

手書き文字練習における筆圧に応じた フィードバック手法の比較検証：音提示と色提示の比較

會田 萌々花[†] 鳩貝 怜央[†] 渡邊 健斗[†] 松田 さゆり[†] 中村 聡史[†]
掛 晃幸^{††}

[†] 明治大学総合数理学部 〒164-8525 東京都中野区中野 4-21-1

^{††} 株式会社ワコム 〒349-1148 埼玉県加須市豊野台 2-510-1

E-mail: [†]momoflower0327@gmail.com

あらまし 文字を覚えたり、美しい文字を習得したりする方法として、繰り返し書いて練習することが一般的である。しかし、この練習方法は単純作業で退屈に感じやすい。我々はこうした文字練習を楽しく、効果的なものにするために、手書きストロークに応じてメロディが鳴る手法を提案し、実装してきた。これまでの研究からシステムを用いた文字練習において、練習回数が増えることや、筆記速度が遅くなることが明らかになった。そこで本研究では、より良い文字練習のため筆圧に着目し、筆圧に連動して音や色のフィードバックを行う手法を提案し、実験によりその効果を検証した。実験の結果、筆圧に応じた音提示や色提示によって筆圧の分布幅が広がることや、教示する筆圧に類似すること、また音提示が色提示に比べ記憶に残りやすいことが明らかになった。

キーワード 手書き練習, 筆圧, 音提示, 色提示, 可視化, 可聴化

Comparative Evaluation of Pen Pressure Feedback Methods in Handwriting Practice: Sound vs. Color Feedback

Momoka AITA[†], Reo HATOGAI[†], Kento WATANABE[†], Sayuri MATSUDA[†],

Satoshi NAKAMURA[†], and Akiyuki KAKE^{††}

[†] Meiji University Nakano 4-21-1, Nakano-ku, Tokyo, 164-8525 Japan

^{††} Wacom Co., Ltd. Toyonodai 2-510-1, Kazo-shi, 349-1148 Japan

E-mail: [†]momoflower0327@gmail.com

Abstract A common method for learning and acquiring beautiful letters is practicing by writing repeatedly. However, this practice method is simple and tends to be boring. We have proposed and implemented a method in which melodies play in response to handwriting strokes to make such practice fun and effective. Our previous studies have shown that practicing with the system increases the number of practice strokes and reduces writing speed. In this study, we improved the method by providing feedback based on pen pressure, which has not been focused on before, for better handwriting practice and verified its effects through experiments. The experimental results showed that the range of pen pressure increased by the sound and color feedback based on pen pressure and that the distribution became similar to that of the pen pressure model.

Key words Handwriting Practice, Pen Pressure, Sound Feedback, Color Feedback, Visualization, Sonification

1. はじめに

2024年現在においても各種契約書やサインなど、様々な場面において手書きをする機会が存在する。2015年に実施された文化庁の調査によると普段の生活の中で手書きをする機会があると感じている人は7割以上存在し、文字を手書きする習慣は

大切にすべきだと考える人は9割を超えている [1]。

ここで、日本では文字練習が小学校から始まり、その練習方法はノートに書き写すことや音読をすることなど様々な存在する。児童の漢字学習の方法に関するアンケート [2] によると、すべての学年においてノートに繰り返し文字を書いて覚える方法が

実施されている。この繰り返し文字を書く練習方法は、効果的であると同時に退屈に感じやすく、高学年の児童ほど漢字の学習を嫌いになっていく傾向が明らかになっている。

我々はこれまでの研究において、繰り返しの文字練習を楽しく効果的なものにするために、手書き軌跡に応じてメロディが鳴る手書き文字練習システム「メロ字ィ」を提案してきた。システムを用いた実験により、iPadにおいてメロ字ィを使用した実験協力者の練習回数が増えること [3] や、文字練習を丁寧に行うようになるという結果が得られた [4]。ここで、文字練習の際に注意を払うべきトメ、ハネ、ハライを適切に行うには筆圧への意識が重要となるが、これまでのシステムでは筆圧を意識した文字練習を支援できていなかった。

そこで本研究では、文字練習をより効果的なものにするため、筆圧に応じたフィードバックを与えるようにシステムを改良する。本研究ではフィードバックの提示方法として筆圧に応じて鳴るメロディの数が変化する音提示手法と、筆圧に応じて手書きストロークの表示色が変わる色提示手法を提案し、システムを用いてそれぞれの提示手法の有用性を検証する。提案手法により筆圧を意識した文字練習が期待できる。

2. 関連研究

2.1 手書き文字練習支援

これまでも様々な手書き文字の文字練習システムが提案されている。

中村ら [5] は、インタフェース上に入力した文章と書く対象の大きさから、最適な文字位置と大きさを計算し、プロジェクトでお手本画像を重畳するように投影するシステムを提案している。システムを用いた実験で、ユーザは書いた文字に対して高い自己評価をするだけでなく、自分らしい文字が書けることを明らかにした。久保田ら [6] は、モチベーションを高めつつ書写技能を向上させるため、ユーザの手書き文字をお手本の文字と融合することで、文字を美化して提示するシステム Mojivator を提案している。システムを用いた実験で、ユーザの手書き文字練習におけるモチベーションを高めることを確認した。

我々の研究も同様に、システムを用いてユーザ自身の意欲を高めつつ、文字練習を行えるようにするものである。

2.2 音階を用いた支援

人の行動に対して音階のフィードバックを行うことで支援を行う研究も様々なされている。

木村 [7] は、末梢神経障害や脳血管障害などの感覚障害を患った患者が正常な歩行を再学習するための聴覚フィードバックシステムを開発している。踵のみを踏むと「ド」、踵と母趾球を踏むと「レ」、母趾球のみを踏むと「ミ」が鳴るシステムである。システムを用いた実験で、進行方向をみながら歩くことができるようになったことを明らかにしている。前川ら [8] は、視覚障害者が色模様の面の中で色がどのように変化するかを認識するために、色の変化を音の変化でリアルタイムに提示するシステムを提案している。事前に色の RGB と音階を心理的属性に考慮してマッピングしておくことで色の変化を音の変化として提示する。実際に患者に協力してもらった実験で、縞模様と

グラデーションを高い精度で識別することが可能で、音から色を特定することが可能な場合もあったと述べている。Matsuda ら [9] は、運転においてハンドルの修正舵を減らすことを目的として、ハンドルの操舵角に応じて音階を鳴らす手法を提案している。実験により、音階の提示が修正舵を減らすことを明らかにしている。Berghe ら [10] は、ランニング中の脛骨ショックを減少させることを目的とし、音楽が聞きやすくなるシステムを提案している。実験の結果、バイオフィードバックを用いたランニングで脛骨ショックが減少し、ランニングのインパクト低減に有効であることが明らかになった。Lorenzoni ら [11] は、デットリフトの技術を向上させるために、正しい動きの場合は正解の音楽が鳴り、不適切な場合は不協和音が生じるシステムを提案し、経験豊富なトレーナーのフィードバックによる効果と有意差がなく、音声フィードバックが動作の改善につながる事が明らかになった。Yoo ら [12] は、初心者ゴルファーのスキル向上を目的とし、正しい動作には 1 回、間違った動作には 2 回タグ音を鳴らすシステムを提案している。実験の結果、音声フィードバックが初心者のゴルフスキルの向上に有効であることが明らかになった。大石ら [13] は、エキセントリックトレーニングの効果を最大化することを目的とし、トレーニング動作に連動した効果音を提示する聴覚フィードバック手法を提案した。実験の結果、チャージ音を提示することで、安定した動作速度で継続してトレーニングできることが明らかになり、トレーニングにおけるモチベーションの維持や向上に繋がる可能性も示唆された。

このように音階を用いて音楽とは異なる技術の支援を行う研究は様々行われている。本研究では、音階を用いて文字練習を支援する。

2.3 視聴覚で文字練習を支援する研究

文字を書くときの動作と音を組み合わせた研究も様々行われている。

中川ら [14] は、エクスカキバーという、ストロークを点、直線、曲線に分類し、それぞれにゲームの要素を取り入れたビジュアルサウンドエフェクトを付与する文字練習システムを提案している。実験の結果、システムがポジティブな感情を生起させ、筆記学習の負荷を軽減させられることを明らかにしている。牟田ら [15] は、「トメ」、「ハネ」、「ハライ」の終筆動作がなされたことを筆記音からリアルタイムに識別し、それぞれの終筆動作に対応した効果音を再生する文鎮型デバイス「i 文鎮」を提案している。ここでは、終筆動作の認識に関する実験はなされているが、実際に使用する実験については行われていない。Anderson ら [16] は、タブレット上での筆記において視覚と聴覚からフィードバックを付与することによって、より直線に近い線を書くことができることを明らかにしている。

このように、筆記行動への音を用いたフィードバックにより学習支援をする研究は様々なされている。我々の研究は、文字を書いているペンの位置や筆圧に応じた音階の音提示によって文字練習を支援するものである。

2.4 筆圧と学習効果に関する研究

筆圧に関する研究も様々なされている。浅井ら [17] は、学習

者のつまづき検出は、苦手分野の特定に重要だが従来の方法では詳細なつまづき箇所を検出することが難しいと述べている。そこで、筆圧、筆記速度などのデータを解析し、つまづきと手書きデータの関係を明らかにすることで、さまざまな教育場面で有用性があるのではないかと述べている。小林ら[18]は、タブレットを使用した手書き入力では、筆圧に応じてユーザが書いた線の濃淡が変化する場合、変化しない場合と比較して、割り算問題の正答率が高くなることや解答時間が短縮されることを明らかにしている。また、宮崎ら[19]も図形問題を題材とした実験を実施し、同様の結果を確認している。荒井ら[20]は、お手本の文字とユーザが書いた文字それぞれの筆圧を取得することで、その差分を提示する手書き文字支援システムを提案している。システムを用いることで、ユーザ自身が筆圧を意識した文字練習を行えるだけでなく、第三者視点においても筆圧の把握が可能となり、教育現場での指導においても有効である可能性が述べられている。

我々の研究では、筆圧を音提示や色提示によってリアルタイムにフィードバックすることで筆圧を意識した文字練習を支援する。

3. 筆圧を考慮した練習のためのフィードバック手法

我々がこれまで提案してきたシステムは、お手本の文字をなぞる際に、お手本から一定以上離れて書くと音が鳴らなくなる仕組みであった。これは、メロディの鳴り方を制御することで丁寧な文字練習を促し、お手本に近い文字を習得することを目的としていた。実験を行った結果、メロディが鳴る範囲を限定することで、常に音が鳴るように丁寧に文字をなぞり、筆記速度が遅くなることや、お手本と手書きストロークのユークリッド距離が短くなることが明らかとなった。本研究では、より丁寧な文字練習を行ってもらうために筆圧への意識を促すためのシステムを提案する。ここで、筆圧の提示手法としては下記の手法を提案する。

- **筆圧に応じた音提示手法**：筆圧に応じて鳴るメロディの数と音量を変化させることで筆圧を可聴化する(図1)。筆圧が弱いと一音が鳴り、中間だと二音、筆圧が強いと三音が同時に鳴る。メロディの組み合わせについては、Cメジャースケールのダイアトニックコードの中で従来の音提示手法の音を含むメジャーコードを選択した(図2)。
- **筆圧に応じた色提示手法**：色相の値を1つ指定することで連続的に色が変化するHSLカラーモデルを使用し、筆圧に応じて色相を緑から赤へと変化させることで筆圧を可視化する(図3)。筆圧が弱いと手書きストロークが緑で表示され、筆圧が強いと赤で表示される(図4)。

これらの手法による文字練習中の筆圧のフィードバックが、筆圧を意識した丁寧な文字練習を促すと期待される。

本システムはWebアプリケーションフレームワークのNuxt.jsをフロントエンド、Go言語をバックエンドとし、データベース



図1 音提示群の文字練習画面

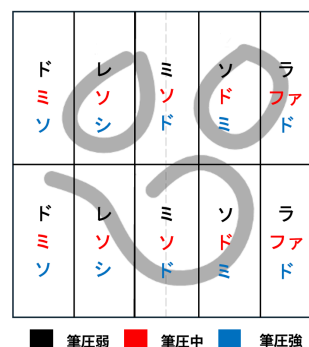


図2 音提示群の使用音階



図3 色提示群の文字練習画面

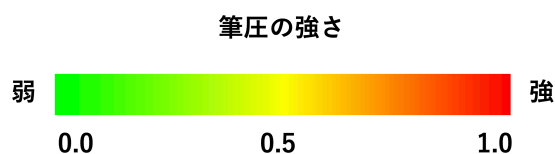


図4 筆圧に応じた色変化

スにはMySQLを使用して実装した。

4. 実験

4.1 実験概要

本実験では「筆圧に応じた音提示や色提示によって丁寧かつ筆圧を意識した文字練習になり、視覚的に認識が容易な色提示手法の方が筆圧の再現ができる」という仮説を立て、その検証

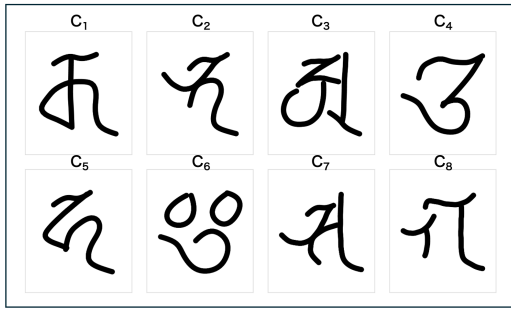


図5 実験対象とした8文字

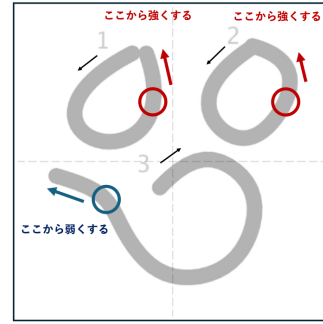


図7 筆圧のお手本

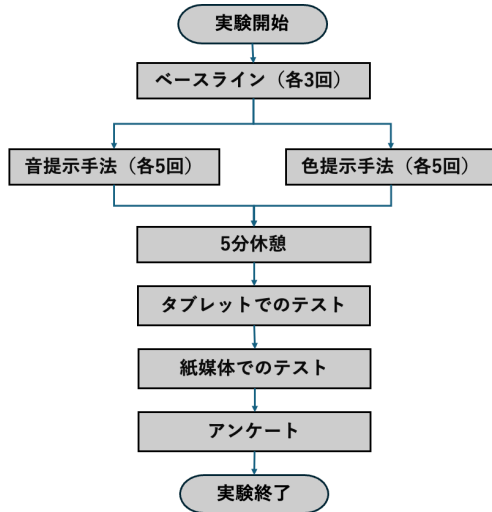


図6 実験の流れ

を行う。ここで、文字の各部分や筆順に注意を払うと筆記速度が遅くなると考えたため、丁寧な文字練習の評価指標の1つとして筆記速度を用いる。また、筆圧に応じた音提示や色提示を行うことが筆記速度へ与える影響を調査する際、普段から書き慣れた文字を使用してしまうと、既に習得した書き方やリズムに基づく影響を受ける可能性が高い。このことから、実験協力者には書き慣れていない文字を練習してもらう必要がある。そこで本実験では日本人にとって馴染みのない「梵字」から8文字(図5)を、実験用の文字として選定した。

4.2 実験手順

実験では筆圧に応じて音提示を行う音提示群、筆圧に応じて色提示を行う色提示群の2つの群に分けて以下の手順で実験を行った(図6)。

筆圧に応じた音提示や色提示が筆記速度と筆圧への意識などの筆記行動に及ぼす影響を調査するため、システムを用いた文字練習を行う前に、筆圧に応じたフィードバックを行わず、もともとのメロディも提示しない状態で文字を書いてもらった(以下、ベースライン)。その際、筆記のブレがあることを考慮し、梵字8文字について各3回ずつ文字練習を行った。その後、実験協力者を音提示群と色提示群に分け、各群に応じた手法で梵字8文字について各5回ずつ文字練習を行ってもらった。文字練習を行う際には、ベースラインと、システムを用いた練習とともに筆圧のお手本を示した(図7)。筆圧のお手本には筆圧の

強弱について特に注意すべき箇所を示しており、これを再現するように文字練習を行ってもらった。

システムを用いた文字練習後、5分間の休憩を挟み、筆圧のお手本を回収した状態で筆圧に関する2種類のテストを行った。はじめのテストでは、ベースラインと同様に筆圧に応じたフィードバックや従来のメロディ提示を行わない状態で各1回ずつ、筆圧を再現して文字を書いてもらった。ここで、提示される梵字8文字の順番はランダムで、提示されたものから書いてもらう形とした。次にお手本で与えられていた注意すべき筆圧の箇所に印をつけてもらうテストを紙媒体で行った。

さらに、実験後にはアンケートを実施し、筆圧を意識した文字練習ができたか、文字練習が楽しかったか、今後もシステムを使いたいと思ったかについて選択式および自由記述式で回答を求めた。

実験は、Wacom One 液晶ペンタブレット12を用いて実施した。実験協力者は大学生30名(男性6名、女性24名)であり、各群それぞれ15名ずつに分けて実験を行った。本実験では各実験協力者に8文字について、ベースラインで3回、提示手法で5回、テストで1回ずつの計72回書いてもらった。このデータの中で、第一四分位数と第三四分位数から求められる四分位範囲(以下、IQR)を用い、第一四分位数 $-1.5 \times IQR$ より小さいまたは第三四分位数 $+1.5 \times IQR$ より大きいデータを外れ値とみなして分析から除外した。

5. 結果

5.1 筆記速度

筆圧に応じたフィードバックが文字を書く速度に及ぼす影響を検証するため、筆記速度について分析を行った。図8は、各群のベースラインとの比較における平均筆記速度の変動率を箱ひげ図で示したものである。変動率は各実験協力者について、ベースラインの平均筆記速度と各提示手法の平均筆記速度の差を、ベースラインの平均筆記速度で割った結果をパーセンテージで表している。縦軸の値が小さいほどベースラインに比べ筆記速度が遅くなっていることを示し、値が大きいほど筆記速度が速くなっていることを示す。図より、音提示によるフィードバックを与えた音提示群の筆記速度の変動率の平均は-7.79%で、色提示によるフィードバックを与えた色提示群の筆記速度の変動率の平均は+4.20%であり、音提示群の方が遅くなっていた。ここで図9は、各群の各段階における平均筆記速度を箱

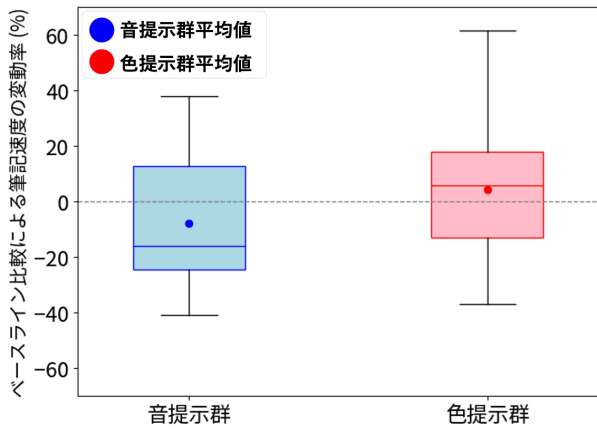


図 8 ベースラインとの比較による筆記速度の変動率

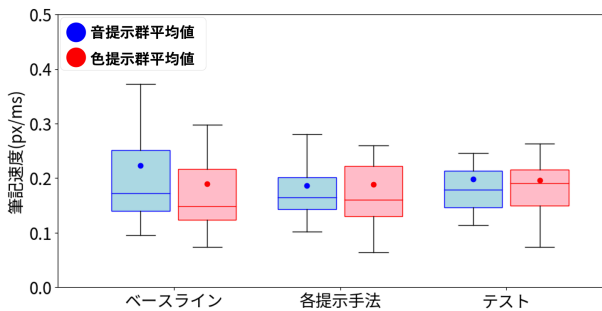


図 9 各群の各段階における平均筆記速度

ひげ図で示したものである。箱ひげ図は左からベースライン、各提示手法、テストの順に各段階における平均筆記速度を示し、図の縦軸は 1 ミリ秒あたりに書いたピクセル数を示している。図 9 より、音提示手法の方が色提示手法に比べベースラインの筆記速度が速いことがわかる。このベースラインの筆記速度の違いが、図 8 の実験結果に影響を及ぼした可能性がある。

5.2 筆圧分布

筆圧に応じたフィードバックが文字練習における筆圧への意識に及ぼす影響を検証するため、筆圧に関する分析を行った。図 10 は、音提示と色提示手法における筆圧値の分布を箱ひげ図で示したものである。筆圧は 0.0 から 1.0 の間の値をとり、値が大きいくほど筆圧が強く、値が小さいほど筆圧が弱いことを示す。ここでは各実験協力者ごとの筆圧の分布幅の平均をとり、これを全実験協力者で平均した箱ひげ図を示している。音提示群と色提示群の筆圧の分布幅の広がり进行比较すると、音提示群の広がりが大きいことがわかる。各実験協力者ごとの筆圧の分布幅を比較しても概ね同様の結果となった。

図 11 は、各群の実験段階における筆圧値の分布を箱ひげ図で示したものである。箱ひげ図は左からベースライン、各提示手法、テストの順に各段階における筆圧の分布幅を示し、縦軸は筆圧の値を示している。この結果より、音提示手法はベースラインと比較して筆圧が弱くなる方向に分布幅が広がっていることがわかる。また、音提示手法とテストにおける筆圧の分布幅を比較すると、テスト段階において筆圧の分布幅の広がりが小さくなったことがわかる。音提示群において、有意水準 5% の一元配置分散分析を実施した結果、両群ともにベースライン、

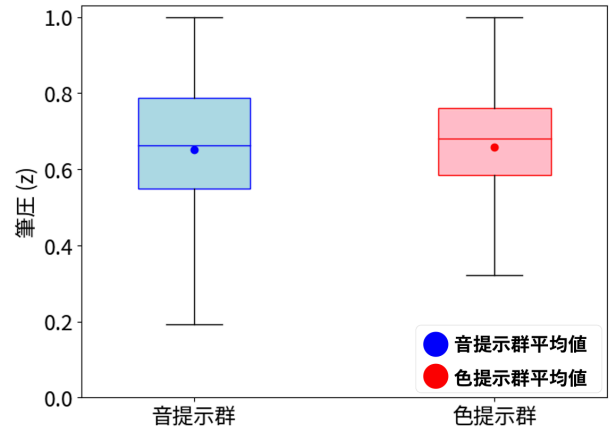


図 10 各群における筆圧の分布幅の比較

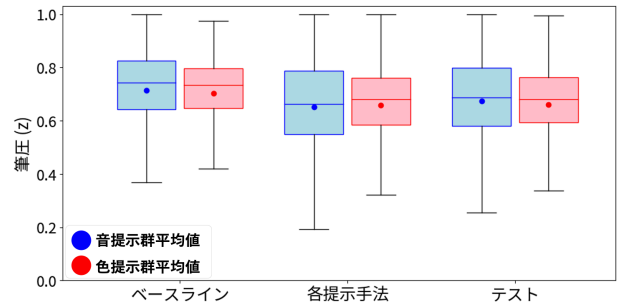


図 11 各群の各段階における筆圧の分布幅の比較

表 1 各群における適合率、再現率、F 値の平均値

群	適合率	再現率	F 値
音提示	0.938	0.905	0.914
色提示	0.910	0.897	0.891

各提示手法、テストの条件間で有意差がみられた。一方、音提示群と色提示群で比較すると有意差はみられなかった。

5.3 テスト結果

筆圧に応じたフィードバックが筆圧への意識に及ぼす影響を検証するため、紙媒体のテストの結果に関する分析を行った。また分析では、平均から $\pm 2SD$ 離れたデータについては外れ値として除外した。

表 1 は、各手法群における適合率、再現率、F 値それぞれの平均値を示す。また、表 2 と表 3 は、それぞれ音提示群と色提示群における文字ごとの適合率、再現率、F 値を示す。文字練習では、図 7 で示したような各文字について筆圧の強弱における注意すべき箇所について、正しく覚えていることを正解とした。適合率は、注意すべき箇所だと実験協力者が記憶できていた箇所が、実際に注意すべき箇所であった割合である。また再現率は、実際に注意すべき箇所、注意すべき箇所として実験協力者が記憶できていた割合（網羅率）を示している。F 値は適合率と再現率の調和平均を示す。なお、各文字は図 5 に示す梵字と対応している。表 1 より、音提示群の方が、色提示群に比べ、すべての指標において優れた結果となっていることがわかる。

表 2 より音提示群では、各文字の適合率は 0.821 から 1.000

表 2 音提示群における文字ごとの適合率, 再現率, F 値

文字	適合率	再現率	F 値
C ₁	0.964	0.929	0.940
C ₂	0.964	0.833	0.886
C ₃	0.821	0.929	0.864
C ₄	0.964	0.929	0.940
C ₅	0.929	0.893	0.905
C ₆	1.000	1.000	1.000
C ₇	0.964	0.833	0.886
C ₈	0.893	0.893	0.893
平均	0.938	0.905	0.914
標準偏差	0.053	0.052	0.041

表 3 色提示群における文字ごとの適合率, 再現率, F 値

文字	適合率	再現率	F 値
C ₁	0.867	0.867	0.867
C ₂	0.889	0.800	0.836
C ₃	0.889	0.967	0.851
C ₄	0.967	0.933	0.944
C ₅	0.933	0.933	0.933
C ₆	0.978	0.978	0.978
C ₇	0.878	0.800	0.831
C ₈	0.878	0.900	0.887
平均	0.910	0.897	0.891
標準偏差	0.041	0.065	0.051

までの範囲で, 平均適合率は 0.938 である. C₆ においては適合率は 1.000 で, すべての注意すべき箇所が正しく判断されていることがわかる. 再現率は 0.833 から 1.000 までの範囲で, 平均再現率は 0.905 である. 再現率においても C₆ が最も高い再現率を示しており, 注意すべき箇所を見逃すことがなかったことがわかる. F 値は 0.864 から 1.000 までの範囲で, 平均 F 値は 0.914 である. C₆ は適合率, 再現率ともに高い値のため, 最も優れた F 値を示している.

表 3 より色提示群では, 各文字の適合率は, 0.867 から 0.978 までの範囲で, 平均適合率は 0.910 である. 音提示群と同様, C₆ が最も高い適合率を示しており, 最も予測精度が高かったことがわかる. 再現率は, 0.800 から 0.978 までの範囲で, 平均再現率は 0.897 である. C₆ が最も高い再現率である. 一方で, C₂ と C₇ においては再現率が 0.800 と他の文字と比較して低くなっていることがわかる. F 値は 0.831 から 0.978 までの範囲で, 平均 F 値は 0.891 である. F 値についても, 音提示群と同様, C₆ が最も優れた値を示している. 音提示群と色提示群で比較すると C₁, C₂, C₆, C₇ では音提示群の方が優れた値を示しており, C₅ についてのみ色提示群の方が優れた値を示している.

また, 紙媒体のテストで両群ともに適合率, 再現率, F 値の値が高かった C₆ について, 筆圧の分布を可視化したものを図 12 に示す. ここでは, 手書きデータの描画点について 20 ピクセル以内にある点を 1 つのクラスタとみなし, X・Y 座標の平均であるクラスタの中心と筆圧の平均を計算し, HSL カラーモデルに基づいて筆圧を可視化した. ここから, C₆ については,

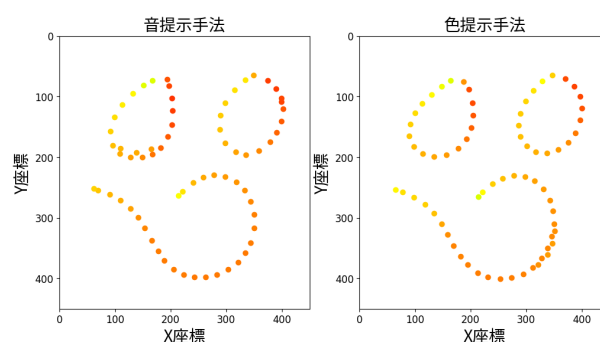


図 12 テストにおける C₆ の筆圧分布

表 4 音提示群における実験協力者ごとの適合率, 再現率, F 値

実験協力者	適合率	再現率	F 値
U ₁	0.889	0.842	0.865
U ₂	0.875	0.737	0.800
U ₃	0.944	0.895	0.919
U ₄	1.000	1.000	1.000
U ₅	0.889	0.842	0.865
U ₆	1.000	0.947	0.973
U ₇	0.824	0.737	0.778
U ₈	1.000	1.000	1.000
U ₉	1.000	1.000	1.000
U ₁₀	0.778	0.737	0.757
U ₁₁	0.947	0.947	0.947
U ₁₂	1.000	1.000	1.000
U ₁₃	1.000	1.000	1.000
U ₁₄	1.000	0.947	0.973
平均	0.939	0.902	0.920
標準偏差	0.073	0.101	0.084

表 5 色提示群における実験協力者ごとの適合率, 再現率, F 値

実験協力者	適合率	再現率	F 値
U ₁	1.000	1.000	1.000
U ₂	0.650	0.684	0.667
U ₃	0.947	0.947	0.947
U ₄	1.000	0.895	0.944
U ₅	0.706	0.632	0.667
U ₆	1.000	1.000	1.000
U ₇	0.857	0.947	0.900
U ₈	0.895	0.895	0.895
U ₉	1.000	1.000	1.000
U ₁₀	0.824	0.737	0.778
U ₁₁	1.000	1.000	1.000
U ₁₂	0.824	0.737	0.778
U ₁₃	1.000	0.947	0.973
U ₁₄	0.947	0.947	0.947
U ₁₅	1.000	1.000	1.000
平均	0.910	0.891	0.900
標準偏差	0.112	0.124	0.116

図 7 に示された注意すべき箇所についてタブレット上で行ったテストにおいても高い精度で筆圧の再現ができていたことがわかる.

次に, 各群における実験協力者ごとの適合率, 再現率, F 値

を比較する。表 4 と表 5 は、それぞれ音提示群と色提示群における実験協力者ごとの適合率、再現率、F 値を示す。表より、音提示群では U₄, U₈, U₉, U₁₂, U₁₃ が、色提示群では U₁, U₆, U₉, U₁₁, U₁₅ が F 値が 1.000 と優れた値を示している。音提示群の F 値においては U₇ が 0.778, U₁₀ が 0.757 と低い値を示しており、色提示群においては U₂, U₅ が 0.667, U₁₀, U₁₂ が 0.778 と低い値を示している。

5.4 アンケート結果

「筆圧を意識した文字練習ができましたか」という質問に対して、実験協力者全員が「とてもそう思う」と回答した。「文字練習は楽しかったですか」という質問に対して、46.7%の実験協力者が「とてもそう思う」と回答し、50.0%が「どちらかといえばそう思う」と回答した。「今後もシステムを使いたいと思いましたが」という質問に対して、16.7%が「とてもそう思う」と回答し、56.7%が「どちらかといえばそう思う」と回答した。また、「筆圧を認識することは難しいが、フィードバックがあることで筆圧が認識できることが良かった」という意見や、「音が鳴ることで楽しく練習できた」という意見があった。一方で、「電子音以外の心地の良い和音が良い」という意見もあった。

6. 考 察

6.1 音提示や色提示が筆記行動に及ぼす影響

図 8 より、音提示群においては、ベースラインと比較して筆記速度が遅くなっていた。音によるフィードバックは、リアルタイムで聴覚的に処理する必要があるため、認知的負荷が増加し、筆記速度が遅くなることに影響を及ぼした可能性が考えられる。一方、色提示群においては、ベースラインと比較して筆記速度が速くなっていた。色によるフィードバックは筆圧が視覚的に認識できるため、フィードバックに応じた筆圧の調整がスムーズに行えたと考えられる。しかし、今回の実験では両群間でベースラインの筆記速度に差があったため、今後は、このベースラインにおける筆記速度を揃え、検証を行っていく予定である。

図 10 より、音提示手法は色提示手法に比べ筆圧の分布幅が大きいことがわかる。今回は丁寧な文字練習の評価指標の 1 つとして筆記速度を用いたが、音提示群では、筆圧の注意すべき箇所注意が払われた結果、丁寧な文字練習となり、筆圧の分布幅が広がったと考えられる。これに対して、色提示群の筆圧の分布幅の広がりが音提示群よりも狭かったのは、色提示手法の方が筆圧の細かな変化に対応した視覚的に分かりやすいフィードバックを与えるためであると考えられる。1 つ前のストロークと比較して筆圧が弱くなると、色が視覚的に分かりやすく変化するため、音提示による音量変化と比較して筆圧の変化に対する認識が容易であった結果、筆圧が弱い方向への広がりが小さくなったと考えられる。

6.2 筆圧に関する記憶

表 1 より、適合率、再現率、F 値すべての評価指標について音提示群の方が優れた値を示していた。このことから、音提示手法の方が筆圧を意識した文字練習により効果的で、筆圧の再現ができるのではないかと考えられる。

表 2, 表 3 より、文字ごとの適合率、再現率、F 値のすべての評価指標で、C₆ においては、他の文字よりも高い値を示していることがわかる。数名の実験協力者からは、C₆ の文字が顔のように見えるため印象に残ったという意見があった。そのため、文字練習の対象となった文字自体の形状が筆圧に関する記憶に影響を与えた可能性が考えられる。一方、音提示群では C₃ において適合率が 0.821 という最も低い値を示した。これは、C₂, C₄, C₆, C₇ における筆圧の注意すべき箇所と C₃ の文字の形状が似ていたため、C₃ においても注意すべき箇所であると誤って判断してしまった可能性が考えられる。また、両群ともに C₂ と C₇ において再現率が他の文字と比較して低い結果となった。これら 2 文字は、文字の形状が似ているため、注意すべき箇所を正確に記憶できなかった可能性が考えられる。

これらの結果から、筆圧に関する記憶は文字の形状が影響を及ぼしているのではないかと考えられる。また、文字ごとに筆圧を記憶しているのではなく、形状が似ている文字をグループとして認識していることが示唆される。その結果として、似た形状の文字において適合率や再現率が類似した結果となったと考えられる。

各文字の適合率、再現率と F 値について、音提示群と色提示群で比較したところ、C₁, C₂, C₆, C₇ については音提示群の方が優れた値を示しており、C₅ についてのみ色提示群の方が優れた値を示していた。このことから、音提示群の方が筆圧を意識に向けた文字練習ができたと考えられる。また、色提示群の方が優れた値を示していた C₅ や群ごとに差がみられなかった C₃, C₄, C₈ については書き順が複雑であることや、日本語ではあまりみられない形状であることが影響を及ぼした可能性が考えられる。

表 4, 表 5 より両群を比較すると、音提示群では実験協力者間でのばらつきが少なく、標準偏差の値も小さいことから、一貫したパフォーマンスを発揮することができた可能性が考えられる。色提示群では、U₂ が 0.667, U₅ が 0.667 と著しく低い値を示しており、色提示のタスクが難しかったか、個人差が大きかった可能性が考えられる。全体的に見るとどちらの群でも、安定して高いパフォーマンスを発揮した実験協力者が複数存在することから、音提示と色提示のどちらの条件でも筆圧を意識した文字練習に効果的であったことが考えられる。

6.3 システムを用いた文字練習

アンケートの結果から、筆圧を意識した文字練習が行えたことが明らかとなった。これは、筆圧に応じた音提示や色提示により、筆圧を可聴化、可視化することが筆圧への意識を高める役割を果たしたことを示唆している。また、「文字練習が楽しかったか」という質問に対する回答から、文字をなぞるときに音が鳴ることで文字練習が楽しくなることや、文字を書いている際に認識が難しい筆圧が何らかの方法でフィードバックされることが、文字練習の体験を向上させる要素として機能したことが考えられる。一方、「今後もシステムを使いたいか」という質問に対しては肯定的な意見が多数を占めたものの、システムのフィードバックに対して改善の余地がある。「電子音以外の心地よい和音が良い」という意見が示すように、音の質が文字

練習の体験の質に影響を与えた可能性がある。音によるフィードバックが文字練習における楽しさを提供する一方で、音の種類や音質が実験協力者の好みに完全に一致していなかったため、フィードバックの快適さに対して検討していく必要がある。筆圧に応じたフィードバックとして音を用いることで、筆圧に意識を向けた楽しい文字練習を行える一方で、人によって心地よいと感じる音が異なるため個人に合わせた音の提供が必要となることが考えられる。

筆圧に応じたフィードバックとして色を用いることで、書いた文字から自分が筆圧を意識できている箇所やできていない箇所がわかるため、筆圧をリアルタイムで音として認識することが難しい人にとって良いフィードバックの方法であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、繰り返し書く文字練習を楽しく効果的なものにするため、我々が提案してきた手書きストロークに連動して音が鳴る手書き文字練習システム「メロ字ィ」を、筆圧に応じた音提示や色提示を行うように改良し、システムとして実装した。また、「筆圧に応じた音提示や色提示によって丁寧かつ筆圧を意識した文字練習になり、視覚的に認識が容易な色提示手法の方が筆圧の再現ができる」という仮説のもと、梵字を練習してもらった実験を実施した。

実験の結果、筆圧に応じた音提示や色提示のフィードバックを与えることで、筆圧の分布幅が広がり、提示された筆圧に近い文字を習得できることが明らかとなった。また、筆圧の注意すべき点の記憶においては、音提示手法の方が色提示手法に比べ効果的であることが明らかになった。なおシステムを用いた練習により、文字練習の体験が向上し、筆圧を意識した文字練習に繋がる可能性が示唆された一方で、フィードバックの方法については改善の余地が残る結果となった。

今後は、ベースラインを揃えた実験を実施し、手書き速度がどのように変化するかを検証する予定である。また、文字練習に集中しながら心地よいフィードバックを提供する方法や筆圧が特に変化する書道における文字練習への応用についても検討を進める予定である。今回は手書き文字として梵字を用い、大学生を対象に実験を行ったが、今後は本格的な文字練習が始まる小学生を対象に、本システムが筆圧を意識した文字練習にどの程度効果的であるかについても検証を行っていく。

文 献

- [1] 文化庁, “平成 26 年度『国語に関する世論調査』の結果の概要.” https://www.bunka.go.jp/tokei_hakusho_shuppan/tokei_chosa/kokugo_yoronchosa/pdf/h26_chosa_kekka.pdf. 2024 年 10 月 13 日確認.
- [2] 島村直己, “児童の漢字学習：アンケート調査の結果から,” 国立国語研究所研究報告集, no.10, pp.133–172, March 1989.
- [3] 松田さゆり, 渡邊健斗, 横山幸大, 青木由樹乃, 青木柘八, 中村聡史, 掛見幸, and 石丸築, “メロ字ィ: 手書き軌跡に連動したメロディ提示による手書き文字練習システムの提案,” 信学技報, vol.123, no.24, pp.182–187, May 2023.
- [4] 鳩貝怜央, 松田さゆり, 渡邊健斗, 中村聡史, and 掛見幸, “メロ字ィ: 手書き練習におけるお手本と手書きのずれを考慮したメ

- ロディ提示手法,” 信学技報, vol.123, no.433, pp.7–12, 2024. MVE2023-43.
- [5] 中村優文, 山口周悟, and 森島繁生, “motebi 文字を手書きで美しく書くための支援ツール,” 第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2016) 論文集, 2016.
- [6] 久保田夏美, 新納真次郎, 中村聡史, and 鈴木正明, “Mojivator: 手書き文字の自動融合により書きたくなる練習支援システム,” 第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2016) 論文集, 2016.
- [7] 木村和樹, “圧力センサのフットスイッチを用いた塗油各フィードバック装置の開発と信頼性,” 日本義肢装具学会誌, vol.32, no.1, pp.45–49, 2016.
- [8] 前川満良, 今井有希子, 関啓明, 神谷好承, and 橋爪慎哉, “視覚障害者のための色模様認識システムの開発,” 精密工学会学術講演会講演論文集, 2004 年度精密工学会春季大会, pp.1229–1230, 2004.
- [9] S. Matsuda, Y. Funazaki, T. Komatsu, N. Matsuyama, Y. Nakagawa, S. Nakamura, H. Takao, R. Sumikawa, and T. Torii, “DoReMi Steering Wheel: Proposal for a Driving Assist System with Sound Display Depending on the Rotation Angle of Steering Wheel,” Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 26th International Conference, pp.4504–4513, 2022.
- [10] Pieter Van den Berghe, Valerio Lorenzoni, Rud Derie, Joren Six, Joeri Gerlo, Marc Leman, and Dirk De Clercq, “Music-based biofeedback to reduce tibial shock in over-ground running: a proof-of-concept study,” Scientific Reports, vol.11, February 2021.
- [11] V. Lorenzoni, J. Staley, T. Marchant, K. Onderdijk, P. Maes, and M. Leman, “The sonic instructor: A music-based biofeedback system for improving weightlifting technique,” PLoS One, vol.14, no.8, p.e0220915, 2019.
- [12] K. Yoo, X. Wu, W. Zhuang, Z. Xia, and Y. Liu, “The effects of audible feedback as a coaching strategy on golf skill learning for novice players,” International Journal of Performance Analysis in Sport, vol.20, no.4, pp.596–609, 2020.
- [13] 大石琉翔 and 中村聡史, “エキセントリックトレーニングにおける動作速度の安定性向上のための効果音フィードバック,” 情報処理学会 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), vol.2024-EC-71, no.24, pp.1–8, mar 2024.
- [14] 中川久倫, 伊藤弘大, 藤田和之, 岸楓馬, 福島力也, and 伊藤雄一, “エクスカキバー: ビジュアル・サウンドエフェクトを用いた筆記支援,” インタラクシオン 2022 論文集, pp.641–644, 2022.
- [15] 牟田将史, 石川優, 里井大輝, and 星野准一, “i 文鎮: 書くことを楽しくする文鎮,” 情報処理学会研究報告, pp.1–5, 2014.
- [16] T.H. Andersen and S. Zhai, “Writing with music: Exploring the use of auditory feedback in gesture interfaces,” ACM Trans. Appl. Percept., vol.7, no.3, June 2008.
- [17] 浅井洋樹, 野澤明里, 苑田翔吾, and 山名早人, “オンライン手書きデータを用いた学習者のつまづき検出,” DEIM Forum 2012, pp.A8–4, 2012.
- [18] 小林沙利, 植木里帆, 関口祐豊, 中村聡史, 掛見幸, and 石丸築, “デジタルペンの筆圧による濃淡表現の有無が筆算の正答率に及ぼす影響,” HCG シンポジウム 2022, pp.1–8, 2022.
- [19] 宮崎勇輝, 小林沙利, 中村聡史, and 掛見幸, “デジタルペンの筆圧による濃淡表現の有無が図形問題の解答に及ぼす影響の調査,” HCG シンポジウム 2023, 2023.
- [20] 荒井勇人, 越後宏紀, 石丸築, 掛見幸, and 五十嵐悠紀, “お手本との筆圧差分を提示することによる手書き文字支援,” インタラクシオン 2023 論文集, pp.293–297, 2023.