

平均化手法を用いた非利き手筆記練習手法の提案

能宗 巧¹ 瀬崎 夕陽¹ 関口 祐豊¹ 中村 聡史¹

概要：両手で同時に文字や線を筆記する「両手同時筆記」は並行作業を可能にし、表現の幅を広げる筆記法であると考えられるが、非利き手の筆記能力の低さや左右の手の干渉などがその実現を困難にしている。本研究では、両手同時筆記の実現に向けた第一歩として非利き手の筆記能力を向上させるため、利き手の筆跡から生成した平均文字を手本に用いて、非利き手でそれを繰り返しなぞる練習法を提案した。提案手法では、左右の手を交互に使用することで利き手の運動イメージから技能転移を促進するとともに、非利き手での筆記文字が手本に漸近するアニメーションを提示し、誤差を把握できるフィードバックを行った。実験では、提案手法を用いる群と単回の自筆文字を手本としてなぞる比較手法を用いる群の2群に分けて練習を実施し、練習前後における非利き手の筆記能力の変化を評価した。その結果、提案手法は比較手法と同程度の筆記精度向上効果を維持しつつ、非練習文字にも効果が波及する安定した学習過程を実現する非利き手筆記練習手法であることが示された。

1. はじめに

筆記作業において非利き手の活用が可能になれば、利き手の疲労分散や、骨折・腱鞘炎などの負傷時における利き手の代替手段となり得る。Sainburgの動的優位性モデル [1]によれば、左右の腕はそれぞれ異なる運動特性に特化しており、両手の巧緻性の差が小さくなることで、左右で異なる制御特性をタスクや状況に応じて適切に使い分けられるようになり、書字における身体スキルの質的な拡張が期待できる。例えば、ピアノ奏者が左手の伴奏で右手の主旋律を支えるように、筆記においても非利き手で図形や補助線を描画しながら利き手で詳細な内容を記述するといった、各手の特性に適した役割分担が可能になる。これにより、筆記行為が従来の直列処理から並列処理へと拡張され、片手での作業に比べて単位時間あたりの情報記述量の増加が期待できる。一方、その実現には非利き手が単独で意図通りの筆記を行えるだけの筆記能力を有していることが不可欠である。

両手協調動作の獲得には単独の手の技能習得とは異なる学習プロセスを要すると考えられ、分野ごとに独自の練習法が体系化されている。楽器演奏の分野では、訓練により左右の運動干渉 [2] を克服し、独立制御する能力を獲得する練習法が体系化されている [3]。一方、筆記動作は微細な空間制約を伴う難易度の高い動作であるにもかかわらず、両手同時筆記に向けた体系的な練習法は確立されていない。

我々はこうした両手同時筆記の実現には、段階的な習得プロセスが必要であると考えている。第一段階は「非利き手の筆記能力向上」であり、まずは非利き手の筆記能力を単独で高め、正確な筆記を可能にする。第二段階は「両手の協調的な同期制御」であり、左右の手で同一の文字や対称的な図形を同時に描くことで、両手の同期性を高める。最終段階は「両手の独立した並列制御」であり、左右で異なる文字や、片手で文字、片手で図形といった異なるタスクを並列処理する段階へと発展させる。本研究では、この一連のプロセスにおける基礎となる第一段階「非利き手の筆記能力向上」に焦点を当てる。

非利き手の筆記練習において、フォント文字を手本としてなぞる練習は、正確性の向上に一定の効果をもつ [4] が、個人の書字特性を反映しておらず、自身の身体感覚に基づいた練習を行うことは難しい。一方、利き手の単回の自筆文字を手本に用いる手法 [5] は左右の筆跡類似性の観点 [6] から、より自然な技能転移が期待できる。しかし、単回の自筆文字には揺らぎや歪みなどが含まれやすく、必ずしも理想の形状とは言えないという課題がある。そこで、個人の書字特性を維持しつつ理想形状に近似する平均文字 [7] を用いることが、非利き手の正確性の向上と協調動作の習得に有効であると考えられる。

そこで本研究では、将来的な両手同時筆記の習得を見据え、熟達した利き手の筆記情報を活用して非利き手の筆記能力を高める練習手法を提案し、その有効性を検証する。具体的には、ユーザの利き手から生成した平均文字を手本とし、これを非利き手でなぞる学習を行う。また、左右の

¹ 明治大学
Meiji University

手を交互に使用することで利き手の鮮明な運動イメージに基づく技能転移を促進するとともに、筆跡が手本に漸近する視覚フィードバックを行い、誤差の直感的な知覚を支援する。これらを通じて、個人に最適化された効果的な非利き手での練習基盤の構築を目指す。

2. 関連研究

2.1 筆記支援・手書き練習システム

HCI 分野では、筆記動作を計測・分析し、筆記能力の習得を支援するシステムが提案されてきた。これらの研究の多くは、視覚的なガイドやフィードバックを用いて、安定した筆記動作の獲得を促すことを目的としている。

中村ら [7] は、複数の筆跡から生成された平均文字が単回の筆記文字よりも高く評価されることを示し、平均文字がユーザの理想的な文字形状を反映する可能性を示唆した。この平均文字の仕組みを応用し、久保田ら [8] は学習者の筆跡と手本文字を動的に融合することで動機づけを行うシステム Mojivator を提案し、技能向上とモチベーション維持の両立を実現した。また、Xu ら [9] はなぞり書きと模写の要素を組み合わせたシステム VisDev を提案し、筆跡が手本へと移動するアニメーションを用いて形状のズレを可視化することで、文字構造の改善が見られた。

視覚情報だけでなく、力覚を用いた支援も検討されてきた。Palluel-Germain ら [10] は、視覚と力覚を組み合わせたガイダンスが視覚のみの場合と比べて筆記の流暢性を向上させることを示した。しかし、力覚提示には専用デバイスが必要となる場合が多いという問題がある。

これらの研究は主に利き手による筆記を対象としており、非利き手に特化した支援や、特別なハードウェアを必要としない手法については十分に検討されていない。

2.2 非利き手筆記と利き手からの転移

非利き手による筆記は日常的な使用頻度が低いため、利き手と比べて微細な運動制御が困難であり、不安定かつ低速になりやすい。そのため、非利き手の筆記能力を向上させる手法がこれまでに検討されてきた。

明崎ら [4] はフォント文字のなぞり練習が非利き手の筆記正確性を向上させることを示し、大保ら [5, 11] はその延長として、利き手で書いた自筆文字を用いたなぞり練習が有効であることを示唆した。また、辻ら [12] はグリッド線を用いた模写練習が正確性向上に寄与することを明らかにした。これらの研究は主に筆記の正確性向上に焦点を当てており、利き手が有する優れた運動制御能力を非利き手の学習にいかに移転・活用させるかという観点での支援は十分に行われていない。

運動学習の分野では、片側の手で行った練習効果が反対側の手に現れる両側性転移が知られている [13]。特に、運動制御能力に優れた利き手での学習はより高度な運動ブ

ログラムを形成できるため、利き手から非利き手への転移の方が、その逆方向よりも効果的であるという報告がある [14]。しかし、筆記のような複雑な微細運動においては、単純な反復練習による転移効果は限定的である。Beg ら [15] は、利き手によるペグボード訓練が非利き手の物体操作精度を向上させる一方で、筆記タスクでは有意な改善が見られなかったことを明らかにした。一方、佐藤ら [16] は両手それぞれで書いた平均文字を比較し、ストロークの形状や特徴量に共通する傾向があることを明らかにした。

以上のことより、自然な転移だけでは習得が困難な筆記技能であっても、形状的な類似性に着目し、利き手がつ安定した形状イメージをフィードバックすることで、非利き手の効果的な学習支援が可能になると考えられる。

3. 提案手法

本研究では、非利き手の筆記能力を高めるため、利き手の筆記情報を活用した非利き手の筆記練習手法を提案する。具体的には、以下の3つの要素から構成される。

- (1) 利き手の筆記文字から生成した平均文字をなぞる
- (2) 技能転移を促進するための左右交互筆記
- (3) 筆記直後に提示するアニメーションフィードバック

本手法は、熟達した利き手の筆記特徴を非利き手へ段階的に転移させることで短時間での筆記能力向上を狙うとともに、将来的な両手同時筆記に向けた協調動作の基盤を形成することを目的としている。

3.1 利き手の平均文字を用いたなぞり練習

非利き手の練習において、自筆文字を手本とする手法はすでに提案されている [5] が、単回の自筆文字には筆記ごとの歪みが含まれるため、必ずしも学習にとって理想的な手本とは言えない。一方、複数回の筆記から生成した平均文字はユーザの理想文字に近いことが示されている [7]。

これらの知見に基づき、本手法ではユーザ自身の利き手による平均文字を手本として採用する。平均文字の生成については、先行研究 [7] のアルゴリズムを利用する。これにより、練習初期段階でも過度な負荷を避けながら、理想的な書字イメージを非利き手へ効率的に学習させることを目指す。

3.2 利き手・非利き手の交互筆記

2.2 節で述べたように、運動学習において利き手で獲得した技能は非利き手へ転移する。しかし、単に利き手での練習をまとめて行った後に非利き手での練習へ移行する手順では、利き手で生成された筆記イメージが時間経過とともに減衰してしまう可能性がある。そのため、短期的な運動記憶が鮮明なうちに反対側の手でその運動を再現するこ

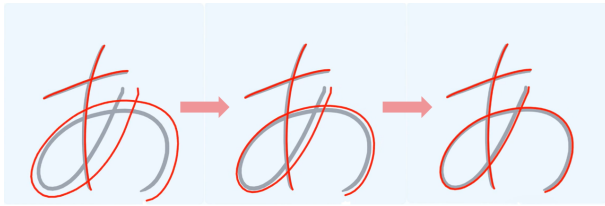


図 1 アニメーションフィードバックによる筆記ストロークの変化. 赤いストロークが非利き手でなぞったものであり, これが灰色の平均文字の手本に徐々に近づいていく.

とが効率的な転移につながると考えられる.

そこで本研究では, 利き手で練習対象の文字を複数回筆記した直後に, 非利き手で同一文字を同じ回数なぞる交互筆記を採用する. 利き手での筆記運動の直後に非利き手の練習を行うことで, 理想的な運動イメージが鮮明なうちに模倣を行い, 効率的な学習を狙う.

3.3 アニメーションフィードバック

筆記技能習得には誤差の認識が不可欠であるが, 数値の提示だけでは修正の方向性が掴みにくい. 学習初期には具体的な修正法を示す処方的なフィードバックが有効とされるため [17], 本研究では筆記文字が平均文字へ漸近するアニメーションを導入する. これにより, 筆跡が理想形状へ変化する過程を視覚的に提示し, 直感的な修正を支援する.

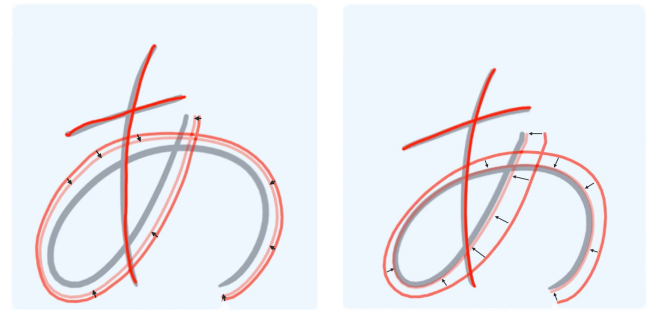
具体的には, 非利き手で筆記したストロークと平均文字のストロークの対応を取ったうえで, 両者の座標点群を所定の割合で線形補間した新たなストロークを生成し, 補間率を段階的に変化させながら表示することでアニメーションを構成する (図 1). アニメーション開始直後ではユーザの筆跡の形状を強く残し, 徐々に平均文字の形状が強く反映されるように遷移させることで, ユーザは修正が必要な箇所とその度合を自然に把握できる.

図 2 に最大補間率を変えたアニメーションの例を示す. 最大補間率を 100% に近づけるほどアニメーション終了時に手本の平均文字に近づくが, 自分の書いた文字が大幅に変換され不快感を覚えるという報告が先行研究 [8] で示されているため, 本手法では最大補間率を 30% に設定した.

3.4 実装

これらの要素を統合したシステムを, JavaScript と PHP を用いて Web アプリケーションとして実装した. 本システムは, 利き手での筆記による平均文字の生成と, 非利き手でのなぞり練習から構成される. 図 3 に実装した練習システム画面を示す.

ユーザは画面左側に表示されるキャンバスに利き手で規定回数筆記を行い, 保存ボタンを押下する. これにより生成された平均文字が手本として表示され, 自動的に非利き手でのなぞり練習へ移行する. 練習時は, 1 ストロークごとにアニメーションフィードバックが即座に提示される仕



(a) 最大補間率 30%

(b) 最大補間率 90%

図 2 最大補間率ごとのアニメーションフィードバックによるストロークの変化.



図 3 実際のシステム画面の一例.

組みとした.

4. 実験

4.1 概要

本研究では, 自筆文字を手本としてなぞる比較手法を用意し, 「提案手法のほうが比較手法よりも, 非利き手の筆記能力の改善率が高い」という仮説を検証する. 実験では, 参加者をどちらかの手法に割り当て, 6 日間の練習による非利き手の筆記能力の変化を比較することで, 各手法の有効性を評価する. 評価指標には, 手本を提示しない状態での非利き手による筆記から算出される筆記のブレに加え, 練習後に実施するアンケートによる主観評価を用いる.

4.2 比較手法

比較手法は大保ら [5] の手法を参考に, 利き手による自筆文字を手本とするなぞり練習を行うものである. 比較手法群では, ユーザが利き手で対象となる全文字を複数回ずつ筆記し, その筆記データを保存した後, 非利き手での練習へと移行する. 非利き手での練習では, その日に保存された利き手の筆跡の中から文字ごとにランダムに選んだ一文字を手本として提示し, 非利き手で繰り返しなぞる練習を行う. この手法には, 提案手法の特徴である「平均文字の

手本」や「利き手と非利き手の交互筆記」,「アニメーションフィードバック」は含まれず,比較的単純な従来の自筆なぞり練習に相当する.これにより,平均文字の手本・交互筆記・アニメーションを含む提案手法が,比較手法と比較してどの程度の効果をもつのかを検証できるようにした.

4.3 実験設計

本研究で用いる練習システムでは,ひらがな・カタカナ・漢字・数字など,日常生活で使用する全ての文字を網羅的に練習することは現実的ではないため,練習する文字は,その文字を練習することで他の文字にも転移効果が期待できるものを優先して選定した.そのため筆記対象文字は,先行研究 [8,18,19] や,漢字部首の出現頻度 [20] を参考に,多様な書字パターンをカバーできるように以下の 20 文字を選定した.

あ, ふ, む, 永, 子, 波, 扌, 虹, 訓, 茶,
道, 命, 敬, 枕, 例, 空, 笑, 恩, 45, 89

これらの文字は,曲線・直線・とめ・はね・はらいといったストロークの特徴や,部首・縦横比の違いなど,多様な書字要素を含んでいるため,非利き手の筆記能力を幅広く評価するうえで適していると考えられる.なお,極端に画数の多い文字はストロークの密度が高く,非利き手ではキャンバス内で安定して筆記することが困難であることを考慮し,13画以上の文字は選定から除外した.

また,当日に練習していない文字に対しても正確性の向上が生じるか,すなわち練習効果の汎化が起こるかを検証するため,20文字を奇数日目に練習する odd 群(あ, 永, 子, 波, 扌, 虹, 訓, 茶, 道, 45)と偶数日目に練習する even 群(ふ, む, 命, 敬, 枕, 例, 空, 笑, 恩, 89)の 2 群に分割した.

なお, odd 群と even 群で練習量が大きく偏らないように,各文字群の総画数が概ね一致するように調整した.これにより,ある日の練習対象でない文字に対しても,非利き手の筆記能力がどの程度向上するかを確認することが可能になる.

実験は,Android 14 を搭載したタブレット端末(Wacom MovinkPad 11)上で実装したシステムを Web アプリケーションとして動作させ実施した.

4.4 手順

実験は,各参加者が任意の 6 日間で実施し,奇数日目には odd 群の 10 文字,偶数日目には even 群の 10 文字を練習対象とした.全体の流れを以下に示す.

まず,参加者に実験の目的および手順を説明し,同意を得たうえで実験を開始した.初回の練習開始前に,各参加者の非利き手筆記能力のベースラインを測定するため,事前テストを実施した.事前テストでは,非利き手のみを用いて練習対象となる 20 文字全てを手本なしで 5 回ずつ筆

記した.その後,平均文字を生成したうえで,筆記文字と平均文字との筆記のブレを算出し,文字ごとの筆記のブレの平均が同程度になるように各手法群に同数名の参加者を割り当てた.

練習開始後の 1 日の流れは以下の通りである.

(1) なぞり練習

各日において,割り当てられた文字群(odd または even)の 10 文字を対象に練習を行う.練習中に取得したストロークの座標,筆圧,筆記時間は,分析のため全て保存する.各文字の練習回数は,平均文字の形状安定に必要な回数に関する知見 [16] に基づき,利き手・非利き手ともに各 5 回と設定した.なお,具体的な練習の流れは割り当てられた手法群によって以下の通り異なる.

- **提案手法群**:対象の 10 文字をランダムな順序で提示し,1文字について利き手で 5 回連続して筆記し,直後に生成された平均文字を非利き手で 5 回なぞる一連のサイクルを,重複なしで 10 文字分繰り返す.なお,非利き手で各ストロークをなぞり終わってペンを離す度に,平均文字へ漸近するアニメーションフィードバックが自動的に提示される.
- **比較手法群**:対象の 10 文字全てについて,ランダムな順序で利き手による筆記を各 5 回ずつ行う.全文字の利き手筆記が完了した後,保存された 5 回の自筆文字の中からランダムに選択された 1 文字を手本として提示し,非利き手で 5 回なぞる課題を 10 文字分実施する.

(2) 練習後テスト

練習終了後,直ちに非利き手のみを用いて 20 文字全ての筆記を行う.事前テストと同様に手本は提示せず,各文字をランダムな順序で 5 回ずつ筆記させる.ここで得られた筆記データから筆記のブレを算出し,事前テストおよび前日までの結果と比較することで,正確性の向上を評価する.

(3) 主観評価アンケート

練習後テスト終了後,なぞり練習と練習後テストの達成感と難易度について,7 段階リッカート尺度を用いたアンケートに回答する.また自由記述欄を設け,練習中に発生した問題点やシステムについての改善点があれば記述する.

以上の手順を奇数日目・偶数日目でそれぞれ実施することで,練習対象とした文字群だけでなく,その日に練習していない文字群に対してどの程度汎化が生じるかを評価できるようにした.

全日程終了後には,最終的な事後アンケートを実施した.ここでは,参加者の非利き手による筆記経験の有無や,実験全体を通じた練習・テストに対する主観的な感想を収集

した。また、システムのユーザビリティ評価として継続利用意向を問う項目に加え、システムの実用性と、使用時の快楽性の2つの側面からUXを定量的に測定する指標であるUEQ-S [21]を用いた。

4.5 筆記正確性の分析方法

筆記の正確性を評価する指標には、我々がこれまでに用いてきた、筆記された文字とその平均文字の差異である筆記のブレ [18, 19]を採用した。具体的には、テスト時に非利き手で筆記した文字について、練習日ごと、文字種ごとに平均文字を生成した。その後、各平均文字とその生成に用いた筆記文字に対して、各ストロークをその長さに基づき100等分し、対応する特徴点同士のユークリッド距離を算出した。さらに、距離の総和を100で割った値を基準量とし、それに全ストローク長に対する対象ストローク長の比を乗じることで、ストロークの長さに応じた正規化を行った。

5. 結果と考察

参加者は、右利きの大学生および大学院生20名（平均年齢：22.6±1.31歳、うち男性13名）であった。なお、実験終了後に取得したアンケート結果から、全ての参加者が非利き手での筆記経験をもたない初心者であった。手法内比較ではWilcoxonの符号付き順位検定を用い、手法間比較ではMann-WhitneyのU検定を用いた。本研究では有意水準 p を0.05とし、効果量 r とともに記載している。

5.1 練習前後における筆記のブレの変化

仮説の検証を行うため、手本なしでの筆記で取得した筆記データに対して、4.5節で述べた筆記のブレを算出し、客観的な筆記パフォーマンスの評価を行った。

手法ごとの、0日目（練習開始前の事前テスト）と6日目（練習最終日の練習後テスト）における筆記のブレの変化を図4に示す。なお、本研究において特に日数に言及がない場合、6日目の筆記のブレを0日目の筆記のブレで除算した後、1から引いた値（1－6日目のブレ/0日目のブレ）を改善率として扱う。日数の指定がある場合、その日の筆記のブレを0日目の筆記のブレで除算し1から引いた値（1－指定日のブレ/0日目のブレ）を指定日における改善率とする。この値が大きいほど、練習によって筆記のブレが減少したことを表す。

Wilcoxonの符号付き順位検定の結果、提案手法群（平均値の推移：22.91→17.86, 改善率：0.22）と比較手法群（平均値の推移：23.09→17.69, 改善率：0.22）のどちらも筆記のブレは有意に減少しており（ $p < 0.01, r > 0.60$ ）、6日間の練習による効果が確認された。手法間での改善率については、Mann-WhitneyのU検定を行ったところ有意な差は見られなかった（ $p = 0.57, r = 0.14$ ）。このことから、

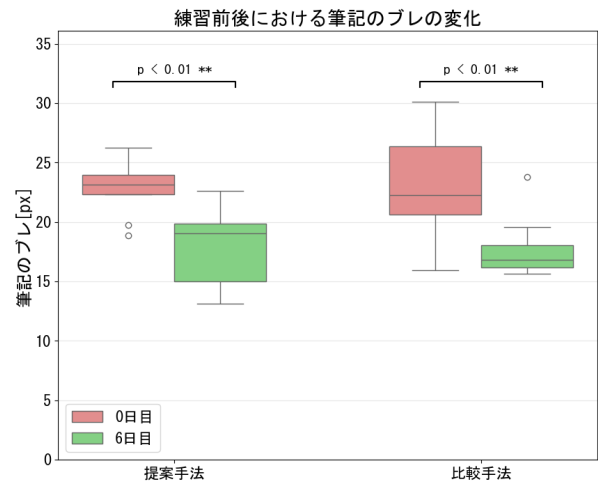


図4 手法ごとの0日目と6日目の筆記のブレの変化。

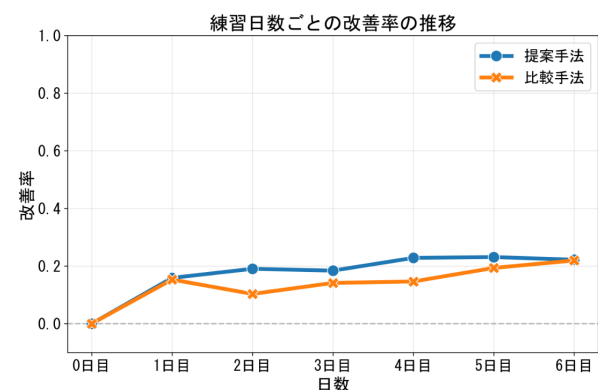


図5 手法ごとの練習日数別改善率の推移。

両手法において練習前後で有意な筆記のブレの減少が確認されたが、手法間に有意差は見られなかった。したがって、「提案手法のほうが比較手法よりも、非利き手の筆記能力の改善率が高い」という仮説は棄却された。

手法間の改善率は同等であった一方で、改善に至るまでの過程には異なる傾向が見られた。練習日数ごとの改善率の推移を図5に示す。Mann-WhitneyのU検定より、全ての日において手法間に有意差は見られなかった（ $p > 0.15, r < 0.33$ ）が、提案手法群は1日目（0.16）に大きく向上した後、2日目（0.19）以降も極端に悪化することなく、安定した学習効果を示した。一方、比較手法群は1日目（0.15）で一度向上したものの、2日目（0.10）にかけて改善率が悪化していた。その後、初めて1日目の値を上回ったのは5日目（0.19）であり、学習初期から中期にかけて不安定な推移を示した。このことから、統計的な有意差は見られなかったものの、提案手法は比較手法よりも安定的かつ早期に学習効果を定着させる可能性が示唆された。

5.2 練習文字による汎化性能

練習効果を確認するため、1日目から6日目において練習を行った文字と行わなかった文字の改善率を比較した。なお本研究では、その日になぞり練習を行った文字（奇数

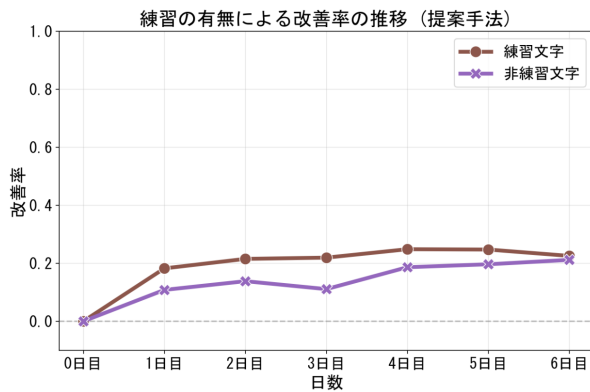


図 6 提案手法での練習の有無による改善率の推移。

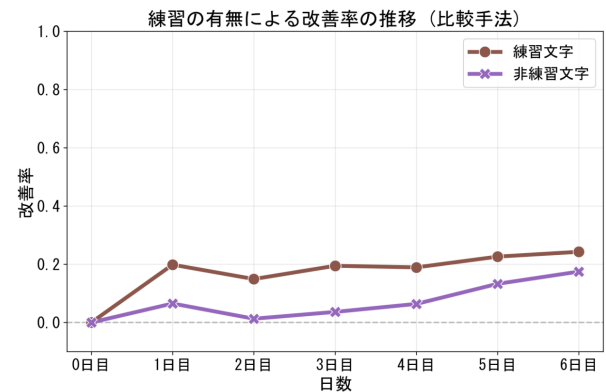


図 7 比較手法での練習の有無による改善率の推移。

日目は odd 群, 偶数日目は even 群の文字) を練習文字, 練習を行わなかった文字を非練習文字とする。

手法別の練習の有無による改善率の推移を図 6 と図 7 に示す。手法間で改善率に差があるかどうか, 練習文字と非練習文字それぞれについて, Mann-Whitney の U 検定を行ったところ, 練習文字では全ての日で有意差は見られなかった ($p > 0.30, r < 0.24$)。一方, 非練習文字では, 4 日目において提案手法群の方が有意に改善率が高い値を示した ($p = 0.03, r = 0.51$) ほか, 2 日目においても提案手法群の方が改善している傾向が見られた ($p = 0.08, r = 0.41$)。

手法内で練習文字と非練習文字の改善率について分析をするため, 各手法で Wilcoxon の符号付き順位検定を行った。比較手法群では, 2 日目と 6 日目を除く全ての練習日において, 練習文字の方が非練習文字よりも有意に改善率が高く ($p < 0.01, r > 0.58$), 2 日目と 6 日目においてもその傾向は変わらなかった ($p < 0.05, r > 0.44$)。実験期間を通じて, 常に練習文字の改善率が高い状態を維持していたことは, 比較手法による学習効果が特定の文字形状に強く依存しており, 非練習文字への十分な汎化が生じにくいことを示唆している。提案手法群においては, 全ての練習日において有意差が存在しなかった ($p > 0.06, r < 0.50$)。特に, 6 日目においては $p = 0.85$ ($r = 0.06$) となり, 練習文字と非練習文字の改善率の差がほとんど見られなくなった。これは, 提案手法による練習が特定の文字形状に限らず, 非利き手の筆記能力そのものを向上させ, 非練習の文字に対しても適応可能な汎用的スキルとして定着したことを示唆している。

5.3 文字・ユーザによる筆記のブレの傾向

文字別の改善率の傾向として, 「恩 (改善率: 0.30)」や「笑 (改善率: 0.24)」のような, 筆記対象文字の中でも画数比較的多い漢字において筆記のブレが大きく改善していた。これらの文字は, 手本をなぞることでストロークの配置や長さの比率といった構造的な理解が深まりやすく, 筆記のブレとして数値化される形状の改善が顕著に表れた可能性がある。また 2 画の数字である「89 (改善率: 0.23)」

においても高い改善率が確認された。これは, ストロークがどちらも比較的長いことに加え, 筆記開始位置がユーザの中で定まっていない点で漢字と異なり, その揺らぎが筆記のブレとして検出されやすかったと考えられる。

一方, 「あ (改善率: 0.12)」や「ふ (改善率: 0.13)」といったひらがなや, 「永 (改善率: 0.13)」のような多彩な筆記技法 (とめ, はね, はらいなど) が強く求められる文字においては, 改善率が低い傾向が見られた。ひらがなについては, 漢字に比べて画数が少なく曲線的な連続ストロークが主体となるため, 単なる座標の差としての評価では上達が捉えにくかった, あるいは, なぞり練習の効果が漢字ほど直接的に作用しにくかった可能性が考えられる。また, 比較手法群での「永」の上達度が全文字中で最も低かった (0.05) ことは, 自筆文字の不安定な形状が, 多彩な筆記技法を要求する文字の習得には不向きであった可能性を示唆している。

参加者ごとの改善率に着目すると, 上位 3 名は比較手法群 (改善率: 0.42), 提案手法群 (改善率: 0.37), 提案手法群 (改善率: 0.37) となり, 最も大きく改善したのは比較手法群の参加者であった一方で, 下位 3 名も比較手法群 (改善率: -0.04), 提案手法群 (改善率: 0.11), 提案手法群 (改善率: 0.11) と両手法群が混在していた。

提案手法群では, 練習前後で筆記のブレが増加した参加者は存在しなかった一方で, 比較手法群では, 全参加者の中で唯一, 当初から高い筆記能力 (0 日目の筆記のブレ: 15.93) を持つ参加者のパフォーマンスが悪化する事例が見られた。これは, 比較手法で用いた単回の自筆手本に含まれる微細なノイズが, 安定した筆記スキルをもつ参加者の確立していた滑らかな運動制御を阻害してしまい, パフォーマンスが低下した可能性がある。このことから, 単回の自筆をそのまま手本とする手法は, 習熟度によっては既存のスキルと干渉を起こすリスクがあることが示唆された。

5.4 アンケートによる主観評価

毎回の練習終了後に実施したアンケートの結果について

表 1 全日程終了後アンケートの結果.

評価項目	提案手法 (平均値)	比較手法 (平均値)	p 値	効果量 r
練習：上手さ	4.80	3.60	0.13	0.34
練習：簡単さ	4.30	3.00	0.11	0.36
テスト：上手さ	4.00	3.90	0.91	0.03
テスト：簡単さ	3.30	3.40	0.94	0.03
上達感	5.60	5.50	0.91	0.03
継続意欲	5.20	4.80	0.48	0.16
UEQ-S：実用性	5.78	5.95	0.47	0.17
UEQ-S：快楽性	5.53	5.40	0.52	0.15

て、手法間で Mann-Whitney の U 検定を用いて分析した。

全項目において有意差は見られなかったが、なぞり練習における評価は提案手法群において肯定的な傾向が見られた。「非利き手で文字を上手くなぞれた」という項目では 2 日目 ($p = 0.06, r = 0.43$), 3 日目 ($p = 0.08, r = 0.39$), 4 日目 ($p = 0.07, r = 0.42$) において、提案手法群の方が評価が高い傾向 ($p < 0.10$) が確認された。また、「非利き手でなぞるのは簡単だった」という項目においても、1 日目において提案手法群が高い評価を示す傾向が見られた ($p = 0.08, r = 0.41$)。これは、提案手法で用いた平均文字が、比較手法の自筆文字に比べて、学習初期の非利き手であってもなぞりやすく、練習時の達成感を得やすい手本であったことを示唆している。

練習後テストにおける主観評価（「上手く書けた」「簡単だった」）については、1 日目から 6 日目まで一貫して手法間に有意差や傾向は見られなかった ($p > 0.37, r < 0.22$)。このことから、平均文字を用いた練習はなぞりやすさを向上させるものの、手本なしでの筆記の主観的な困難さを短期間で低減させるわけではないことがわかった。

また、全日程終了後に実施したアンケートの結果を表 1 に示す。Mann-Whitney の U 検定の結果、全ての項目において手法間に有意差は見られなかった。しかし、「練習時の上手さ」および「練習時の簡単さ」の項目においては、提案手法群の方が練習中のパフォーマンスを肯定的に捉える傾向があった。

5.5 主観評価と客観評価の乖離

全日程終了後アンケートで取得した主観評価と、筆記の改善率の客観評価との関係について、スピアマンの順位相関係数を用いて分析した。分析の結果、提案手法群においてはいずれの主観評価についても改善率との間に有意な相関は見られなかった ($|\rho| < 0.50, p > 0.14$)。一方、比較手法群において、「テスト時の上手さ」と改善率に有意な負の相関が見られた ($\rho = -0.88, p < 0.01$)。また、「練習時の上手さ」や「練習時の簡単さ」についても、有意な負の相関が存在した (どちらも $\rho < -0.68, p < 0.05$)。これらの結果は、比較手法群において「自分は上手く書けた」「簡単

だった」と感じている参加者ほど、実際の筆記能力の改善が小さいという乖離が生じていたことを示している。

上記の乖離が生じた原因として、比較手法で用いた手本である自筆文字の性質が影響していると考えられる。自筆文字には、筆記者固有の運動の癖やノイズが含まれている。そのため、他者の文字やフォントをなぞる場合に比べて、自身の身体感覚との親和性が高い。その結果、学習者は認知的な負荷を感じずにスムーズになぞることができ、技能が向上したと誤認しやすくなる。しかし、自身の癖やノイズをそのままなぞる行為は既存の運動パターンの強化に過ぎず、本質的な学習には結びつかなかったため、実際の改善率が低くなったと推察される。一方、提案手法群では、平均文字というなぞりやすい滑らかさをもつ手本を用いながらも、個人の癖が平均化された理想的な軌道が提示される。そのため、主観的ななぞりやすさが必ずしも過大評価につながらず、ノイズの低減を伴う実質的な筆記能力の改善が生じた結果、主観評価と客観評価の間に明確な相関が現れなかったと考えられる。

6. 制約と展望

本研究には、実験デザインおよびシステム設計に関するいくつかの制約が存在する。

第一に、提案手法を構成する各要素の学習効果への寄与を分離できていない点である。本手法では、非利き手の筆記能力を短期間で引き上げることを優先し、「平均文字を手本にしたなぞり練習」、「交互筆記」、「アニメーションフィードバック」の 3 要素を統合した。そのため、今回確認された汎化性能が平均文字による手本に起因するのか、交互筆記による運動スキルの転移によるのか、あるいはアニメーションフィードバックによる誤差認識支援の効果なのかを、厳密に切り分けて評価できていない。今後は、各要素を個別に検証する分離実験を行い、それぞれの寄与度を明らかにするとともに、コストと効果のバランスが取れた最適な練習構成を明らかにする。

第二に、実験規模と期間の制約である。参加者は大学生 20 名に限定され、実験期間も 6 日間と短い。そのため、他の年代や熟達度でも同様の効果が得られるか、また学習効果が長期的に保持されるかは未検証である。特に、非利き手の筆記能力習得は長期的なプロセスであるため、今後は数週間から数ヶ月単位での長期的な調査が求められる。

第三に、システム中のパラメータの最適化である。本実験では先行研究に基づき、アニメーションフィードバックの最大補間率を 30% に設定した。しかし、非利き手は利き手に比べて筆記のブレが大きく、より高い補間率が適している可能性や、学習の進度に応じて補間率を徐々に下げる方が自律的な筆記能力向上を促せる可能性が考えられる。今後は、個人の習熟度や学習の進度に応じて補間率を動的に最適化する仕組みの構築についても検討する。

以上の制約はあるものの、平均文字を手本とするなぞり練習が、練習していない文字にも対応できる汎用的な筆記能力の向上につながる可能性を示した点は特筆すべきである。これは、将来的な両手同時筆記の実現に向け、本手法が特定の文字に依存しない技能習得を促す有効なアプローチとなり得ることを示唆する重要な知見であるといえる。

7. おわりに

本研究では、将来的な両手同時筆記の実現に向けた第一段階として、利き手の筆記情報を活用して非利き手の筆記能力を高める練習手法を提案した。提案手法では、利き手筆跡から生成した平均文字を理想的な手本とし、左右の交互筆記による技能転移の促進と、平均文字へ漸近するアニメーションフィードバックによる誤差認識支援を組み合わせた練習環境を構築した。評価実験の結果、提案手法は従来の自筆なぞり練習と同等の学習効果を有することが確認された。また提案手法では、学習効果が練習していない文字にも及ぶ汎化性能が確認された。これは、平均文字というノイズの少ない理想的な軌道を手本とすることで、特定の文字形状に依存しない筆記技能の改善が促された可能性を示唆している。

今後は、平均文字、交互筆記、アニメーションフィードバックをそれぞれ単独・組合せで検証し、汎化性能に寄与する要因を明らかにする。また、数週間～数ヶ月の継続利用実験を通じて、学習効果の保持と両手同時筆記への発展可能性を評価する。

参考文献

- [1] Sainburg, R. L.: Convergent Models of Handedness and Brain Lateralization, *Frontiers in Psychology*, Vol. 5 (2014).
- [2] Swinnen, S. P.: Intermanual Coordination: From Behavioural Principles to Neural-Network Interactions, *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 3, No. 5, pp. 350–361 (2002).
- [3] Furuya, S. and Soechting, J. F.: Speed Invariance of Independent Control of Finger Movements in Pianists, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 108, No. 7, pp. 2060–2068 (2012).
- [4] 明崎禎輝, 川上佳久, 平賀康嗣, 野村卓生, 佐藤厚: 非利き手の書字正確性を向上させる練習方法, *理学療法科学*, Vol. 24, No. 5, pp. 689–692 (2009).
- [5] 大保景子, 大西祐哉, 大矢哲也, 川澄正史, 小山裕徳: 非利き手のための書字訓練法の検討, *情報技術フォーラム講演論文集*, pp. 677–678 (2013).
- [6] Sharma, R., Mohan, P., Kumar, D., Mirza, Y. and Yadav, I.: An Assessment of Ambidextrous Handwriting Characters: A Future Prospect for Forensic Document Examiners, *Journal of Forensic Research*, Vol. 12, No. 10, p. 476 (2021).
- [7] 中村聡史, 鈴木正明, 小松孝徳: ひらがなの平均手書き文字は綺麗, *情報処理学会論文誌*, Vol. 57, No. 12, pp. 2599–2609 (2016).
- [8] 久保田夏美, 斎藤絢基, 中村聡史, 鈴木正明: Mojivator: 平均化手法を用いた手書き練習システムによる書写行動の変化の観察, *電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS)*, Vol. 117, No. 29, pp. 157–162 (2017).
- [9] Xu, Y., Yoshida, S., Hashimoto, A. and Ushiku, Y.: VisDev: A Stroke Deviation Visualization System Using Point-Set Registration for Handwriting Training, *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '25)*, No. 574, pp. 1–7 (2025).
- [10] Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P. and Gentaz, E.: A Visuo-Haptic Device - Telemaque - Increases Kindergarten Children's Handwriting Acquisition, *Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, IEEE, pp. 72–77 (2007).
- [11] 大保景子, 大西祐哉, 大矢哲也, 川澄正史, 小山裕徳: 運筆情報を利用した非利き手の書字訓練法の検討, *LIFE2012 第32回ライフサポート学会大会*, pp. GS3–4–2 (2012).
- [12] 辻陽子, 明崎禎輝, 出田めぐみ: 非利き手による書字練習方法の検討: グリッド線を用いた模写練習方法の有効性, *日本職業・災害医学会会誌*, Vol. 64, No. 2, pp. 84–87 (2016).
- [13] Laszlo, J. I., Baguley, R. A. and Bairstow, P. J.: Bilateral Transfer in Tapping Skill in the Absence of Peripheral Information, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 2, No. 4, pp. 261–271 (1970).
- [14] Teixeira, L. A.: Timing and Force Components in Bilateral Transfer of Learning, *Brain and Cognition*, Vol. 44, pp. 455–469 (2000).
- [15] Beg, R. A., Shaphe, M. A., Qasheesh, M., Ahmad, F., Anwer, S. and Alghadir, A. H.: Intermanual Transfer Effects on Performance Gain Following Dominant Hand Training in Community-Dwelling Healthy Adults: A Preliminary Study, *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, Vol. 14, pp. 1007–1016 (2021).
- [16] 佐藤大輔, 新納真次郎, 中村聡史, 鈴木正明: 利き手・非利き手の平均手書き文字における類似性の検証, *情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)*, Vol. 2018-HCI-176, No. 20, pp. 1–8 (2018).
- [17] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R. and Wolf, P.: Augmented Visual, Auditory, Haptic, and Multimodal Feedback in Motor Learning: A Review, *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 20, No. 1, pp. 21–53 (2013).
- [18] 能宗巧, 瀬崎夕陽, 小林沙利, 関口祐豊, 中村聡史, 近藤葉乃香, 梅澤侑己, 橋本忠樹: 書き心地の改善に向けたペン先の摩擦が筆記のブレに及ぼす影響, *情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)*, Vol. 2025-HCI-211, No. 15, pp. 1–8 (2025).
- [19] 伊藤奈々美, 能宗巧, 瀬崎夕陽, 関口祐豊, 中村聡史, 近藤葉乃香, 梅澤侑己, 橋本忠樹: 筆記のブレを利用したデジタルペンの重心の違いによる書き心地推定手法, *情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)*, Vol. 2025-HCI-215, No. 34, pp. 1–8 (2025).
- [20] 漢字文化資料館: 部首のうち、一番所属文字が多いのは何ですか? <https://kanjibunka.com/kanji-faq/old-faq/q0072/> (参照: 2025/12/01) .
- [21] Schrepp, M., Hinderks, A. and Thomaschewski, J.: Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S), *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, Vol. 4, p. 103 (2017).