

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

能宗 巧¹ 瀬崎 夕陽¹ 小林 沙利¹ 関口 祐豊¹ 中村 聡史¹
近藤 葉乃香² 梅澤 侑己² 橋本 忠樹²

概要: デジタル端末上での手書きで用いるタブレット PC やスタイラスペンなどの電子機器は、その素材を容易に変更できないため、アナログの手書きに比べ書き心地が限定的であり、ユーザの嗜好や用途に適した機器に出会えないことが多い。中でも、タブレットとペン先の摩擦は書き心地に大きく影響するが、従来のペーパーライクフィルムによるタブレット側での摩擦付与による書き心地改善には、視認性や操作性の問題が残る。そこで本研究では、ペン先の摩擦が手書き時に得られる感覚に及ぼす影響を調査し、その客観的評価手法として手書きのブレの妥当性を検討した。実験では、摩擦の異なるペン先を用いて、文字の筆記や図形の削除を行うタスクを実施し、主観評価と手書きのブレの相関を比較した。その結果、両タスクにおいて全体では強い相関がみられなかった一方で、個別の参加者や特定の文字においては摩擦特性が書き心地と手書きのブレに影響を与える可能性が示唆された。

1. はじめに

スマートフォンやタブレット PC の普及に伴い、デジタル端末上でのペン入力による手書きが一般化している [1]。デジタル端末を利用したノートテイキングは紙媒体に比べ、内容の編集や他者との共有が容易であるという利点を持つ一方、アナログ筆記具のような多様な書き心地を提供できていないとの指摘がある [2] [3]。

紙媒体では、素材や加工方法によって感触が大きく異なり、鉛筆やボールペン、万年筆など多様な素材や構造を有する筆記具が存在する。この多様性により、ユーザは個人の嗜好や用途に応じた書き心地を選択できる。

一方で、タブレット PC やスタイラスペンなどの電子機器は、その素材や構造を容易に変更することができず、書き心地が限定的であることが課題となっている。デジタル端末上での手書きにおいて、タブレット画面とペン先の摩擦が書き心地に大きく影響することが知られている [2] [4]。摩擦を改善する手段としてペーパーライクフィルムが存在するものの、フィルム表面に特殊な加工を施すため、視認性や操作感度の低下が課題となっている。また、フィルムの貼り替えが容易でないため、様々なフィルムを気軽に試すことができない。一方で、スタイラスペンのペン先は簡

単に交換できるため、素材や構造を変更することで摩擦を調整できる可能性がある。しかし、市販のペン先は摩擦特性のバリエーションが限られており、ユーザの選択肢が限られているのが現状である。

ここで、デジタル端末上での手書きは筆記データを計測・分析できるため、主観的な感覚だけでなく、数値的・客観的な手法によってユーザごとに適切な摩擦特性を判断できる可能性がある。中村ら [5] は、手書き文字に生じるブレを、ユーザが理想とする文字と実際に書かれる文字の違いとして捉え、そのブレを小さくするために、デジタル端末上での手書きから取得した点列データを用いて手書き文字の平均化を行った。その結果、平均化された文字はユーザの理想文字に近いものであることが示された。一方で、筆記時に用いたペンが滑りやすく、ユーザが思った通りの文字を書くことができなかった可能性を示唆していた。このことから、筆記時の摩擦が手書き文字のブレを生じさせる要因として影響している可能性が考えられる。

そこで我々は、「手書きを行った際にブレが小さい筆記具のペン先の摩擦特性は、使用者にとって満足度の高い書き心地を提供する」という仮説を立てる。ブレの比較対象である理想文字は、個人の主観的なイメージに基づくため、直接的なデータとして扱うことは困難である。しかし、実際に筆記された文字から生成された平均化文字は理想文字に近似し、かつ数値的に表現可能である [5]。したがってここでは、筆記された文字とその平均化文字の差異を筆記

¹ 明治大学
Meiji University

² 株式会社パイロットコーポレーション
PILOT Corporation

のブレとみなす。

本研究では、摩擦の異なるペン先を有するスタイラスペンを用いて、複数の文字を筆記および削除する実験を通じてこの仮説を検証する。そのため、収集した手書きデータからブレを算出し、実験中に複数回実施したアンケートからペン先の摩擦による書き心地の違いなどの調査を行う。

2. 関連研究

2.1 書き心地と摩擦特性に関する研究

デジタル端末上での手書き入力、紙とペンを用いたアナログ手書きと比較して、書き心地に違和感を覚えるユーザが多いことが報告されている。

Camporro ら [2] は、スタイラスペンとディスプレイ間の摩擦の不一致が、自然な筆記感覚を妨げていると指摘している。また、スタイラスペンの形状や重さの選択肢が限定的であるといった、デジタルツールの柔軟性や選択肢の少なさが、ユーザの個性的な表現を制限していると述べている。Annett ら [3] は、デジタル端末上での手書きが自然な筆記感覚を妨げる主な要因として、デジタル端末間の摩擦の不一致に加え、アナログ手書きに比べ摩擦が小さすぎることをあげている。また、スタイラスペンのデザインにおいてユーザのカスタマイズ性や選択肢の多様性が重要であり、それによって筆記作業との強い結びつきを生み出し、より自然な筆記が実現できる可能性を示唆している。

また、書き心地に影響を与える摩擦力は振動や音と深く結びついており、その性質は摩擦する2つの表面の素材特性に大きく依存する [6]。これはデジタル端末上での手書きでも同様であり、スタイラスペンとタブレットの表面間で摩擦力が発生し、人々は手から筆記感覚を得る。デジタル環境でアナログ筆記具の摩擦特性を再現する試みとして、Cho ら [7] は、振動と音を組み合わせるリアルな触覚フィードバックを提供する RealPen を開発した。これは一般的なスタイラスペンと比較して、アナログの筆記具により近い書き心地を実現している。渡邊ら [8] は、視覚的なフィードバックを用いてデジタル端末上での手書きに独自の書き心地を加える味ペンを提案した。このシステムでは、視覚情報を活用して触覚を模倣する VisualHaptics の手法を応用しており、従来のペイントソフトウェアでは得られない新しい書き心地を生み出している。

タブレットの摩擦特性について、西村ら [9] は、一般のタブレットやフィルム表面の滑りやすさに関する評価が経験則や主観的な判断に依存している点を指摘し、各フィルムの算術平均粗さと動摩擦係数を定量的に測定した。その結果、表面の摩擦特性がユーザの操作精度や筆記速度に影響を及ぼすことを明らかにしている。また、Gerth ら [4] は、書字面の違いが筆記性能に及ぼす影響をタブレットと紙で比較し、滑らかなタブレット表面が筆記速度を向上させる一方で、筆記の質や固有受容フィードバックの減少と

いう課題をもたらすと述べている。さらに、Heintz ら [10] は、タブレット上でアルキメデスの螺旋をトレースする課題を通じて、表面の摩擦特性が筆記精度に与える影響を評価しており、摩擦が高い表面が筆記精度の向上に寄与することを示している。このように、正確な筆記には高摩擦が適している一方で、筆記速度の向上には低摩擦が適している傾向がみられ、用途に応じて適切な摩擦は異なる可能性が考えられる。

2.2 行動データによる推薦に関する研究

ユーザの行動データを活用した個人向けの推薦システムは、個別化された体験の提供を目的としており、様々な分野でその有用性が示されている。

Boppana ら [11] は、4D スキャンと形状モデリングを用いて歩行中の足形状をモデル化することで、個々の足に最適な靴を推薦している。また、Quesada ら [12] は、サイクリング中の膝角度とサドルの高さの関係を分析し、個々にとって最適なサドルの高さを推薦するシステムを提案しており、ユーザの怪我のリスクを最小化しつつ効率的なパフォーマンスを引き出すことを目指している。

アナログ筆記具の分野においても、行動データに基づく推薦技術は導入されている。例えば、パイロット社ではユーザの筆圧や筆記特性を測定し、それに基づいて最適な万年筆を推薦するシステムを展開している [13]。このような取り組みは、ユーザ個々人の書き心地や嗜好に応じた筆記具選を支援する点で大きな意義を持つ。

しかし、デジタルペンやスタイラスペンにおいて、行動データを活用した推薦システムの研究は少ないのが現状である。スタイラスペンの摩擦特性や書き心地がユーザの筆記パフォーマンスに与える影響を定量的に評価し、それを基に個別に適したデジタルペンを推薦する仕組みの構築は、未解決の課題である。

3. 実験

3.1 実験概要

本研究では、「手書きを行った際にブレが小さい筆記具のペン先の摩擦特性は、使用者にとって満足度の高い書き心地を提供する」という仮説を検証するため、摩擦特性の異なるペン先を用いて筆記実験を行う。実験では、筆記時に取得したデータをもとに書き心地について定量的に評価するとともに、筆記直後に実施するアンケートを通じて書き心地などの主観的評価を収集し、それらと定量的評価の関係性に関する分析を行う。

3.2 ペン先の摩擦の定量的測定

本実験で用いるペン先の摩擦特性を明らかにするため、摩擦に関連するデータを定量的に測定した。具体的には、現行のスタイラスペンで使用されている、素材や構造の異

表 1 ペン先の摩擦特性の測定結果

ペン先の種類	平均動摩擦係数	平均動筆記抵抗	平均動筆圧
市販プラチップ A	0.241	0.542	2.241
市販プラチップ B	0.208	0.460	2.216
市販プラチップ C	0.638	1.377	2.163
市販フェルトチップ	0.388	0.883	2.277
市販エラストマーチップ	0.652	1.482	2.272
市販チタン合金チップ	0.221	0.498	2.259
エラストマー試作品	0.974	1.634	2.101

なるペン先 6 種類（市販プラチップ A, 市販プラチップ B, 市販プラチップ C, 市販フェルトチップ, 市販エラストマーチップ, 市販チタン合金チップ）と、より高い摩擦を求めて試作したペン先 1 種類（エラストマー試作品）を含む 7 種類のペン先を対象とした。測定項目として、各ペン先の動筆記抵抗、動筆圧の 2 項目を測定し、そこから動摩擦係数を導出し、特に動摩擦係数を本実験における実験因子として用いることとした。測定条件は、荷重 220 g, 筆記角度 70°, 筆記速度 4.0 m/min であり、使用フィルムは「東レ S10*1」とし、Dr.Grip Digital for Wacom*2の外装を用いて、各ペン先を差し替えて 3 回ずつ測定した。

表 1 に示した測定結果の平均値では、各ペン先の平均動摩擦係数が 0.208 から 0.974 の範囲で分布していることが確認された。市販プラチップ A (0.241) や市販プラチップ B (0.208) は低い動摩擦係数を示し、滑らかな筆記感を提供すると考えられる。これらのペン先は、滑らかな筆記感を好むユーザーや滑らかさを重視する用途に適している可能性がある。市販チタン合金チップ (0.221) も低い動摩擦係数を示し、滑らかな操作感を提供する一方で、他のペンとは異なる書き心地が期待できる。また、市販フェルトチップ (0.388) は中程度の動摩擦係数を示し、滑りやすさと安定性のバランスが取れていると考えられる。市販プラチップ C (0.638) と市販エラストマーチップ (0.652) は高めの動摩擦係数を示し、筆記時にしっかりとした抵抗感を提供すると考えられる。このようなペン先は、筆記中の安定性が求められる場面で適している可能性がある。エラストマー試作品 (0.974) は最も高い動摩擦係数を示し、特に滑りにくさを重視した設計通りとなっていた。この特性により高い安定性が期待されるが、滑らかさが足りず、書き心地を損なう可能性も考えられる。

以上の測定結果を踏まえ、特徴の異なる 7 種類のペン先を使用して筆記実験を行い、摩擦特性が筆記中のブレや書き心地に与える影響を調査する。

3.3 タスク設計

本実験では、7 種類のペン先を用いて文字の筆記を行う。

*1 https://www.films.toray/products/lumirror/lum_001.html#grade

*2 <https://estore.wacom.jp/ja-JP/products/accessories/cp202a02a.html>

ここで、用途に応じて適切な摩擦特性が変化する可能性が関連研究 [4] [9] [10] で示唆されたため、本実験では、文字の筆記だけではなく、筆記に並ぶ基礎的な用途である削除を行うタスクを実施することでその検証を行う。

筆記タスクでは、実験参加者に日本語の文字「あ」と「永」をそれぞれ普段通りの姿勢および速度で 10 回ずつ筆記してもらうこととした。文字の選定理由は以下の通りである。

- **あ**：ひらがなの基本となる文字であり、筆記における基本的な筆運びを確認できる。また、単純な構造でありながら、曲線やはらいなどの要素を含む。
- **永**：永字八法と呼ばれるように、この字には書に必要な技法 8 種が全て含まれているとされる。そのため、とめ、はね、はらいといった多様な筆技を有しており、各ストロークごとの筆記特性を詳細に観察することができる。

なお、筆記のブレ算出時に行う平均化手法のため、画数および筆順を統一する必要があることを事前に説明し、画数や筆順の修正が必要な場合以外は書き直しを行わないよう指示した。

削除タスクには様々なものが考えられるが、今回は削除のブレを算出する際の計算を単純化するため、実験参加者に画面上に表示された円をペン先ごとに 10 回ずつ削除するものを用意した。このタスクでは、円全体を確実に消去するとともに、なるべくはみ出しを抑えるよう意識するよう指示した。

3.4 実験システム

筆記タスクを行う際の画面例を図 1 に示す。画面中央の白い領域 (800×800 ピクセル) がキャンバスであり、その内部で筆記を実施する。キャンバス内の描画にはアンチエイリアス処理を施しており、ストロークの縁が滑らかに表示されるよう工夫されている。画面左下の「やり直す」ボタンを押すと、タスクの残り回数を減らさずにキャンバス内の全ストロークを削除可能である。画面右下の「保存する」ボタンを押すと、キャンバス内のストロークの xy 座標、筆圧、実行時間のデータを JSON 形式で保存し、ストロークを含めたキャンバス画像を PNG 形式で保存する。なお、実験参加者が現在の画数を確認できるよう画面内に現在の画数を表示した。

削除タスクの実施画面を図 2 に示す。キャンバスの中央に、削除対象である直径 240 ピクセルの円を表示している。削除を行うキャンバス内部の背景色は RGB 値 (255, 255, 255) で、削除ストロークの色を RGB 値 (254, 254, 254) とすることで、ひとには識別できないが、システムはその違いを識別可能なものとし、削除量を計算可能とした。なお、ストロークのデータは筆記タスクと同様に保存され、

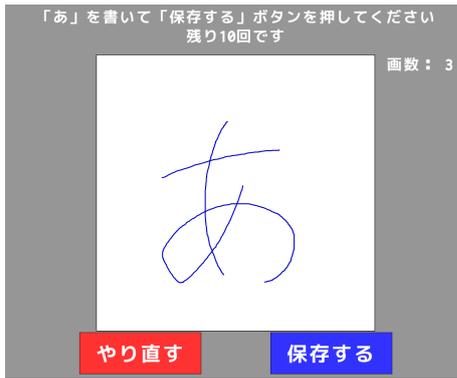


図 1 筆記タスク実施画面

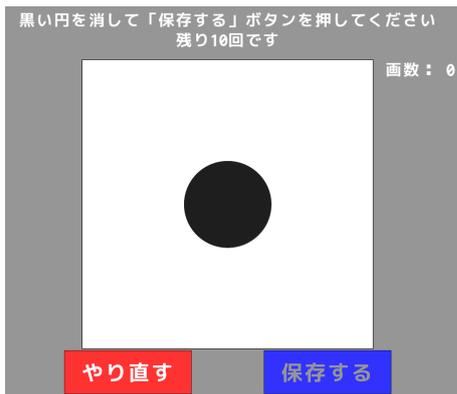


図 2 削除タスク実施画面

削除後のキャンバスも同時に PNG 画像として保存することで、はみだしたピクセル数を定量的に評価する。

3.5 主観的評価アンケートの評価項目

各ペン先の使用直後に、実験参加者には主観的評価アンケートへの回答を求めた。表 2 にその質問内容を示す。アンケートは 5 段階評価方式とし、追加で用意した自由記述欄には、特筆すべき感想や意見、気づいた点などを任意で記入してもらった。

表 2 タスク中に実施するアンケートの評価項目

タスク	質問内容
筆記	全体的な書き心地について、どのように感じましたか？ 「とめ」の書き心地について、どのように感じましたか？ 「はね」の書き心地について、どのように感じましたか？ 「はらい」の書き心地について、どのように感じましたか？ 筆記時の滑りやすさについて、どのように感じましたか？ 普段通りの筆記ができましたか？ 筆記感覚は紙（アナログ）にどれくらい近かったですか？
削除	消しやすさについて、どのように感じましたか？ 削除時の滑りやすさについて、どのように感じましたか？ どの程度正確に消せましたか？

3.6 実験手順

実験は以下の手順で行った。

- (1) 実験参加者に実験の目的と手順を説明し、同意を得たうえで、利き手などの情報を収集する。

- (2) 7 種類のペン先をランダムな順序で渡し、下記のタスクをそれぞれ行ってもらう。

- 筆記：指定された文字（「あ」「永」）を 10 回ずつ筆記
- 削除：画面上に表示された円を 10 回ずつ消去

- (3) 各ペン先の使用直後に、書き心地や消しやすさなどに関するアンケートに回答してもらう。

3.7 実験用手書きアプリケーション

本実験では、筆記データと操作ログの記録を目的とした独自の手書きアプリケーションを開発した。開発には Processing4.3 を使用し、Windows 11 を搭載したラップトップ PC (Dell Inspiron 14) 上で動作させた。これとタブレット端末 (Wacom One 液晶ペンタブレット 12) を接続し、スタイラスペンによる入力に対応させ、タブレット画面上で筆記および削除タスクを実施できるようになっている。

実験中にペン先の種類を変更する際には、アプリケーション上で使用するペン先を選択する。これにより、ペン先の変更に伴うデータ管理や分析の手間が軽減され、実験の再現性や効率性が向上する。また、ペン先の使用順序はアプリケーション内でランダム化し、ペン先の交換手順やアプリケーションの操作方法については、事前に実験参加者へ詳細な説明を行った。

3.8 実験デザイン

本実験では、多様な筆記特性を含む集団を確保することを目的とし、まずは利き手が右手と左手の実験参加者を同数参加募集することを目指した。これは、右利きの場合は左から右へのストローク、左利きの場合は右から左へのストロークで筆圧が低下する傾向があるためであり [14]、そうした違いがペン先とストロークのブレに影響を及ぼすと考えられるためである。また、筆圧についても多様性をもたせるため、一般的に男性は女性に比べ筆圧が高い傾向があるとされていることを利用し、男女同数を実験参加者として募集することとした。

上記の点を考慮し、男女それぞれ右利き 5 名、左利き 5 名の計 20 名を実験参加者として募集した。

4. 結果

4.1 主観的評価アンケートに関する結果

タスク終了後すぐに実施したアンケート結果について、項目とペン先ごとに評価値の平均をとったものを表 3 に示す。市販フェルトチップや市販チタン合金チップは全体的に高評価である一方で、エラストマー試作品は全体的に評価が低かった。市販プラチップ A と市販プラチップ B は評価の傾向が非常に類似しており、その評価値もかなり近い値をとっていた。市販プラチップ C や市販エラストマー

表 3 アンケート結果 (ペンごとの平均値)

評価項目	市販ブラチック A	市販ブラチック B	市販ブラチック C	市販フェルトチック	市販エラストマーチック	市販チタン合金チック	エラストマー試作品
書き心地 (全体)	3.50	3.55	4.10	4.45	3.75	3.85	1.95
書き心地 (とめ)	3.00	2.45	3.60	3.75	3.95	3.45	3.60
書き心地 (はね)	3.70	3.65	3.90	3.85	3.55	4.00	2.80
書き心地 (はらい)	4.05	3.90	4.05	4.05	3.20	4.15	2.45
滑りやすさ (筆記)	4.50	4.85	3.15	3.95	2.45	3.80	1.30
普段通りの筆記	3.10	3.00	3.75	4.20	3.60	3.75	2.00
アナログの筆記感覚	2.70	2.50	2.95	3.40	2.65	3.80	1.80
消しやすさ	4.55	4.75	4.10	4.30	3.80	3.90	2.50
滑りやすさ (削除)	4.55	4.65	3.20	3.75	2.70	4.00	1.50
削除の正確さ	4.25	4.10	4.30	3.75	4.25	3.95	2.95

チックは滑りやすさやアナログの筆記感覚の項目においては比較的低評価であったが、それ以外の項目では高評価であった。

4.2 各タスクの分析方法

筆記タスクでは、中村ら [5] 及び佐藤ら [15] の手法を組み合わせて筆記のブレを算出した。ここではまず、取得した手書きの点列データをスプライン補間で密化した後、フーリエ級数展開により数式化し、複数文字の平均をとることで平均文字を生成した。次に、平均文字について距離に基づき各ストロークを 100 等分し、これを基準とした。また、筆記された文字についても距離に基づき各ストロークを 100 等分し、対応するストロークの特徴点について、平均文字からのユークリッド距離を算出することで、ストロークごとのブレを定量化した。すべての筆記データについてこの処理を行い、ユークリッド距離の合計値を筆記のブレとして算出した。

削除タスクでは、筆記のブレのような平均化による比較は困難なため、削除対象 (円) からはみ出したストローク量を削除のブレとみなし、そのピクセル数を算出した。

筆圧データの分析においては、ストローク全体を対象とせず、各ストローク長のうち前後 25% を除外した中央 50% の区間のみを用いた。これはストローク開始直後や終了直前の不安定な筆圧値を除外し、安定した筆記状態での筆圧特性をより正確に反映させるためである。こうした処理は、摩擦特性と筆圧特性の関係を適正な条件下で評価するうえで有用となる。

また主観評価とブレの関連性を評価するため、ノンパラメトリックなスピアマンの順位相関係数を用いて分析を行った。この相関係数を用いることで、評価値が必ずしも正規分布しない場合や、順位的性質を考慮すべき場合にも、主観評価と客観指標との関連性を適切に評価可能となる。

4.3 筆記タスクに関する結果

主観的な「全体的な書き心地」の評価と、筆記のブレ (ブレが小さいほど平均文字に近い) との関係、スピアマンの順位相関係数を用いて実験参加者ごとに分析した。なお、相関係数の算出時には、筆記のブレの逆数を用いてお

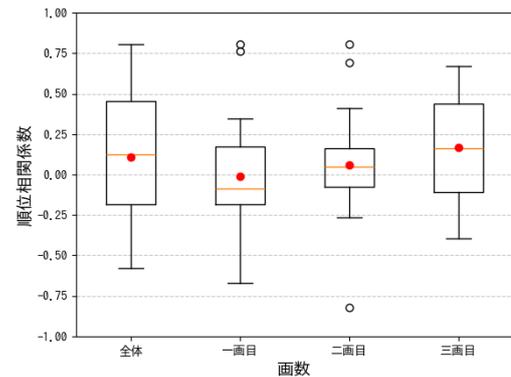


図 3 全体的な書き心地と筆記のブレ間の順位相関係数 (あ)

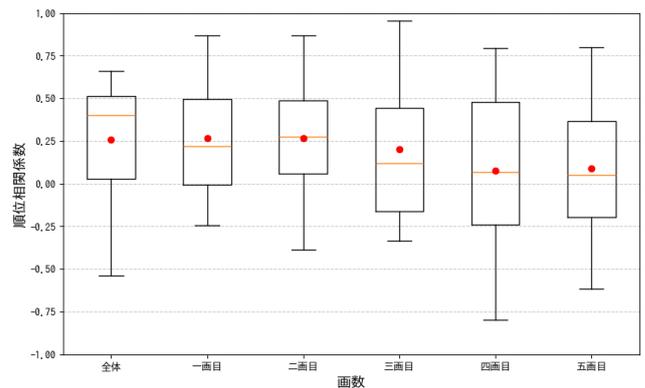


図 4 全体的な書き心地と筆記のブレ間の順位相関係数 (永)

り、筆記のブレが小さいほど、また主観評価が高いほど正の相関が生じるよう調整した。

図 3 と図 4 は、全体的な書き心地の主観評価と筆記のブレ間の相関係数を全体と画数ごとに示したものである。平均値などの具体的な数値は表 4 と表 5 に示す。結果として、「あ」の筆記では三画目で、「永」の筆記では二画目で、それぞれ 0.170 と 0.267 と各文字において最も高い平均値を記録した。また、「永」の一画目から三画目における相関係数の平均値は 0.2 を超えていたが、弱い正の相関にとどまった。一方で、四画目や五画目では相関係数のばらつきが特に大きく、平均値が 0.1 を下回るケースもみられた。さらに「あ」の二画目については、平均値が負の値をとっており、全体的には特定の画数やストロークにおいて顕著な正の相関は観察されず、ばらつきの大きい結果となった。

表 4 画数別の筆記タスク「あ」における順位相関係数

対象	平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
全体	0.108	-0.579	0.805	0.150	0.388
一画目	-0.010	-0.670	0.805	0.135	0.367
二画目	0.061	-0.823	0.805	0.117	0.343
三画目	0.170	-0.394	0.670	0.113	0.336

表 5 画数別の筆記タスク「永」における順位相関係数

対象	平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
全体	0.259	-0.540	0.661	0.112	0.334
一画目	0.266	-0.246	0.867	0.107	0.328
二画目	0.267	-0.386	0.869	0.112	0.335
三画目	0.202	-0.334	0.954	0.145	0.380
四画目	0.078	-0.797	0.794	0.181	0.426
五画目	0.090	-0.617	0.802	0.152	0.390

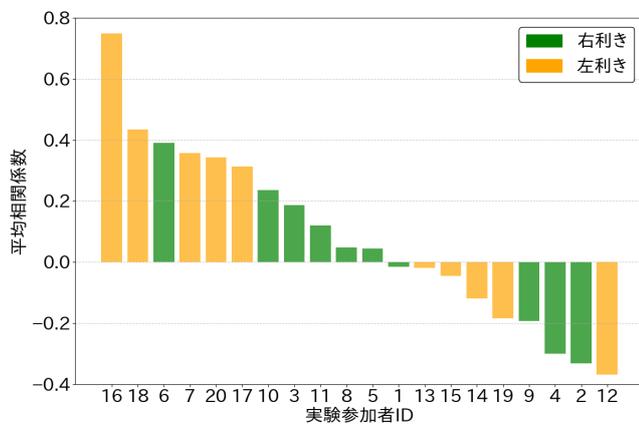


図 5 実験参加者ごとの順位相関係数の平均値 (あ)

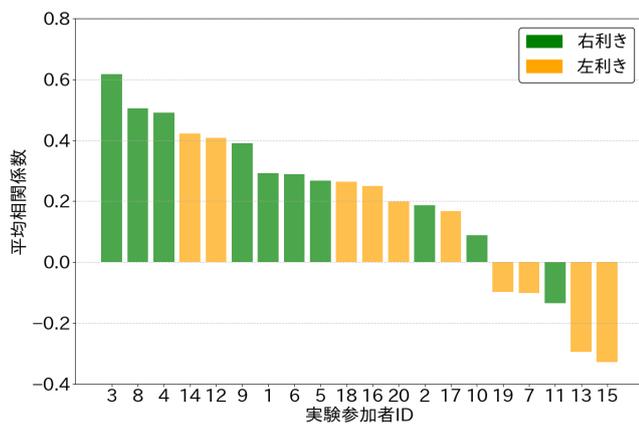


図 6 実験参加者ごとの順位相関係数の平均値 (永)

全体的な分析では、筆記のブレと主観評価の間に一貫した強い相関は確認されなかった一方で、参加者別にみると、筆記のブレが主観的な書き心地に明確な影響を与えるケースがみられた。図 5 と図 6 に、実験参加者ごとの各文字における筆記のブレと主観評価間の相関係数の平均値を示す。一般に、0.5 を超えると中程度の相関が認められるが、「あ」における相関係数の最大値は 0.749 であり、「永」においても 0.618 を記録した。また「永」については、過半

表 6 属性別の筆記タスク「あ」における順位相関係数

属性	平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
右利き	0.047	-0.579	0.543	0.129	0.359
左利き	0.169	-0.493	0.805	0.164	0.405
筆圧上位群	0.002	-0.493	0.438	0.125	0.353
筆圧下位群	0.050	-0.579	0.527	0.130	0.360

表 7 属性別の筆記タスク「永」における順位相関係数

属性	平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
右利き	0.393	-0.185	0.661	0.063	0.251
左利き	0.126	-0.540	0.512	0.125	0.353
筆圧上位群	0.128	-0.438	0.512	0.114	0.337
筆圧下位群	0.410	-0.185	0.661	0.092	0.302

表 8 削除タスクにおける順位相関係数

平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
0.045	-0.694	0.730	0.204	0.452

表 9 属性別の削除タスクにおける順位相関係数

属性	平均値	最小値	最大値	分散	標準偏差
右利き	0.203	-0.267	0.668	0.115	0.340
左利き	-0.114	-0.694	0.730	0.243	0.493
筆圧上位群	0.327	-0.491	0.730	0.191	0.437
筆圧下位群	-0.090	-0.694	0.668	0.196	0.443

数である 11 名の参加者で相関係数が 0.2 を上回っていた。

表 6 と表 7 に利き手ごとに分けた結果と、個人で筆圧の平均を求め、平均筆圧が上位 5 人に入る筆圧上位群と、平均筆圧が下位 5 人に入る筆圧下位群に分けた結果を整理したものである。この結果より、「あ」の筆記において、右利き参加者の全体の平均値は 0.047 と非常に小さかったのに対し、左利き参加者では 0.169 とやや高い値を示したが、両者の差は小さい。「永」の筆記では、右利き参加者において全体の平均値が 0.393 と弱い正の相関が認められる程度の値を示した一方、左利き参加者は 0.126 と低い値にとどまった。また、筆圧上位群・下位群それぞれにおける「あ」と「永」での全体的な書き心地評価と筆記のブレ間の順位相関係数から、筆圧下位群は筆圧上位群と比較して、順位相関係数の平均値が大きい傾向がみられた。特に「永」については、筆圧下位群は 0.410 と右利き参加者と同等の値を示した。

4.4 削除タスクに関する結果

削除タスクで取得したデータから、削除対象の円からはみ出したピクセル数を算出し、その値とアンケートで収集した消しやすさの評価値を用いて順位相関係数を求めた。その結果の統計情報を表 8 に示す。相関係数の平均値は 0.045 であり、相関はみられなかった。

削除タスクについて、実験参加者の平均筆圧や利き手による場合分けを行った場合の相関係数を表 9 に示す。筆圧上位群（平均筆圧が上位 5 人）と右利きの実験参加者につ

いては、それぞれ相関係数の平均値が 0.327 と 0.203 となり、弱い正の相関が認められた。一方、筆圧下位群（平均筆圧が下位 5 人）および左利きの実験参加者では、相関係数の平均値が負の値を示し、これが全体の相関がみられない要因であると考えられる。

5. 考察

5.1 主観的評価アンケートに関する考察

表 3 に示したアンケート結果からはペン先の摩擦特性が主観評価に及ぼす影響がみてとれた。エラストマー試作品は書き心地など全般の評価に渡り、他のペン先に比べて低い値を示していた。これはエラストマー試作品が有する最も高い動摩擦係数による、過剰な摩擦がユーザの書き心地に悪影響を及ぼした可能性がある。市販プラチップ A や市販プラチップ B は滑りやすさや消しやすさにおいて高い評価を得ており、これらの低い動摩擦係数が滑らかな操作感を提供していることを示しているが、全体的な書き心地などについては低めの評価であり、摩擦の小ささが筆記の安定性に悪影響を与えている可能性がある。中程度の動摩擦係数を有していた市販プラチップ C および市販エラストマーチップは、書き心地や消しやすさについては高評価であり、これらより少し動摩擦係数の小さい市販フェルトチップはほとんどすべての項目で高評価で、摩擦のバランスがとれた設計が実験参加者に好まれていると考えられる。

市販チタン合金チップについては、アナログの筆記感覚の項目において最高評価であり、その他の項目でも安定した評価を得ていた。ここで市販チタン合金チップの動摩擦係数は 0.221 で、市販プラチップ B (0.208) と市販プラチップ A (0.241) の間に位置するが、滑りやすさの項目で市販フェルトチップ (0.388) と同程度の評価を得ており、動摩擦係数の値と異なる結果が現れた。これは、市販チタン合金チップが唯一の金属製ペン先であり、他のペン先とは異なり、ペン先が筆記面と接触する際に強い筆記音が確認されるなどの特異性が影響していると考えられる。特に、高速での筆記時にはその音が顕著であり、これがアナログの手書きに似た感覚を生じさせ、アナログの筆記感覚に関する評価項目で最高の評価を得たと推測される。

5.2 筆記タスクに関する考察

本研究の主目的は、「手書きを行った際にブレが小さい筆記具のペン先の摩擦特性は、使用者にとって満足度の高い書き心地を提供する」という仮説の検証であった。

実験の結果より、全ての実験参加者、全てのペン先を統合した分析では、強い相関は確認されず、ストローク単位でもばらつきが大きかった。これは、単純な集計では書き心地とブレが直接的に関連付かないことを示している。一方、個別の参加者ごとに分析を行うと、中程度の正の相関 (0.5 以上) を示すケースが存在した。特に「永」の筆記に

おいては、半数を超える参加者で 0.2 以上の正の相関が確認され、個人レベルではブレが主観評価をある程度反映することが示唆された。「永」は「あ」に比べ画数が多く、かつ多様な筆画技法を含む文字であるため、ペン先の摩擦特性が顕在化しやすかった可能性が考えられる。

また、図 5 と図 6 より、「あ」や「永」といった文字に対するブレと評価の相関傾向が、利き手によって異なる可能性が示唆され、右利き参加者は「永」において比較的高い相関が、左利き参加者は「あ」において比較的高い相関が得られることがあった。この結果は、利き手により筆記方向やストローク特性が異なることで、最適な摩擦特性およびブレと主観評価の対応関係が変わる可能性を示している。つまり、右利きはより複雑なストロークを伴う文字を、左利きはシンプルな文字を筆記した際に、書き心地とブレが対応付くなど、利き手による適切な文字が存在する可能性が示唆された。

平均筆圧値についての分析では、筆圧値で分けた群によって、ペン先の主観評価の傾向や、相関係数の平均値に差異がみられた。この結果は、筆圧特性がペン先の摩擦特性に影響することを示唆しているものの、筆圧上位群、下位群ともに 5 人ずつと限られたものであるため、今後さらなる検証が必要である。

5.3 削除タスクに関する考察

削除タスクにおける結果では、全体的に主観評価（消しやすさ）とはみ出し量（削除のブレ）間の相関が小さく、平均値が 0.045 と相関がみられなかった。また、筆圧上位群および右利きの実験参加者においては、それぞれ 0.327 および 0.203 の平均相関係数が得られ、弱い正の相関が認められたものの、筆圧下位群および左利きの実験参加者では、相関係数の平均値が負の値を示し、全体として削除タスクにおける摩擦特性と消しやすさの評価との関連性が低いことが確認された。この結果から、削除タスクにおいては筆記タスクとは異なり、ペン先の摩擦特性が消しやすさに与える影響が限定的であった可能性が考えられる。

利き手別の分析において、右利き参加者において弱い正の相関が確認されたが、左利き参加者では負の相関がみられた。これは、右利きと左利きで消去動作におけるストロークの方向が異なるため、摩擦特性が消しやすさに影響した可能性がある。この点については、今後さらなる分析が必要である。

6. まとめ

本研究では、デジタル端末上での手書きにおけるペン先の摩擦特性が書き心地や手書きのブレと関係するという仮説のもと、摩擦係数が異なるペン先を用意し、主観評価と手書きのブレの相関を比較する実験を実施した。具体的には、摩擦特性の異なる 7 種類のペン先を用いて筆記および

削除タスクを実施し、筆記データからブレを算出するとともに、アンケートによる主観的評価を収集・分析した。

筆記タスクの結果では、全体的な分析において摩擦特性と主観評価との間に強い相関は確認されなかったが、個別の参加者や特定の文字に着目すると、中程度の正の相関が認められた。特に右利きでは「永」の筆記、左利きでは「あ」の筆記において、摩擦特性が書き心地やブレに関係することが示唆された。一方、削除タスクでは、全体的に摩擦特性と消しやすさの間に明確な相関はみられなかったものの、右利きの参加者においては弱い正の相関が確認された。

今回の実験では、選定した文字やペンの摩擦特性において強い相関が観察されなかったが、異なる文字やペンの選定、さらには実験条件を変更することで、摩擦特性と筆記・削除のブレとの間により強い相関を見出させる可能性がある。特に、より多様な文字や複雑なストロークを含む文字を対象とすることで、摩擦特性がブレに与える影響をより明確に捉えられると考える。また、ペンの選定においても、現在の実験では7種類のペン先を対象としたが、多様な素材や構造を持つペン先を含めることで、摩擦特性の幅を広げ、ユーザごとの細かい嗜好に対応できるようになると期待される。さらに、実験条件として筆記速度や筆圧のバリエーションを増やすことで、より実用的なシナリオに即した評価が可能となり、ペン先の摩擦特性とブレとの関連性をより詳細に分析することができる。

これらの改良によって得られたデータを活用することで、2.2節で述べたような行為ベースの推薦システムの構築が可能になると考えられる。具体的には、ユーザがペンを購入する際に、適当なペンで文字や図形の筆記・削除タスクを複数回実施し、そこで得られたブレのデータとユーザの筆圧値や利き手といった属性情報を組み合わせることで、最適なペン先の摩擦特性を持つペンを推薦する仕組みが想定される。このアプローチは、スタイラスペンがアナログペンと比較してオンライン購入が主流となっている現状において、ユーザが実際にペンを試用することなく自分に適したペンを選ぶ手助けとなり得る。特に、ユーザ個々の筆記スタイルや嗜好に応じたペン選びが可能となることで、より満足度の高い書き心地を提供することが期待される。

参考文献

- [1] 辛島光彦, 西口宏美: 1G3-4 大学講義における学生のノートテイキングに関する一考察, 人間工学, Vol. 52, No. Supplement, pp. S268-S269 (2016).
- [2] Fernández Camporro, M. and Marquardt, N.: Live Sketchnoting Across Platforms: Exploring the Potential and Limitations of Analogue and Digital Tools, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1-12 (2020).

- [3] Annett, M., Anderson, F., Bischof, W. F. and Gupta, A.: The pen is mightier: understanding stylus behaviour while inking on tablets, *Proceedings of Graphics Interface 2014*, GI '14, CAN, Canadian Information Processing Society, p. 193-200 (2014).
- [4] Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G. and Festman, J.: Is Handwriting Performance Affected by the Writing Surface? Comparing Preschoolers', Second Graders', and Adults' Writing Performance on a Tablet vs. Paper, *Frontiers in Psychology*, Vol. 7 (2016).
- [5] 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).
- [6] Akay, A.: Acoustics of friction, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, No. 4, pp. 1525-1548 (2002).
- [7] Cho, Y., Bianchi, A., Marquardt, N. and Bianchi-Berthouze, N.: RealPen: Providing Realism in Handwriting Tasks on Touch Surfaces using Auditory-Tactile Feedback, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 195-205 (2016).
- [8] 渡邊恵太, 安村通晃: 味ペン: 仮想筆先による触覚的「書き味」感覚提示の提案と試作, *Proceedings of Interaction 2007*, Tokyo, Japan (2007).
- [9] 西村崇宏, 土井幸輝, 藤本浩志: タッチパネルタブレット端末におけるディスプレイの表面特性が操作性に及ぼす影響, 日本感性工学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 431-439 (2013).
- [10] Heintz, B. D. and Keenan, K. G.: Spiral tracing on a touchscreen is influenced by age, hand, implement, and friction, *PLOS ONE*, Vol. 13, No. 2, pp. 1-14 (2018).
- [11] Boppana, A. and Anderson, A. P.: Dynamic foot morphology explained through 4D scanning and shape modeling (2020).
- [12] Quesada, J. I. P., Jacques, T. C., Bini, R. R. and Carpes, F. P.: Importance of static adjustment of knee angle to determine saddle height in cycling, *Journal of Science and Cycling*, Vol. 5, No. 1, pp. 26-31 (2016).
- [13] PILOT Corporation: 万年筆 — 製品情報 — PILOT (2024). Accessed on Dec 9th, 2024.
- [14] 大西愛, 押木秀樹: 書字等の動作における利き手の差に関する基礎的研究: ストロークの向き・傾きと空筆部の選択を中心に, 上越教育大学国語研究, Vol. 29, pp. 48-34 (2015).
- [15] 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).