択的利用に基づくオンライン文字認識HMM, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J91-D, No.8, pp.2112-2120(2008)
- [2] 中井満 他: 筆記の向きや筆記具の持ち方が自由な空中手書き文字認識, 第11回情報科学技術フォーラム講演論文集, H-031, 第3分冊, pp.185-186(2012).
- [3] 西村好宏 他: ビデオカメラを利用した空中非目視手書き文字入力方式, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2005-67, pp.119-124(2006)
- [4] 保呂毅 他: 複数カメラを用いた手書き文字認識システム, WISS2006, pp.121-122(2006)
- [5] 大倉充 他: 空中に指先で描かれた続け書き数字の認識アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.2, pp.910-916(2011)
- [6] 鈴木慶, 清水忠昭 他: 2文字連続筆記した平仮名空中手書き文字の分割法, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.9, pp.2235-2244(2014)
- [7] 重本賢太郎, 鈴木慶, 清水忠昭, 他: 入力文字数制限のない平仮名空中手書き文字の分割法, 報処理学会論文誌, Vol.57, No.5, pp.1514-1523, (2016.5)
- [8] 稲村天朗, 重本賢太郎, 清水忠昭, , "空中手書き文字の移動ストローク判定に有効な特徴量の調査," 第20回IEEE広島支部学生シンポジウム論文集, A2-8(pp.116-119), (2018)
- [9] 稲村天朗, 清水忠昭, "空中手書き文字の3次元軌跡からの移動ストローク判定," 電気・情報関連学会中国支部第69回連合大会講演論文集, R18-25-14, (2018)
- [10] 竹川峻平, 稲村天朗, 清水忠昭, "奥行き方向の軌跡を利用した平仮名空中手書き文字の分割法," 電気・情報関連学会中国支部第70回連合大会講演論文集, 19-26-01-05, (2019)
- [11] 田中雄大, 稲村天朗, 清水忠昭, "奥行き情報を用いたひらがな空中手書き文字分割手法の評価とストローク分割手法の提案," 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム論文集, B3-13, (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中雄大, 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 奥行き情報を用いたひらがな空中手書き文字分割手法の評価とストローク分割手法の提案
3. 学会等名 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川峻平, 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 奥行き方向の軌跡を利用した平仮名空中手書き文字の分割法
3. 学会等名 電気・情報関連学会中国支部第70回連合大会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 空中手書き文字の3次元軌跡からの移動ストローク判定
3. 学会等名 平成30年度(第69回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 空中手書き文字の移動ストローク判定に有効な特徴量の調査
3. 学会等名 The 20th IEEE Hiroshima Section Student Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 Leap Motionを用いた点字による文字入力システム
3. 学会等名 平成29年度(第68回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲村天朗, 清水忠昭
2. 発表標題 点字を元にしたジェスチャによる非接触文字入力システム
3. 学会等名 第19回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考