

ペン字学習における心理的な障壁を軽減する段階的支援システムの開発

Development of a Step-by-step Support System to Reduce Psychological Barriers in Penmanship Learning

吉原 大悟[†]
Daigo Yoshihara

伊藤 淳子[‡]
Junko Itou

1 はじめに

手書きの機会は、情報通信機器の普及や進化に伴い減少しつつある。しかし、年賀状や署名などの社会的・文化的な意味を持つ場面においては、未だに重要な手段として活用される。白岩らは、手書き文字に関する調査において、大学生、大学院生の被験者 106 名のうち 91.1% が、年賀状やメッセージカード等についてプリントアウトより手書きの方が好ましいと感じていることを明らかにした [1]。さらに整齊さ等による「読みやすさ」が、受け手に嬉しさを与える可能性を示した。

一方で、マーケティング・リサーチ会社のクロス・マーケティングが、20 代から 60 代の男女を対象に手書きについて思うことを問うた調査では「自身の字が下手になった」と感じる回答者が 32.2%、「字を綺麗に書きたい」と感じる回答者が 27.4% と、およそ 3 人から 4 人に 1 人が、自身の字形についてネガティブに捉えていることが報告されている [2]。また同調査では、前述した場面において、他人に自身の書いた文字を見られることを気にする回答者が一定数存在することも示されている。

このように、手書き文字における非言語的な情報により、手書き文字が相手へ気持ちを伝える場面で重宝される一方、書き手が自身の字形に対する苦手意識や他人に見せる抵抗感等の心理的な障壁を抱える原因となっているのが現状である。また、一般的に手書き文字を改善する方法として、習字教室等の直接指導を受けることが挙げられるが、時間や受講費用等の物理的な制約が伴う。したがって、こうした物理的な制約を解消しつつ、心理的な障壁を軽減し、自主学習により自信を持って文字が書けるようになるための学習支援の仕組みが求められる。そこで本研究では、初学者が段階的に手本に近づけられるようなペン字学習支援システムを開発する。そして、学習における心理的な障壁の軽減に寄与することを目指す。

2 手書きの学習支援に関する研究

2.1 文字バランス支援に関する研究

竹川らは、毛筆における文字バランスの感覚を育むための習字支援システムを開発した [3]。このシステムは、筆跡から文字バランスを自動採点する機能と、採点結果を視覚的にフィードバックする機能から構成されている。毛筆の筆跡は、学習者がタブレット PC 上に置いた半紙に墨筆で書いた文字を、筆に巻かれた導電性テープにより認識している。そして認識した文字を、大きさ、始点・終点・屈折点の位置、ならびにバランスの 3 つの観点から評価する。さらに、評価に応じて手本の提示内容を動的に切り替えることにより、学習者が手本から離脱できるような設計にしている。提示内容は順に、アニメーション表示、白抜き表示、点線表示、始点・終点表示、升目表示、手本提示無

しへと移行する。最終的には、学習者がシステム支援なしでバランスの良い文字が書けるようになることを目指している。

学習者が手本から離脱するために、評価に応じて手本の提示内容を切り替える手法は、教育工学分野におけるスキャフォールディング [4] の理念に近い。これは、学習者が自力で到達できない目標に対し、指導者が学習状況に応じて支援の量や質を適宜切り替えるという概念である。評価に応じて支援を変化させるアプローチは、初学者の負担を軽減し自立を促す視点で重要な指針であると考えられる。

2.2 筆跡情報に基づいてスコア化を行う研究

長井らは、タブレット PC 上で動作するペン習字支援システムを開発し、運筆情報に基づいて学習者の筆跡をスコア化する手法を提案した [5]。このシステムは、ペン入力から各画の運筆時間や筆圧、大きさ等の運筆情報を取得し、画像処理により熟達者の筆跡と比較可能な形に正規化する。そして、複数の文字からなる文字列全体と文字毎、さらに一画毎の客観的な評価を行う。また、採点結果や一画毎の比較再生、リアルタイム診断機能を通じて、学習者が自らの運筆と熟達者との差異を把握しながら反復練習できる学習環境を実現している。

2.3 手書き文字と手本の間文字を生成する研究

中村らは、文字をフーリエ級数展開によって数式化し、複数の文字の数式を周波数領域で合成することにより、各文字の間にあるような文字を生成する平均手書き手法を提案した [6]。具体的には、タブレット入力によって得られた文字の軌跡データを、フーリエ級数展開により、時間パラメータで表現可能な周期関数に変換する。そして、他の手書き文字のフーリエ係数と算術平均を取ることで、全てのサンプルとの差を平滑化した「平均文字」を生成する。平均文字に対する印象評価実験では、書き手が書いた通常の手書き文字と比較して、個人の平均文字の方が綺麗だと評価される傾向を示した。

久保田らは、この平均手書き手法を改良し、書き手の文字と手本の合成を、任意の合成比率に変更できる習字支援システム「Mojivator」を開発した [7]。Mojivator では、学習者自身が合成比率を調整することができる。合成比率の調整と中間文字の提示により、書いた文字が手本に近くなっているような視覚効果を誘発し、書字に対するモチベーションの向上を図った。

2.4 本研究の位置付け

従来のペン習字支援システムでは、筆圧、運筆速度、文字の大きさおよびバランス等を評価し、学習者へ視覚的なフィードバックを提示している。しかし、評価結果から具体的な修正方法を考え、修正後の文字をイメージする過程は学習者の能力に委ねられている。そのため、手本との乖離が大きい初学者にとっては、提示された情報から修正目標を構築すること自体が認知的な負担となる。

また、Mojivator では、平均手書き手法による文字の美化を通じたモチベーションの向上に重点が置かれている。しかしながら、学習者の比率決定による追加判断の影響や、学習者の能

[†] 和歌山大学大学院システム工学研究科, Graduate School of System Engineering, Wakayama University

[‡] 和歌山大学システム工学部, Faculty of System Engineering, Wakayama University

力に応じた段階的な支援の有効性については検証されていない。これらを踏まえて、本研究では、平均手書き手法による中間文字を用いて、ペン字学習における手本との乖離を低減するペン字学習支援システムを提案する。また、2.1 節で述べたように、システム側が段階的に提示する内容を切り替え、学習者が手本の字形を目指すことに集中できる学習環境を提供する。これにより、初学者が次に書く字形イメージを容易に構築できるように支援し、手書き文字と手本を比較・修正する際の認知的な負担の軽減、手書き文字に対する苦手意識および他人に見せる抵抗感の解消を目指す。

3 段階的に「中間見本」を生成する学習支援システム

3.1 設計方針

本研究では、ペン字初学者の心理的な障壁と、修正イメージを構築する際の認知的な負担を軽減するため、以下の方針に基づいてペン字学習支援システムを設計した。第 1 に、液晶タブレットとデジタルペンを用い、紙に近い状態で文字を書ける筆記環境を整備する。第 2 に、学習者の文字と手本を合成して「中間見本」を生成し、無理なく目指せる前段階の目標として提示する。第 3 に、見本との類似度を算出し、類似度に応じた中間見本を段階的に切り替え、学習者が次に目指すべき目標を容易に構築できるよう支援する。第 4 に、学習者が字形の修正に集中できるような UI 設計を行う。

3.2 システム構成と実験環境

提案システムは、PC、液晶タブレットおよびデジタルペンから構成される。液晶タブレットには、5080 LPI の分解能を持つ HUION Kamvas 13 (Gen 3) を用いた。PC と液晶タブレットを接続し、学習者は液晶タブレット上に表示された入力枠へ付属のデジタルペンで文字を記述する。入力枠の一边は画面上で 100 px とし、実験時の画面スケーリング設定における物理寸法は約 2.3 cm であった。紙に近い筆記感を得るため、デジタルペンにはシリコングリップを装着し、液晶タブレットの画面にはペーパーライクフィルムを貼付した。また、手の側面を画面上に置いた状態でも筆記できるよう、ペン先による入力のみを筆跡として取得する。

提案システムの練習画面を図 1 に示す。システムでは、最初に学習者の利き手等の情報を設定した後、見本なしの練習画面と見本ありの練習画面を順に提示する。見本なしの練習では、学習者が普段書いている文字の筆跡を取得し、中間見本を生成するための初期データとする。見本ありの練習では、入力枠の隣に中間見本を提示し、学習者が見本を確認しながら文字を繰り返し記述する。各試行の筆跡から類似度スコアを算出し、過去の最大スコアが更新された場合に、その時点の学習者の手書き文字と元の手本を融合し、新たな中間見本を生成する。

3.3 筆跡データの取得と前処理

筆跡データは、デジタルペンの移動に伴って得られる時系列データとして取得する。各標本点には、入力枠に対して 0.0 から 1.0 の範囲に正規化した x 座標および y 座標、標本点における筆圧レベル、ならびに筆記開始からの経過時間を記録する。取得した筆跡データは JSON 形式で保存し、同時に記述された文字画像を PNG 形式で保存する。

学習者の筆跡と手本の筆跡では、運筆速度や取得される標本点数が異なる。そこで、各筆画の点列から隣接点間の距離を累積して筆画長を求め、筆画長に対して等間隔となるように点列をリサンプリングする。提案システムでは、各筆画のリサンプリング点数を 200 点に統一する。これにより、学習者の筆跡と



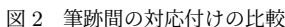
図 1 提案システムの練習画面

手本の筆跡の点列数を対応させ、後述する上達度の測定および中間見本の生成を可能にする。

3.4 類似度の測定

本研究では、手本に対する学習者の書いた文字の類似性を「上達度」と定義する。この定義は、佐藤らが手書き文字の練習過程において、手本との物理的距離の減少を技能向上の指標として用いたことに準拠している [8]。佐藤らは、手書き文字の筆画を長さに基づいて等分割し、対応する点同士のユークリッド距離の平均値を用いて、2 つの文字データの類似性を定量的に評価した。しかし、単純な等分割点同士の比較では、書き手ごとに始点から角までの長さや角から終点までの長さの比が異なる場合、形状が整っていても対応すべき特徴点にずれが生じ、不当に距離が大きくなる。また、平均値のみを用いる場合、局所的な崩れを示す差が分割点の数によって埋没する可能性がある。

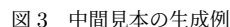
そこで本研究では、この構造的なずれを解消し、より本質的な形状評価を行うため、動的時間伸縮法 (DTW: Dynamic Time Warping) を用いる [9]。DTW では、一方の点列を時間軸方向に非線形に伸縮させながら、点列間の累積距離が最小となる対応関係を求める。等分割点同士の対応付けと DTW による対応付けの比較を図 2 に示す。図 2(a) では、筆画を等分割し、同じ



提案システムでは、DTW によって対応付けられた全ての点対におけるユークリッド距離の平均を平均距離コスト D_{avg} 、対応点間で最も大きいユークリッド距離を最大距離コスト D_{max} とする。平均距離コストは文字全体の類似性を表し、最大距離コストは一部に生じた局所的なずれを表す。両者を重み付きで加算し、式 (1) により距離コスト d を求める。

重み係数と後述するスケーリング係数 k は、書道経験者による字形の美しさに関する主観評価に整合するよう調整した。具体的には、4つの手書きサンプルに対する主観的な順位付けと類似度スコアの順位が一致し、かつ7段階評価との乖離が大きくなる条件を探索した。その結果、平均距離コストと最大距離コストの重みをそれぞれ $W_{\text{avg}} = 0.90$, $W_{\text{max}} = 0.10$ とした。

逆関数モデルを採用した背景には、技能習得プロセスにおいて一般的に知られる「練習のべき乗則」がある [10]. これは、運動技能の練習において、試行回数に対する誤差は線形に減少するのではなく、練習初期には急激に減少し、熟達するにつれて減少率が低下して一定水準に漸近するという法則である。佐藤らも、手書き文字の練習過程における手本とのユークリッド距離について、練習開始から 4 回目までは大きく減少する一方、5 回目以降は変化がなだらかになり、値が収束する傾向を確認している [8].



単純な線形変換では、練習初期の距離の減少に対して過度なスコア上昇を与える可能性がある。これに対し、逆関数モデルは、距離コスト d が大きい初期段階ではスコアの上昇を緩やかに抑え、 d が 0 に近づく熟達段階では細部の改善を敏感にスコアへ反映する。スケーリング係数 k は、前述した書道経験者の主観評価に基づいて調整し、 $k = 46.5$ とした。

中間見本の生成には、中村らが提案した平均手書き手法 [6] を用いる。前処理によって標本点を 200 点に統一した学習者の筆跡と手本の筆跡に対し、標本点の順序に対応する媒介変数を割り当て、 x 座標および y 座標の点列をそれぞれフーリエ級数展開する。これにより、各筆跡をフーリエ係数の集合として表現する。フーリエ級数の次数は、筆跡の概形を保持しながら細かな変動を抑えられるよう、 $M = 5$ とした。

$\alpha = 0$ の場合は学習者の筆跡と同一になり、 $\alpha = 1$ の場合は手本の筆跡と同一になる。合成されたフーリエ係数から座標関数を再構成することにより、学習者の筆跡特徴と手本の筆跡特徴を任意の比率で含む中間見本を生成する。

中間見本の融合比率は，学習者の類似度スコアに応じて動的に決定する．提案システムは，見本ありの練習において得られた類似度スコアを入力スコア S_{input} として取得し，それまでに得られた最大スコア S_{max} と比較する． $S_{\text{input}} > S_{\text{max}}$ の場合にのみ最大スコアを更新し，次に提示する中間見本の目標スコア S_{target} を式 (4) により設定する．

続いて、融合比率の候補集合を $D = \{0.00, 0.01, \dots, 1.00\}$ とし、各融合比率 α によって生成される中間見本の類似度スコアを $S(\alpha)$ として算出する。次の中間見本に用いる融合比率 α^* は、式 (5) により、目標スコアとの差が最も小さくなる値として決定する。

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha \in D} |S(\alpha) - S_{\text{target}}| \quad (5)$$

この処理により、学習者の能力から乖離した見本を一度に提示するのではなく、上達に伴って中間見本を段階的に手本へ近づける。また、最大スコアが更新された場合にのみ見本を切り替えることにより、一時的なスコアの低下によって見本が学習者側へ戻ることを防ぎ、学習の進行を妨げずに次の修正目標を提示する。

4 提案システムの評価実験

4.1 実験目的

前章において、学習者の学習状況に応じて中間見本生成を行うペン字学習支援システムを提案した。本章では、提案システムの有効性を検証するための比較実験について述べる。比較対象とする手法は次の3つである。1つ目は中間見本を提示する提案手法、2つ目は元の手本を提示する手本視写手法、そして、3つ目は学習者の記入枠に手本のなぞり線を表示するなぞり書き手法である。各手法に被験者を割り当て、学習中の手本との類似度スコアの推移をそれぞれ分析する。また、各手法を利用した学習前と学習後に、3つの観点に基づくアンケート調査を行う。そして、学習中の上達実感および心理的負担感と、学習前後の自身の手書き文字に対する意識の変容を確認する。これらにより、提案手法が手本と見比べる際の心理的な負担の軽減および手書き文字への苦手意識の解消に寄与することを検証する。

4.2 比較実験の詳細

4.2.1 被験者の選定

実験では、ペン字学習に関する経験が少なく、自身の手書き文字に心理的な障壁を持つ者を対象とした。はじめに、20代の男女42名を対象として、ペン字や書道等の学習経験と、自身の手書き文字に対する意識を確認する事前アンケートを実施した。学習経験については、経験年数が3年以下であり、最後に手習いをしてから5年以上が経過している者を対象とした。

心理的な障壁については、「自身の文字に苦手意識がある」こと、および「自身の文字を他者に見せることに抵抗がある」ことに関する2項目を5段階で評価した。評価は、1を「まったく当てはまらない」、2を「当てはまらない」、3を「どちらともいえない」、4を「当てはまる」、5を「非常に当てはまる」とした。いずれかの項目に4または5と回答し、学習経験に関する条件を満たした24名を被験者として選定した。内訳は男性18名、女性6名であった。

選定した被験者を、手本視写群、なぞり書き群ならびに提案群の3群へ8名ずつ割り当てた。群間で心理的な障壁の程度に偏りが生じないよう、事前アンケートにおける2項目の評価値の合計を用いて割り当てを調整した。

4.2.2 比較手法

手本視写群では、完成された手本を入力枠の近傍に提示し、被験者が手本を見ながら同じ文字を記述する。練習中に提示する手本は変化させない。なぞり書き群では、入力枠内に半透明の完成手本を提示し、被験者が手本の筆跡をなぞるように文字を記述する。提案群では、第3章で述べた提案システムを用い、被験者の類似度スコアに応じて段階的に変化する中間見本を提示する。以上の3手法を比較することにより、完成手本の視写、筆跡への直接的な誘導ならびに中間見本による段階的な支援の違いを検証する。

4.2.3 課題文字

課題文字には漢字の「美」を用いた。「美」は、横画の等間隔配置などの正確さと、上下の重心を揃える文字の構成力を評価

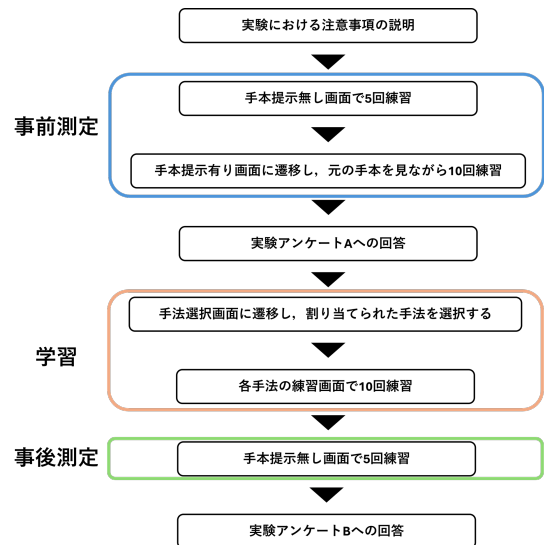


図4 実験の流れ

できるため選定した。全ての試行で同一の課題文字を使用し、手法間で練習回数と記述条件を統一した。

4.2.4 実験手順

実験の流れを図4に示す。はじめに、被験者へ実験の流れとシステムの操作方法を説明し、デジタルペンと液晶タブレットによる筆記に慣れるための確認を行った。その後、初期状態を測定するため、被験者は見本を提示しない状態で課題文字を5回練習した。続いて、被験者は完成手本を提示した状態で10回練習し、手本を参照した場合の学習前の状態を測定した。測定後、事前アンケートであるアンケートAを実施した。

次に、被験者は、それぞれに割り当てられた手本視写、なぞり書き、または提案手法のいずれかを用いて、課題文字を10回練習した。学習段階の終了後、被験者は補助を完全に除去した状態で課題文字を5回練習し、事後測定とした。最後に、事後アンケートであるアンケートBを実施した。

4.3 評価方法

4.3.1 評価指針

本研究では、客観評価と主観評価の2つの観点から提案手法を評価する。客観評価では、各試行で取得した筆跡データに対して、第3章で述べたDTWに基づく類似度スコアを算出する。特に、学習段階におけるスコアの推移と、補助を除去した事後測定におけるスコアを手法間で比較し、技能の向上と定着を評価する。

主観評価には、事前測定後に実施するアンケートAと、事後測定後に実施するアンケートBを用いる。各設問は原則として7段階で評価し、1を「全くそう思わない」、2を「そう思わない」、3を「あまりそう思わない」、4を「どちらともいえない」、5を「少しそう思う」、6を「そう思う」、7を「非常にそう思う」とした。一部の設問には、評価の理由を尋ねる自由記述欄を設けた。

4.3.2 アンケート内容

アンケートAとアンケートBには、学習前後の変化を比較するため、共通する8項目を設定した。これらは、NASA-

表 1 実験アンケートの共通項目

質問項目	質問文
(1)	この書字課題は、頭をかなり使う作業だと感じた
(2)	この書字課題をしている時、精神的に疲れる、またはしんどいと感じた
(3)	見本文字と自身の手書き文字の乖離により、しんどいと感じた ((2) で 5 以上を回答した方のみ回答)
(4)	この書字課題では、見本通りの文字を書くことができた
(5)	この書字課題では、納得のいく文字を書くことができた
(6)	この書字課題を通して、自分の字が上達したと感じた
(7)	手本と見比べて、どこをどのように修正するべきかについて説明できる
(8)	提示された見本は、目指しやすい目標だと感じた

TLX[11, 12] を参考に、学習時の精神的な負担、手本と入力枠を見比べる際の負担、手本に沿った文字および学習成果の自己評価、自身の文字が上達したという実感、修正箇所の言語化、ならびに提示された見本の受容性を確認する内容で構成した。なお、NASA-TLX の質問文をそのまま使用するのではなく、ペン字学習中の精神的な負担を確認する項目として参考にした。被験者に提示した質問文を表 1 に示す。

アンケート B では、共通項目に加えて、学習後に整齊な文字を書けるようになったと感じるか、自身の手書き文字に対する苦手意識があるか、自身の文字を他者に見せることに抵抗があるか等を尋ね、心理的な障壁の変化を評価した。また、学習中に感じたことや、使用した練習手法に対する意見を自由記述で求めた。

提案群に対しては、中間見本が上達に伴って段階的に変化していたことを知覚できたか、中間見本を次に目指す目標として理解しやすかったか、およびそのように評価した理由を追加で尋ねた。さらに、手や指の身体的な疲れ、デバイスおよびシステム UI の使用感について、口頭でも意見を収集した。

4.4 実験結果と考察

4.4.1 類似度スコアによる客観評価

手法ごとの類似度スコアの推移を図 5 に示す。同図は、各練習回数における手法ごとの平均類似度スコアを示した折れ線グラフであり、横軸は練習回数、縦軸は類似度スコアを表す。また、各手法の折れ線の周囲に薄く色付けした範囲は、各練習回数における類似度スコアの最小値から最大値までの範囲を表し、被験者間のばらつきを示している。

学習段階および事後測定における各群の平均類似度スコアと回帰直線の傾きを表 2 に示す。各群における類似度スコアの平均値を、見本なしの事前測定、完成手本ありの事前測定、学習段階および補助なしの事後測定、4 段階に分けて比較した。手本なしおよび手本ありの事前測定では、3 群はおおむね同程度のスコアを示した。

学習段階では、手本視写群のスコアは大きく変化せず、なぞり書き群では他群と比較して大きく上昇した。一方、提案群では、完成手本から中間見本へ切り替わった直後にスコアが約 0.41 から約 0.31 まで低下し、学習段階全体の平均スコアも事前測定の結果を下回った。学習段階における回帰直線の傾きは、手本視写群 0.0021、なぞり書き群 0.0031、提案群 0.0007 であった。3 群の傾きについて Kruskal-Wallis 検定を行った結果、統計的に有意差は確認されなかった ($p > 0.05$)。したがって、学習段階において提案手法による明確な技能向上は確認できなかった。

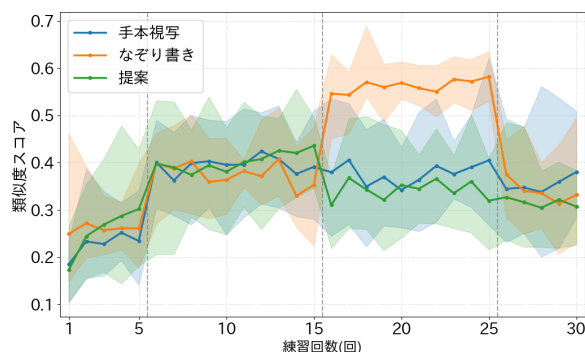


図 5 手法ごとの類似度スコアの推移

表 2 学習段階・事後測定の平均類似度スコアと傾き

群	実験段階	平均	傾き
手本視写	学習段階	0.3776	0.0021
	事後測定	0.3540	0.0083
なぞり書き	学習段階	0.5630	0.0031
	事後測定	0.3393	-0.0114
提案	学習段階	0.3422	0.0007
	事後測定	0.3154	-0.0035

補助を除去した事後測定では、なぞり書き群の平均スコアが学習段階の 0.5630 から 0.3393 へ大きく低下した。事後測定における回帰直線の傾きも -0.0114 であり、試行を重ねるにつれてスコアが低下した。手本視写群では、学習段階から事後測定にかけてスコアが低下したものの、事後測定内の傾きは 0.0083 であり、上昇傾向を示した。提案群では、学習段階から事後測定にかけて平均スコアが低下したが、事後測定内の傾きは -0.0035 であり、なぞり書き群と比較して低下が小さかった。事後測定における傾きについて 3 群を比較した結果、5% 水準での有意差は確認されなかったが、有意傾向が認められた ($p = 0.0898 < 0.10$)。

4.4.2 アンケートによる主観評価

表 1 に示したアンケート A およびアンケート B の 8 つの共通項目について、手法間および学習前後の評価分布を比較し

表3 段階的変化の受容性に関する評価

質問項目	評価分布							中央値	最頻値
	1	2	3	4	5	6	7		
(a)	1	2	1	1	2	0	1	3.5	2, 5
(b)	0	1	1	1	2	2	1	5.0	5, 6

表4 心理的な障壁の有無に関する評価

群	評価分布							中央値	最頻値
	1	2	3	4	5	6	7		
手本視写	1	3	2	0	2	0	0	2.5	2
なぞり書き	0	2	3	1	2	0	0	3.0	3
提案	0	2	1	1	2	2	0	4.5	2, 5, 6

た。精神的な負担、学習成果に対する自己評価、修正箇所の理解、ならびに提示された目標の受容性に関する各項目について Steel-Dwass 検定を行った結果、統計的な有意差は確認されなかった ($p > 0.05$)。このため、アンケート結果から提案手法が他手法よりも認知的な負担を軽減したと断定するには至らなかった。

段階的変化の受容性に関する評価を表3に示す。提案群に追加した設問 (a)「手本は上達実感に伴って段階的に変化していた」では、評価中央値は3.5、最頻値は2および5であり、回答が肯定側と否定側に分かれた。一方、設問 (b)「手本は次に目指す具体的な形として適切だった」では、評価中央値は5.0、最頻値は5および6であり、中間見本を次の目標として肯定的に評価する回答が多かった。

自由記述回答では「最初から完璧な文字を目指すのではなく、段々見本が上手になっている気がして練習しやすかった」との意見を得た。その一方で「あまり変化したように感じなかった」との回答も得られた。また、中間見本の変化を認識した被験者からも、どの部分がどのように変化したかは分かりにくかったとの意見が得られた。以上より、中間見本を到達可能な目標として受容した被験者が存在する一方、見本の段階的な変化を十分に知覚できない被験者も存在した。

心理的な障壁の有無に関する評価を表4に示す。質問文は「自身の手書き文字に対する苦手意識はない」である。評価中央値は手本視写群2.5、なぞり書き群3.0、提案群4.5であり、提案群が最も高かった。提案群では評価5および6の回答も見られ、他群と比較して肯定側へ広がる分布を示した。一方、Steel-Dwass 検定の結果、群間に統計的な有意差は確認されなかった ($p > 0.05$)。また、自身の文字を他者に見せることへの抵抗感に関する質問についても、群間の有意差は確認されなかった。

4.4.3 考察

技能の向上と定着：提案群では、完成手本から中間見本へ切り替えた直後にスコアが低下し、学習段階における明確なスコアの上昇も確認されなかった。このことから、第3章において述べた方法により設定した中間見本が、短期間で手本との形状類似度を向上させる支援として有効であることは確かめられなかった。その理由に、学習者自身の筆跡特徴を含む中間見本へ切り替わったことにより、完成手本に合わせていた運筆を再構成する必要が生じ、一時的にスコアが低下した可能性がある。

一方、なぞり書き群では、半透明の手本を直接なぞることに

よって学習段階のスコアが大きく上昇したが、補助を除去した事後測定ではスコアが大きく低下した。これは、学習中の高い類似度が、補助なしで文字を構成する技能として十分に定着しなかった可能性を示している。これに対し、提案群では事後測定におけるスコアの低下が小さかった。提案手法では、中間見本を参照しながらも学習者自身が各筆画の位置や文字全体のバランスを判断して記述する必要がある。この練習過程が、補助を除去した後にも利用できる運筆技能の定着に寄与した可能性がある。ただし、5%水準での有意差は確認されておらず、提案手法による技能定着効果を断定することはできない。

中間見本の受容性と認知的な負担：中間見本を次に目指す具体的な形として評価する設問では、肯定的な回答が多く、自由記述からも、完成手本を最初から目指す場合より練習しやすいと感じた被験者が存在することが分かった。学習者自身の筆跡特徴を残した中間見本が、現在の技能から到達可能な現実的な目標として機能し、手本との差から修正イメージを構築する際の認知的な負担を軽減した可能性がある。

一方、中間見本の段階的な変化に関する評価は被験者間で分かれ、変化を知覚できなかったとの回答もあった。実際に、中間見本の切り替え回数が少ない被験者や、切り替え前後の形状差が小さい被験者が存在した。そのため、類似度スコアの更新条件、目標スコアに加算する値、および融合比率の変化量については、学習者が次の修正箇所を認識できるように調整する必要がある。

心理的な障壁：自身の手書き文字に対する苦手意識の有無を問う設問では、提案群の評価中央値が最も高く、肯定側の回答者数も多かった。提案手法は、完成された手本だけを正解として提示するのではなく、学習者自身の筆跡特徴を残しながら段階的に中間見本の形状を変化させる。この提示方法が、現在の文字を全面的に否定せずに改善する過程を示すと捉えられ、学習者の自己受容を促した可能性がある。

しかし、共通項目および心理的な障壁に関する項目の全体を通して、群間に統計的な有意差は確認されていない。また、これらの結果は各群に8名を割り振り、課題文字は「美」の1文字の限定的な条件における、短期間の練習による評価であり、心理的な障壁の継続的な変化を確認するには十分ではない。したがって、本結果は提案手法が心理的な障壁を軽減したことを示すものではなく、軽減に寄与する可能性を示唆する結果として位置付ける。今後は、被験者数と課題文字を増やすとともに、長期的な利用を通じて技能と心理的な障壁の変化を検証する必要がある。

5 おわりに

本研究では、ペン字学習における初学者の心理的な障壁の軽減と、認知的な負担の少ない技能習得を目的とし、学習状況に応じて中間見本生成を行うペン字学習支援システムを開発した。提案システムでは、学習者の手書き文字と手本の類似度を動的な時間伸縮法を用いて算出し、その評価に基づいて、学習者の筆跡特徴と手本の特徴を融合した中間見本を生成および提示する機能を実装した。これにより、手本との乖離が大きい初学者に対し、段階的な目標提示を行い、修正イメージの構築を支援することを目的とした学習環境を構築した。システムの有効性を検証するため、既存手法である手本視写およびなぞり書きとの比較実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 学習中の認知的負担感について

中間見本の提示により、手本との乖離を小さくし、学習者が無理なく到達できる前段階の目標を提供した。他手法との間に統計的な有意差は認められなかったものの、記述回答からは、中

間見本が次に目指す目標として受容され、次に書く文字の修正イメージ構築にかかる認知的な負担が軽減された可能性が示唆された。

2. 上達実感への寄与と技能の定着について

なぞり書き手法では、学習段階で高い上達実感が得られたものの、補助除去後に技能が低下する傾向が見られ、技能の定着に課題が示された。対して提案手法は、学習段階でのスコア上昇は限定的であったものの、事後測定への移行に伴うスコアの低下はなぞり書き手法と比較して小さかった。これは、自身の筆跡を基に学習を行い、補助の有無に左右されにくい運筆技能が保持されたためであると考えられる。

3. 心理的な障壁の低減について

提案手法では、他手法と比較して、自身の文字に対する苦手意識および他人に文字を見せる抵抗感の低減に寄与する可能性が示唆された。統計的な有意差までは確認されなかったが、自身の筆跡特徴を残した中間見本を用いた学習は、完成手本からの乖離を和らげ、学習者の自己受容を促す可能性があると考えられる。

今後の課題として、中間見本の更新頻度や変化量を学習者の知覚特性に合わせて最適化することが挙げられる。そして、その調整が学習効果および変化の知覚に与える影響を定量的に再検証する必要がある。また、より良いペン字学習支援手法を実現するためには、比較実験において一部有効性が確認されたなぞり書き手法の誘導効果を学習初期段階に取り入れる等、他手法の利点と組み合わせた支援モデルについて検討する必要がある。

参考文献

- [1] 白岩ゆき, 菅野陽太郎, 押木秀樹: 手書き文字におけるパラ言語的機能としての規範性と個性等について—うれしさを感ぜさせる要素からの検討—, 書写書道教育研究, Vol.30, pp.21–30 (2015).
- [2] Cross Marketing: 手書きに関する調査 (2025 年), 入手先 <https://www.cross-m.co.jp/report/trend-eye/20250611handwritten> (2026/1/19 確認)。
- [3] 竹川佳成, 平田圭二: 臨書初級者のための文字バランス学習支援システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.8, pp.1861–1870 (2016).
- [4] David Wood, Jerome Seymour Bruner and Gail Ross: The Role of Tutoring in Problem Solving, Journal of Child Psychology and Psychiatry, Vol.17, No.2, pp.89–100 (1976).
- [5] 長井孔明, 越智洋司: タブレット PC を用いた運筆情報と画像処理によるペン習字上達支援方法の検討, 教育システム情報学会研究報告, Vol.34, No.2, pp.19–26 (2019).
- [6] 中村聡史, 鈴木正明, 小松孝徳: 平均文字は美しい, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, pp.32–39 (2014).
- [7] 久保田夏美, 斉藤絢基, 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, 電子情報通信学会技術研究報告 (HCS), Vol.117, No.29, pp.157–162 (2017).
- [8] 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).
- [9] Hiroaki Sakoe and Seibi Chiba: Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.26, No.1, pp.43–49 (1978).
- [10] Allen Newell and Paul Schlosser Rosenbloom: Mechanisms of Skill Acquisition and the Law of Practice, Cognitive Skills and Their Acquisition, Psychology Press, pp.1–55 (1981).
- [11] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, Theoretical Research, Advances in Psychology, Vol.52, pp.139–183 (1988).
- [12] 芳賀繁, 水上直樹: 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定—各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度—, 人間工学, Vol.32, No.2, pp.71–79 (1996).