

タブレット型音響ペンによる筆移動呈示システム

中田 一紀^{*1} 小林 真^{*1} 村井 保之^{*2} 関田 巖^{*1} 巽 久行^{*1}

A Tablet-Type Acoustic Digital Pen that Presents Pen Stroke with Music Tone

Kazuki Nakada^{*1}, Makoto Kobayashi^{*1}, Yasuyuki Murai^{*2}, Iwao Sekita^{*1} and Hisayuki Tatsumi^{*1}

Abstract - In this study, we present a tablet-type acoustic digital pen that presents pen stroke in hand writing with music tone. An acoustic digital pen for the visually impaired has been previously proposed, and it is shown that the pen-tip position can be identified (sound localization) by continuously changing the volume and acoustic frequency in correspondence with pen stroke in space. In the tablet type acoustic digital pen, we change the musical scale in the horizontal direction and the octave in the vertical direction on the spatially discretized 2D grid. By enabling the grid to be adjusted to the desired size by the pinch in / out operation on the tablet touch screen, it can be expected to practice efficiently writing letters of various scales in a balanced manner. Furthermore, we make it easier to learn accents of Tome, Hane, Harai by changing music tone (frequency distortion) in accordance with the pen touch at feature points of characters, such as the start point, via point, end point of each pen stroke.

Keywords: Acoustic Digital Pen, Mobile Tablet Device, Acoustic Localization, Music Tone, Pen Stroke

1. はじめに

文字を書くことは、コミュニケーションにおける情報伝達的手段として重要である。美しい字で書かれた手紙は受け取る相手に気持ちを良くしたり、社会的な契約においては、本人の意志表示を確認し信頼性を保証したりするために直筆での署名を求められる。

視覚障がい者にとって、筆を使って文字を書くことは難しく、直筆で署名をするためには訓練を要する。欧米では、ラテン文字はストロークが連続的であり空間的に離れることがないため、一筆書きで筆記体を書くことが比較的容易にできる。それに対して、日本語では文字を書く際に、漢字、ひらがな、カタカナ、いずれの場合もストロークが離散的となり、字の画数に応じて空間的に離れた点（各ストロークの開始点と終端点）を定位することが必要になる。したがって、バランスの整った文字を書くためには、書字動作における空間定位（位置同定）を訓練することが必要になる。さらに、漢字の学習では、「とめ」、「はね」、「はらい」のように、漢字を構成する特徴点での書字動作の習得が重要である。特殊教育の現場では、特にその習得が重要な課題となっている^[1]。

これまでの研究において、筆の移動を音色で呈示する音響ペンが提案されている^[2]。視覚代行として、音色で筆の移動方向を確認しながら文字を書くためには訓練を要するものの、音色（ここでは音の周波数成分）を連続的に空間分布させることによって、位置同定や上下左右

の距離感覚を得られることが示されている。

本研究では、音響ペンのユーザビリティを高めるために、タブレット型インタフェースとしてゲーム機として普及しているニンテンドースイッチによるシステム実装を試みる。音色を連続的に空間分布させて任意の文字の軌跡を表現することは難しいため、文字の「かたち」に対応した音色を呈示するのではなく、書字動作における「空間定位」の正確性を高めることを目的とする。文字のバランスを整えるために、仮想的なマス目を音響的に呈示するための音響（定位）グリッドによって空間定位を補助する。それによって、字面の距離感覚を習得することを促進する。また、グリッドの大きさは書字の訓練においてその効果に強く影響することが示唆されている。そこで、音響グリッドのスケラビリティを得るために、タブレットデバイスのピンチイン／アウトの機能を活用する。さらに、任意の文字の筆跡の特徴点（開始点と経由点、終端点）とグリッドを重ね合わせることで、字面に相当する各ストロークの特徴点の位置同定を効果的に行えるようにする。応用として、特徴点と重ね合わせたグリッド上においてペンタッチの持続時間に応じて音色を変化させることで、「とめ」、「はね」、「はらい」のように、漢字を構成する特徴点での書字動作を習得しやすくなるような学習方法を提案する。

2. 関連研究

本研究に関連する従来研究として、多感覚を利用したさまざまな習字・書字動作の訓練手法の提案やそのための支援機器の開発が行われている。

2.1 視覚

視覚による書字訓練支援手法として、運筆の軌跡（方向ベクトル）の動的な可視化^[3]や運筆リズムの可視化^[4]

*1: 筑波技術大学保健科学部情報システム学科

*2: 日本薬科大学薬学部

*1: Department of Computer Sciences, Faculty of Health Sciences, Tsukuba University of Technology

*2: School of Pharmaceutical Sciences, Nihon Pharmaceutical University

が提案されている。このような視覚効果を利用した書字訓練手法は教育工学の分野で研究が進んでおり、ゲームの要素を取り入れた教材も提案されている^[5]。

2.2 触覚

視覚代行として触覚による書字訓練として、手のひらやレーズライタを使った手法が伝統的に行われている。レーズライタは特殊な紙に筆記すると、筆跡が隆起するものであり、指やペンでなぞり書きすることで触読する。レーズライタは繰り返し使うことができず、また書字動作中に動的に筆跡を確認することができないという問題がある。それら解決するために電子レーズライタが提案されており、教育現場からも高い評価を得ている^{[6][7]}。ただし、電子レーズライタは高コストであるため、一般には普及しにくいという現状がある。触覚ディスプレイによる墨字学習支援システムは教育現場での客観的評価もなされており、その効果も示されている^[8]。

2.3 力覚

力覚による書字訓練手法も提案されている。SPIDARによる遠隔書道教示システムでは、書字に熟練した教示者の運筆の力覚を学習者に伝えることで書字の上達を図っている^[9]。また、力覚デバイスである Phantom Omni を利用した運筆訓練システムでは、字画の距離感覚を段階的に学べるようになっており、バランスの良い文字を書けるようになる効果がある^[10]。

触覚による書字訓練では、お手本となる文字をなぞることで「能動的」に学ぶことができる。それに対して、力覚による書字訓練では「受動的」に学ぶことになる。最近、超音波振動パネルによって触覚フィードバックすることで、ひらがなの書字学習を支援するシステムが提案されている^[11]。このシステムでは超音波振動パネル(富士通製)をスマートフォンやタブレット端末に搭載し、書字訓練のためのアプリで呈示された文字をなぞり力覚的な触覚フィードバックを受ける。文字特有の「とめ」や「はらい」のように重要な特徴点で力覚に近い触感^[12]を与えるようになっており、学習意欲を向上する効果が示唆されている。しかし、超音波振動パネルはまだ特別なものであり、すぐに市販機器に搭載されることは期待できそうにない。

2.4 聴覚

聴覚による書字訓練の手法としては、先行研究で提案されている音響ペンはじめさまざまなものが提案されている^{[2][13][15][17]}。

書字動作における時間構造に着目した研究としては、書字の運筆動作の時間構造に注目し、運筆音を記録し、それをバーチャルに再現して呈示するシステムがある^[13]。書字に関する基礎的な研究において、字形の整齐さを身につけるためには、運筆のリズムを意識することの重要性が指摘されている^[14]。運筆リズムの可視化に相当する情報を教師データとして音響的に聴覚に呈示することで、

力覚と同様に、熟練者の習字の動作を追体験することができる。

書字動作における空間構造に着目した研究としては、書字動作における文字や図形の経路を音階によって1次元的に呈示する One Octave Scale Interface (OOSI) が提案されている^[15]。この提案では、グラフ的な経路の各経由点のトポロジカルなつながりに焦点を当てられたものであり、書字動作中の空間定位(位置同定)の感覚を培う目的には適していない。また、音像定位を利用した音響フィードバック法^[16]では、音像定位を利用して筆記する位置の情報を呈示するものとなっている。音像定位では、水平方向を両耳間レベル差、垂直方向を周波数差として16×16(後に100×100にまで拡張)の音像定位マップを構成し、それによって位置推定されている^[16]。音像定位マップによる書字訓練は、教育現場でも検証されており、その効果も評価されている^[17]。その結果、窓のサイズを変更した予備実験により、窓のサイズの大きさによって結果が大きく異なることが示唆されている。音響ペンの研究^[2]では、音響的マップに音色(周波数成分)の要素を取り入れた音響定位感マップが提案されている。予備的な評価により、水平方向を周波数、垂直方向を音量として構成した音響定位感マップにより、位置同定や上下左右の距離感覚を問題なく得られることが示されている。

3. システム概要

3.1 音響グリッド

提案する音響ペンのシステム構成について示す(図1)。ここでは、書字動作における1画ごとの開始点と終端点を正確に空間定位(位置同定)することを目的とした音響(定位)グリッドを考える。音響グリッドは、先行研究の結果に基づいて、2次元グリッドの水平方向を音階、垂直方向をオクターブとする(図2)。音響ペンの研究で提案された音響定位感マップでは、水平方向は周波数、垂直方向は音色(すなわち周波数成分)となっている。従来研究では、音像定位マップあるいは音響定位マップは、いずれのパラメータであっても連続的な空間分布とされていたが、ここでは罫線をイメージして、音が鳴らない境界領域をグリッド間に一定の幅設けて、離散的な空間分布となるようにする。周波数の変化も音階とすることで、より知覚しやすくなる効果を期待する。



図1 システム構成
Fig.1 System Configuration.

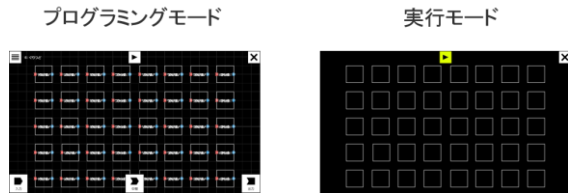


図2 音響定位グリッド
Fig.2 Acoustic Localization Grid.

3.2 ニンテンドースイッチへの実装

次に、3-2の音響グリッドをニンテンドースイッチに実装する。これまでに予備的な検証として、音響ペンのタブレット端末である Surface への対応が村井によってなされており、電子ペン（スタイラス）を使えることによるユーザビリティの向上が確認されている。本研究では、さらなる応用において、ユーザとなる学習者や教示者が音響グリッドを必要に応じて自由にカスタマイズしやすくするために、携帯型ゲーム機として普及しているニンテンドースイッチをプラットフォームとする。

ニンテンドースイッチには、ニンテンドーラボの Toy-Con ガレージにより、データフロープログラミング環境が提供されている。Toy-Con ガレージには主な機能モジュールとして、

- ・入力モジュール
「ボタン」、「タッチ」、「Joy-Con ふり」
- ・演算モジュール
「AND」、「NOT」、「カウンター」、「タイマー」
- ・出力モジュール

「音（ならず）」、「ひかる」、「しんどう（ふるえる）」が提供されており、それぞれオブジェクトとして自由にプログラミングに使用することができる^[18]。

音響グリッドの各グリッドは、タッチスクリーンへの接触を入力として検知する「タッチ」モジュール、入力により位置に対応した音階・オクターブの音を奏でる「音」モジュール、さらに学習者がタッチスクリーンのどの位置にペン先を接触させているか教示者に伝えるための「ひかる」モジュールから構成される（図3）。このグリッドを2次元アレイ状に配置して音響グリッドを構成する（図2）。水平方向には左から右に向かってド・レ・ミ・ファ・ソ・ラ・シ・ド（CDEFGABC）の音階とし、垂直方向にはオクターブの高さを対応させて、周波数的には対数スケールになるようにしている。ここでは、8×5の音響グリッドを構成する。ここでは、このように音階とオクターブに対応させているが、本来の音響ペンのように、縦軸には音色（周波数成分）を導入できるように拡張することができる。標準では「音」モジュールは、ピアノとオルガン、ギター（3種類）、ねこ、おねえさん、

たろうさん、こうかおん（2種類）の音色を選べるようになっており、音を伸ばす時間を調整することで、音色を変化させることもできる。

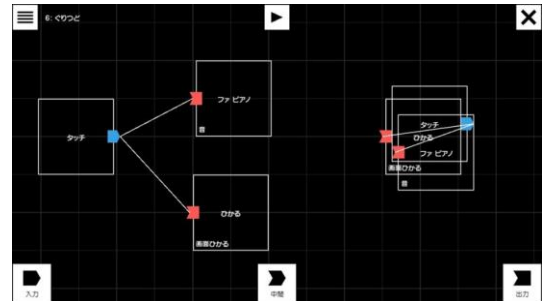


図3 音響グリッドの各グリッドの構成。
Fig.3 Configuration of Each Grid.

4. 機能検証

4.1 音響定位

はじめに、音響グリッドのタッチした位置に対応した音が奏でられるか確認する（図4）。まず、音階のどの音が鳴っているか弁別することで水平方向のどの位置にいるか確認できる。また、オクターブ、すなわち音の高さから垂直方向のどの位置にいるか確認することができる。電子ペンでタッチスクリーンに筆記する場合は連続的なペンタッチ入力（なぞる操作）になるため、相対音感さえあれば、どの音がなっていてどの位置にペン先があるか弁別することは難しくない。

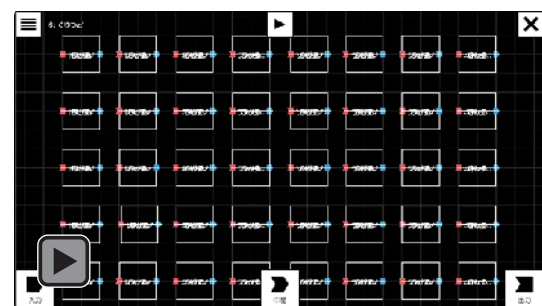


図4 音響グリッドの動作。
Fig.4 Fundamental Operation of Acoustic Localization Grid.

4.2 拡大・縮小

次に、練習したい文字のスケールに合ったグリッドの大きさに調整できることを示す。ニンテンドーラボの Toy-Con ガレージのプログラミング環境では、「タッチ」のオブジェクトは任意の長方形（1辺5mm～50mm）に調整できるため、最小の5mm×5mmの正方形にグリッドを設定すると、タッチスクリーンのピンチイン／アウトの操作により、画面上の表示サイズを5mm×5mmから40mm×40mmまで自由に連続的に拡大・縮小できる。音響

的に書字訓練を補助する研究ではスケールを変化させると評価に大きく影響することが示唆されており、学習者がそのときの学習に適したサイズのグリッドにユーザ（学習者・教示者）自身で自由に調整できることは重要な機能の1つとなる。たとえば、予め学習者に平均的な文字枠を書いてもらい、その大きさに教示者が合わせるようにすることができる。

4.3 文字の特徴点の確認

さらに、学習したい文字のフォントを透明なフィルムに印刷し、タッチスクリーンに重ね合わせ、その経由点に対応する音響グリッドを配置する応用を考える。図5のように、学習したい文字の特徴点（とめ・はね・はらいに対応）のみにグリッドを配置して、それらの特徴点を通るように、繰り返し書字の練習を行うことができる。関連研究では、文字バランスを培う訓練において、「実環境に近い学習環境」と「補助からの離脱」の学習要素に着目しており、段階的にお手本のある状態からない状態へと学習を進めていくことの重要性が示唆されている^[9]。2次元の音響グリッドから特徴点のみのグリッドに移行することで、学習効果の向上を図りたい。



図5 文字の特徴点の確認。

練習したい文字の特徴点（各ストロークの開始点、経由点、終端点）にグリッドを配置し、書字動作における位置同定を補助する。

Fig.5 Acoustic Localization of Character Feature Points.

図6のように、漢字を構成する書記素のテンプレート型紙としてタッチスクリーンに重ね合わせてその特徴点にグリッドを配置することで音響的に学習を補助することもできる。



図6 漢字を構成する書記素の書字動作の練習。

漢字の「とめ」、「はね」、「はらい」の位置を音響的に呈示し、学習の補助とする。

Fig.6 Learning of accents of Tome, Hane, Harai using grapheme.

4.4 音色の変化

特殊教育では、漢字の書字学習において、「とめ」、「はね」、「はらい」のように、漢字を構成する特徴点での書

字動作の習得が重要な課題となっている。小学3学年配当の漢字からその課題が顕著となっており、書字学習に顕く要因のひとつとなっている。そこで、運筆リズムの可視化と同様に、「とめ」、「はね」、「はらい」の書字動作の学習を補助するために、音色の変化（周波数変調）により運筆リズムがわかるようにグリッドにその機能を追加する。「音」のモジュールには、アナログ入力に応じて周波数変化するオプションがあり、それを使いグリッドでのペンタッチの持続時間に応じて周波数変調するようにグリッドを構成した（図7）。お手本として熟練者の書字動作を「聴いて」、それを学習者自身で再現するように繰り返し練習する課題に応用することができる。

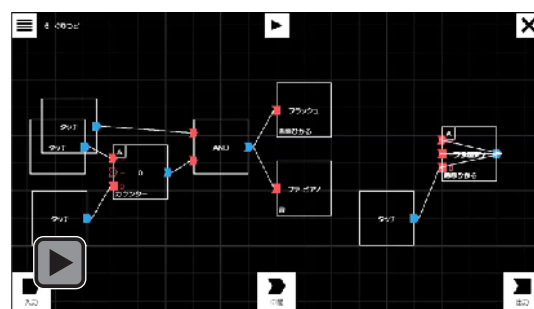


図7 書字動作における「とめ」、「はね」、「はらい」のアクセントを周波数変化に変換して音響的に提示するためのモジュール構成。

Fig.7 Configuration of Frequency Distortion Module.

5. まとめ

本研究では、書字動作における筆移動を音色で呈示するタブレット型音響ペンを提案した。提案した音響ペンでは、視覚障がい者による書字動作の支援を目的として、筆跡の位置を認識し書字を練習することができるようなシステム構成とした。音響グリッドを構成し、その水平方向を音階、垂直方向をオクターブで表し、書字動作における位置同定の補助となるようにしている。罫線に相当する音響グリッドのスケラビリティを得るために、タッチスクリーンの拡大・縮小の機能を活用している。また、書字動作の学習プロセスにおいて重要となる要素に着目し、文字の特徴点の位置同定を培うための段階的な学習法を提案した。さらに「とめ」、「はね」、「はらい」のような特徴点での書字動作特有のリズムを学習するために、グリッドに音色の変化の機能を追加した。

今後の課題として、提案システムの客観的評価とともに、よりユーザビリティを高める工夫を重ねていく予定である。たとえば、ゲーム的な要素を追加し学習意欲を向上するようなシステムとしたい。また、レーズライタをタッチスクリーンに重ね合わせても感圧されることに着目して、聴覚と触覚のクロスモーダル効果を活かしたシステムを開発中であり、それについてはあらためての機会に報告したい。

参考文献

- [1] <http://www.nise.go.jp/cms/7,8615,32,142.html>
- [2] 巽久行, 村井保之, 関田巖, 宮川正弘: 視覚障害者のための音響ペンの提案, 情報科学技術フォーラム, K-053 (2016).
- [3] 魏 若愚: 動的な手本提示による習字支援システム, 北海道大学 大学院情報科学研究科 平成 23 年度修士論文 (2012).
- [4] 浦正広, 遠藤守, 山田雅之, 宮崎慎也, 安田孝美: スマートフォンに向けた運筆リズムの可視化とペン習字アプリへの応用, 研究報告デジタルコンテンツクリエーション, Vol.2013, No.9, pp.1-6 (2013).
- [5] <https://www.nintendo.co.jp/ds/avmj/>
- [6] 渡辺哲也, 小林真: 視覚障害者用電子レーズライトの試作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.87-94 (2002).
- [7] 小林真, 渡辺哲也: 触覚ディスプレイを用いた電子レーズライトの盲教育利用, 電子情報通信学会技術研究報告, 教育工学研究会, Vol.100, No.600, pp.1-6 (2001).
- [8] 松本多恵, 伊奈諭, 高田雅美, 城和貴: 視覚障害者のための墨字学習支援システムの開発と評価, 研究報告数理モデル化と問題解決研究会, Vol.2012, No.1, pp.1-6. (2012).
- [9] 佐久間正泰, 正守晋, 原田哲也, 平田幸広, 佐藤誠: SPIDAR による遠隔書道教示システム, 電子情報通信学会技術研究報告, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol.99, No.363, pp.27-32 (1999).
- [10] 村井保之, 巽久行, 宮川正弘: 力覚デバイスを用いた視覚障がい者運筆訓練システム, 電子情報通信学会技術研究報告, 教育工学研究会, Vol.109, No.387, pp.37-42 (2010).
- [11] 佐藤 綱祐, 陽奥 幸宏, 杉妻 謙, 坂井 聡, 水野 義博: ひらがな書字学習における触覚化支援手法, 情報処理学会インタラクション 2018, 2B40 (2018).
- [12] Henmi, K., Yoshikawa, T.: Virtual Lesson and its Application to Virtual Calligraphy System, In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1275-1280 (1998).
- [13] 土屋喬, 小宮山撰, 武藤剛: 聴き書字: バーチャル運筆音によるペン習字支援, 情報処理学会インタラクション 2009, 0132 (2009).
- [14] 押木秀樹, 清水陽一郎: 書字における書きやすさの重要性和書字動作に関する基礎的研究, 書写書道教育研究, Vol.21, pp.48-57 (2007).
- [15] Yairi, I. E., Azuma, Y., and Takano, M: The One Octave Scale Interface for Graphical Representation for Visually Impaired People, In Proc. Int. ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, pp.255-256 (2014).
- [16] 伊東一典: 聴覚の空間知覚と音像定位を利用した盲人用筆記支援システム, 第 5 回センシングシステム技術研究講演会論文集, pp.17-20 (1989).
- [17] 伊藤史人, 今井啓二, 仁科恵美子, 工藤滋: 音声フィードバックによる描画改善手法の評価, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, Vol.2012, No.2, pp.1-4 (2012).
- [18] <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/index.html>
野波淳里, 竹川佳成: 臨書初級者のための文字パランス学習支援システムの提案, 研究報告エンタテインメントコンピューティング, Vol.2014, No.16, pp.1-6 (2014).