

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

伊藤 奈々美¹ 能宗 巧¹ 瀬崎 夕陽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：スタイラスペンなどの既存のデジタル筆記具は種類が限られており、個々のユーザの書き心地の好みや身体的特性にあったペンを見つけることは容易ではない。ペンのもつ物理的特性の中でも、「重心」は指先にかかるモーメントを変化させ、筆記の安定性や操作性を左右するため、書き心地を決める重要な要素である。そこで本研究では、ペンの重心に着目し、筆記文字のブレを定量的に評価することで、書き心地の客観的な評価指標を確立することを目的とする。実験では、重心の異なるペンを用いて、4種類の文字を複数回筆記するタスクを実施し、主観評価と手書きのブレの相関を比較した。また、ペンの重心が文字の縦横比に与える影響についても検討した。その結果、参加者全体では強い相関が見られなかったが、特定の属性の参加者や文字において、重心が書き心地や文字の縦横比に影響を与えることが確認された。

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及に伴い、従来の紙とペンによる筆記だけでなく、スタイラスペンを用いたデジタル端末上での手書き入力が教育やビジネスなど様々な場面で一般化しつつある [1, 2]。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 [3, 4]。

例えば紙媒体では、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、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できず、書き心地が限定的である。

ここで書き心地は、ペンの全長、形状、ペン先の摩擦、重量、重心の位置といった物理的な特性に大きく左右されることが考えられる。我々はこれまで、ペン先の摩擦が手書き時に得られる感覚に及ぼす影響の調査を行い、ペン先の摩擦の違いが書き心地と手書きのブレに影響を与える可能性を検証してきた [5]。しかし、摩擦以外の物理的要因についての調査は行えていなかった。

ペンがもつ物理的な特性の中でも、「重心」は把持点を支

点とするモーメントや回転慣性を左右し、筆圧の安定性や線の精度、操作の軽快さなど書き心地を決める重要な要素である。重心がペン先側に寄れば筆圧が安定して線はブレにくい。素早い方向転換がしにくくなる可能性がある。一方、重心がペン尻に寄れば軽快な操作が可能になるが、線が滑りやすく姿勢も乱れやすくなる可能性がある。こうしたブレが書き心地を反映すると考えられる。

我々はこれまで、デジタル端末上での手書きを数値的・客観的にとらえる手法の研究を行い、平均化された文字がユーザの理想文字に近いことを示してきた [6]。つまり、あるペンで手書きしたものとユーザの平均文字のブレが小さければ理想に近く、そのペンはユーザにとって適切なものであり、大きければ理想から遠く不適切なものであると言える可能性がある。

そこで本研究では、H1「筆記時のブレが小さい重心設計のペンは、ユーザにとって満足度の高い書き心地を提供する」という仮説のもと、実験と検証を行う。ここでは、実際に筆記された文字から生成された平均文字は理想文字に近似し、かつ数値的に表現可能である [6, 7] ことを利用し、筆記された文字とその平均文字の差異を筆記のブレとみなす。また、筆記時の手と指の運動方向の違いにより、横方向のストロークの筆記は制御が困難で、ストロークが短くなる傾向がある [8] ことから、H2「筆記時のブレが大きいペンで筆記した文字は、ブレが小さいペンで筆記したものより字のバランスが縦長になる」という仮説を立て、筆記文字の縦横比についても計測・検証を行う。さらに、ペン

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

の持ち方の違いにより、ペンに作用するモーメントが変化することから、筆記時のブレは個人のペンの持ち方に影響を受けると考えられるため、実験参加者ごとのペンの持ち方を分類し、筆記データと照合して分析を行う。

2. 関連研究

2.1 書き心地と重心に関する研究

Kim ら [9] は、ボールペンに対するユーザの満足度に影響を与える 6 つの主要な物理的特性（重量、長さ、重心、グリップの太さ、ペン先の太さ、グリップの有無）において、重心は最も優先度が低いことを明らかにした。しかし、重心の位置をペン先に近づけることによって、ユーザの満足度を高めることが可能であるとも述べている。

鈴木 [10] は、ボールペンの重心の位置が筆圧や文字の書きやすさに与える影響を調査し、ペン先から 45~75mm の範囲に重心がある場合、筆圧が低くなり滑らかな筆記が可能になることを明らかにした。また、重心がペン先に近いほど小さい文字が書きやすくなることも報告している。さらに、ボールペンの重心位置と机に対する相対的な椅子の高さが書きやすさの主観評価に与える影響についても調査を行い、椅子が高い場合は重心がペン先に近い筆記具が好まれ、身長が高いひとが低い椅子を使用する場合は重心が高い筆記具の評価が高くなることを明らかにしている [11]。

Huang ら [12] は、ペン内部のおもり（真鍮）の動的な移動により重心位置と慣性モーメントを変化させ、触覚フィードバックとして利用可能なデジタルペンを開発した。また、ペンの重心をペン先寄りに設定することで描画の負荷を減らすことができると述べている。さらに、3 つの重心を固定するパターンと重心を変化させるパターンについて、参加者が 94.25% と高い認識精度を記録し、ペン先と机の接触の有無や、別の認知課題などの外的要因により影響を受けないことを明らかにした。ただし、固定のパターンにおいては、速い速度で操作を行うと「ペン先寄り」と「中央」の重心位置のパターンが混同されることも明らかにしている。

これまで、ペンの重心設計に関してはユーザの満足度などの主観的な評価による分析が行われてきたが、客観的な評価手法による分析は十分に行われていないのが現状である。そのため、本研究ではユーザによる主観評価に加えて、筆記文字のブレを用いることで客観的な評価も行う。

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 [13] 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 [14] 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、それに基づいて万年筆を薦める店頭イベントを実施している [15]。このような取り組みは、ユーザ個々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もつ。

しかし、デジタルペンにおいて、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。

3. 実験

3.1 実験概要

本研究では、H1「筆記時のブレが小さい重心設計のペンは、ユーザにとって満足度の高い書き心地を提供する」および H2「筆記時のブレが大きいペンで筆記した文字は、ブレが小さいペンで筆記したものより字のバランスが縦長になる」という仮説を検証するため、重心設計の異なるペン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を行うとともに、各条件における筆記直後と実験終了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な評価を収集し、それらと定量的評価の関係性に関する分析を行う。

3.2 ペンの重心の定量的測定

本実験で用いるスタイラスペンは 4 種類あり、表 1 にこれらの設計を示す。ただし、重心の値については 3 回計測した実測値の平均値である。これらのペンはパイロット社のドクターグリップの軸を使用しており、ペン先のグリップ部分にメタルのおもりを挿入することによって重心設計を異なるものになっている。各ペンのおもりの位置を図 1 に示す。ペン A はおもりを使用しておらず、ペン B はペン先から離れた上部に、ペン C はよりペン先に近い下部におもりを 1 つ挿入している。ペン D についてはおもりを上部と下部にそれぞれ 1 つずつ挿入したものである。重心位置はペン A が最もペン先から遠く、ペン D が最も近い設計となっており、全てのペンにおいてペンの中心よりも先端寄りに重心が存在する。

以上の重心の異なる 4 種類のペンを使用して筆記実験を行い、重心特性が筆記時のブレや書き心地に与える影響を調査する。なお、ペンのどの場所にどのようにおもりが挿入されているかわからなくするため、図 1 のように黒いグリップを使用しおもりを見えなくしている。

3.3 実験タスク

本実験では、4 種類のペンを用いて異なる種類やサイズ

表 1 各ペンの設計

種類	全長 [mm]	重量 [g]	重心 [mm]	比率 (重心/全長)
A	142.7	14.5	70.3	49%
B	142.7	16.9	68.0	48%
C	142.7	16.9	65.0	46%
D	142.7	19.3	63.0	44%

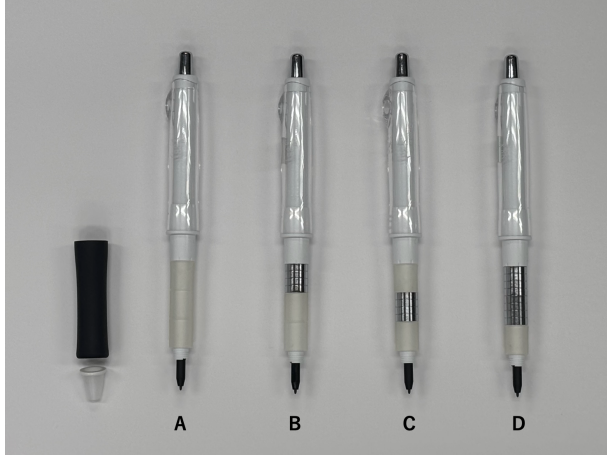


図 1 各ペンのおもりの位置

の文字の筆記を行ってもらう。ここで、全ての文字を書いてもらうのは困難なため、ある程度文字を限定する必要がある。選定した文字は「四」「永」「む」「ふ」であり、これらを普段通りの姿勢および速度で5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。

- 四：文字全体が横長であり、横方向のストロークが比較的長いことから、筆記時の横方向へのストロークのブレが文字の縦横比に与える影響があるため。
- 永：永字八法と呼ばれるように、書に必要な技法8種が全て含まれており、とめ、はね、はらいといった多様な筆技を有すなど、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ため。
- む：長い曲線のストロークを含み、筆記における基本的な筆運びを確認できると考えられる。また、筆記した文字の概形の特徴に個人差が大きく、個人ごとの筆記の特徴を確認できると考えられるため。
- ふ：文字に含まれる全てのストロークが独立しており、ストローク同士の位置関係を考慮し全体のバランスを取ることが重要であり、ペンの重心による文字概形への影響が大きい可能性があるため。

また、文字サイズによる影響も大きいと考えられるため、キャンバスサイズ「小」(150 × 150 ピクセル)と「大」(500 × 500 ピクセル)の2つの条件に取り組んでもらうこととした。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に指示した。さらに、筆記時の文字サイズを

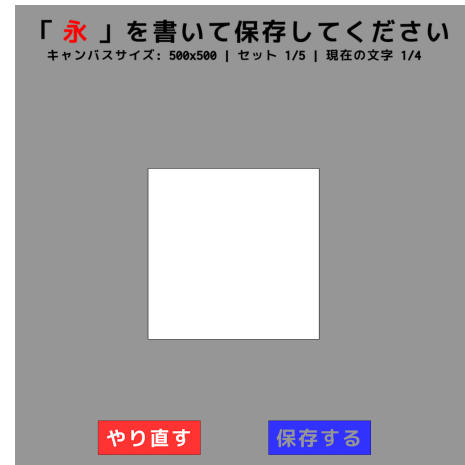


図 2 筆記タスク実施画面（キャンバスサイズ「大」）

統制するため、指定されたキャンバスを目一杯使用し、文字をできるだけ大きく書くように指示した。なお、ペンの使用順序や使用するキャンバスサイズ、指定された4種類の文字の筆記順に関してはランダム化した。

3.4 実験システム

実験タスクを行う際のシステム画面例を図2に示す。画面中央の白い領域がキャンバスであり、その内部で筆記してもらう。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、筆記したストロークの 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。また、ストロークがキャンバスからはみ出た場合にもデータが保存できるように実装した。なお、実験参加者が現在の筆記数を確認できるように、画面内に筆記した文字の回数を表示した。

実験システムの開発には Processing 4.4 を使用し、Windows 11 を搭載したラップトップ PC (Surface Laptop 5) 上で動作させた。この PC と液晶タブレット (Wacom One 液晶ペンタブレット 12) を接続し、スタイラスペンとタブレット液晶上で実験を実施できる環境を整えた。

3.5 主観的評価アンケートの評価項目

各条件におけるペンの使用直後に、実験参加者には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段階評価方式とした。ただし、実験終了後に行った各キャンバスサイズにおける書き心地に関する質問においては、4種類のペンを書き心地が良いと思った順番に順位を付けてもらった。

3.6 実験手順

実験は以下の手順で行った。

表 2 実施するアンケートの評価項目

実施のタイミング	質問内容
条件毎の筆記直後	使用したペンの書き心地 (-2~+2) 自分の思い通りの筆記が出来たか (-2~+2) 「四」の書きやすさ (-2~+2) 「永」の書きやすさ (-2~+2) 「む」の書きやすさ (-2~+2) 「ふ」の書きやすさ (-2~+2)
実験終了後	4種類のペンそれぞれの書き心地 (-2~+2) キャンパスサイズ「大」条件時における、書き心地の良い順 キャンパスサイズ「小」条件時における、書き心地の良い順 一番購入したいと感じたペン 一番長時間使用に向いていると感じたペン ペンごとの重心の違いの分かりやすさ (-2~+2)

- (1) 実験参加者に実験手順を説明し、同意を得たうえで、年齢や性別、利き手などの属性情報を収集する。
- (2) 4種類のペンについて任意の順番で使用して試し書きを行ってもらい。試し書きでは、800 × 800 ピクセルのキャンバス上で指定された文字（「あ」「い」「う」「え」「お」）について一回ずつ筆記を行ってもらい。この際、実験参加者のペンの持ち方を記録するため、筆記を行う手元の様子を動画で記録する。動画は正面方向と、実験参加者の非利き手側の横方向の2方向から、それぞれ15秒程度撮影する。
- (3) 指定された条件で各5回ずつ筆記を行ってもらい。なお、それぞれの条件については全てランダムな順番で提示する。
- (4) 各ペンの使用直後に、書き心地に関するアンケートに回答してもらい。

各参加者のペンの持ち方は、Schwellnus ら [16] の研究で用いられた4種類（Dynamic Tripod, Lateral Tripod, Dynamic Quadrupod, Lateral Quadrupod）に分類した。これらの持ち方の違いにより、各参加者の筆記時のブレや主観的評価にどのような関連性があるのかを調査する。

3.7 手書きのブレの分析方法

筆記時のブレについては、新納ら [7] の手法を参考に算出することとした。具体的には、まず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した。さらに、その総和を筆記された文字のストローク長で割ることで単位距離あたりのユークリッド距離を求め、これを筆記のブレとした。これにより、筆記文字のサイズが異なる場合でも公平に比較が可能となる。

4. 結果

実験参加者は、大学生および大学院生の男性20名、女

性10名の計30名であった。外れ値となる実験参加者はいなかったため、この30名を分析対象とした。

4.1 主観的評価アンケートに関する結果

各条件におけるタスク終了後に実施したアンケート結果について、項目と条件ごとに評価値の平均をとったものを表3に示す。ペンAは比較的低評価の傾向にあり、特にキャンパスサイズ「小」条件で評価が低かった。ペンBは全体的に高評価であり、特にキャンパスサイズ「小」条件で評価が高かった。ペンCはキャンパスサイズ「大」条件において低評価であり、全ての項目について他の条件の評価値以下の値を示した。ペンDは全体的に平均的な評価であった。それぞれの文字の書きやすさの比較においては、「ふ」が他の3つの文字と比較して全体的に低評価であった。また、「永」は比較的高評価であった。

実験終了後に実施したアンケートの結果を表4に示す。書き心地の5段階評価では、ペンDが最も高く、ペンAが最も低い評価であり、低重心のペンがより高評価になるという結果が得られた。また、一番長時間使用に向いていると思うペンを回答してもらった項目でも、同様の結果が得られた。しかし、一番購入したいと思ったペンの項目については、ペンBと答えた参加者が最も多く、ペンAは他のペンと比較して選ばれにくかった。また、ペンごとの重心の違いの分かりやすさの項目では、平均値が-0.57と低い評価であった。

4.2 筆記時のブレに関する結果

各条件で取得した筆記のデータから、筆記の全体的なブレをペンごとに分析した。なお、ここでは各条件における5回分の筆記文字データと、そこから得られた平均文字データとのブレを算出し、条件ごとの平均値を求め、その総和をペンごとの全体的なブレの指標とした。図3にそれぞれのキャンパスサイズの条件における、全参加者のペンごとの全体的なブレの分布を示す。結果として、「小」の条件では、「大」条件よりも全体的なブレの値が大きかった。また、それぞれの条件において、平均値や中央値に差はほとんど見られなかったが、ペンAでは分布のばらつきが小さい傾向が見られ、ペンCやペンDではばらつきが大きく、外れ値も多く見られた。

実験後に実施したアンケートで得られた主観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）との関係を、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。この相関係数を用いることで、評価値が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できる。ここで、筆記のブレにおいては、全体的なブレの値の順位（各条件におけるブレの平均値の総和が小さいほど順位が高い）を用い、筆記のブレが小さいほど、また主観評価

表 3 筆記直後アンケートの結果（条件ごとの平均値）

評価項目	ペン A・小	ペン A・大	ペン B・小	ペン B・大	ペン C・小	ペン C・大	ペン D・小	ペン D・大
書き心地	0.47	0.57	0.97	0.80	0.52	0.54	0.87	0.68
思い通り	0.50	0.63	0.87	0.73	0.71	0.68	0.63	0.68
書きやすさ（四）	0.67	0.63	0.80	0.47	0.71	0.32	0.60	0.58
書きやすさ（永）	0.57	0.83	1.07	0.80	0.77	0.75	0.70	0.80
書きやすさ（む）	0.40	0.53	0.70	0.60	0.81	0.29	0.60	0.54
書きやすさ（ふ）	0.40	0.30	0.57	0.53	0.39	0.29	0.47	0.40

表 4 実験後アンケートの結果（ペンごと）

条件	評価項目	ペン A	ペン B	ペン C	ペン D
全体	書き心地	3.20	3.57	3.63	3.67
	購入したい（件）	3	10	8	9
	長時間使用（件）	6	7	8	9
「小」	1 位（件）	3	13	6	8
	2 位（件）	10	4	11	5
	3 位（件）	11	4	8	7
	4 位（件）	6	9	5	10
	平均順位	2.67	2.30	2.40	2.63
「大」	1 位（件）	6	9	8	7
	2 位（件）	5	9	10	6
	3 位（件）	11	4	7	8
	4 位（件）	8	8	6	8
	平均順位	2.70	2.37	2.43	2.50

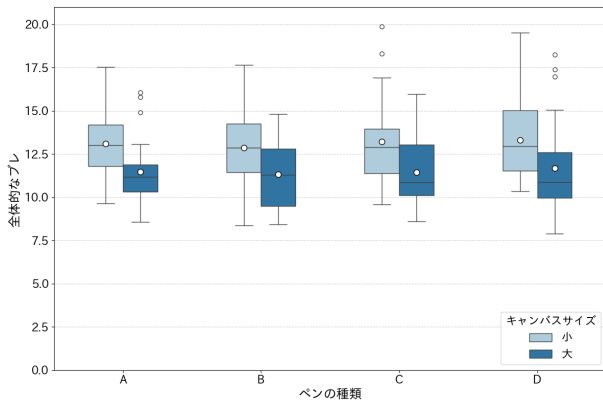


図 3 ペンごとの全体的な筆記のブレ

が高いほど正の相関が生じるよう調整した。また、各参加者のペンの持ち方を分類した結果を色分けして表示した。なお、LQ 型参加者は存在しなかった。図 4 と図 5 にそれぞれのキャンパスサイズ条件における順位相関係数の結果を示す。さらに、表 5 に利き手ごとに分けた結果と、ペンの持ち方の型ごとに分けた結果をまとめたものを示す。この結果より、「小」条件において、参加者全体での平均値は-0.03 と非常に小さい値であったのに対して、左利き参加者の平均値は 0.70 と高い値を示し、全ての左利きの参加者において正の相関が見られた。「大」条件では、LT 型の参加者において平均値が 0.60 と中程度の正の相関を示した。

4.3 文字の縦横比に関する結果

筆記された文字の縦横比への影響を調査するため、線形混合効果モデルを用いて分析を行った。これにより、個人

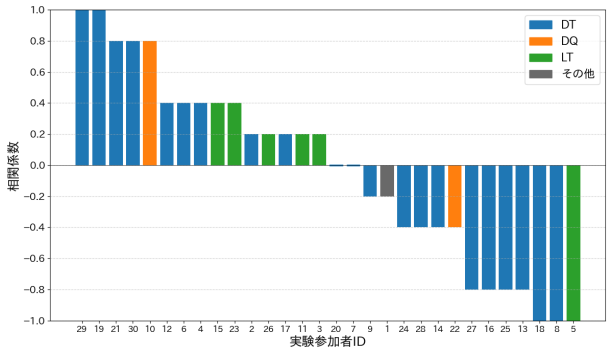


図 4 実験参加者ごとの順位相関係数（キャンパスサイズ「小」）

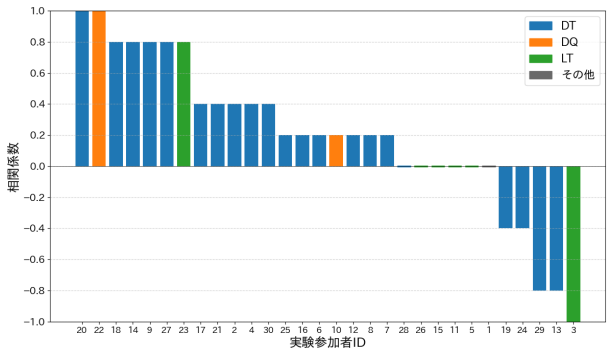


図 5 実験参加者ごとの順位相関係数（キャンパスサイズ「大」）

表 5 属性別の順位相関係数（キャンパスサイズごと）

属性	N	平均（「小」）	分散（「小」）	平均（「大」）	分散（「大」）
全体	30	-0.03	0.37	0.20	0.26
右利き	26	-0.14	0.32	0.27	0.24
左利き	4	0.70	0.09	-0.25	0.15
DT 型	21	-0.03	0.42	0.24	0.24
LT 型	6	0.20	0.36	0.60	0.16
DQ 型	2	0.07	0.24	-0.03	0.27

差による影響を統計的に統制しながら、各要因が文字の縦横比に与える影響を定量的に検証することができる。目的変数は筆記された文字の縦横比であり、各筆記文字を囲う最小の長方形の高さを幅で割ることで算出した。モデルの固定効果には、ペンの種類、キャンパスサイズ、および筆記時のブレの値を投入した。なお、ここでのブレは各条件における 5 回分の筆記データの平均的なブレの値の全条件での総和とした。また、変量効果には参加者 ID をランダム切片として設定した。これにより、筆記における個人差を考慮し、各要素が文字の縦横比に与える独立した効果をより正確に検証することが可能となる。分析の結果、ペン

表 6 条件ごとの縦横比の平均値

文字	ペン A・小	ペン A・大	ペン B・小	ペン B・大	ペン C・小	ペン C・大	ペン D・小	ペン D・大
四	0.858	0.821	0.867	0.835	0.864	0.828	0.872	0.845
永	1.002	1.055	1.000	1.049	1.018	1.049	0.972	1.034
む	1.007	1.013	1.004	1.013	0.998	1.028	1.004	1.026
ふ	0.964	0.968	0.980	0.980	0.957	0.963	0.953	0.962

表 7 キャンバスサイズ条件の違いにおける平均縦横比の比較

文字	ペン A	ペン B	ペン C	ペン D
四	1.044	1.038	1.043	1.032
永	0.950	0.953	0.971	0.940
む	0.994	0.991	0.971	0.979
ふ	0.996	1.000	0.994	0.991
平均	0.996	0.996	0.995	0.986

の種類 ($p > .600$), キャンバスサイズ ($p = .161$), ブレ ($p = .373$) のいずれの固定効果も, 筆記文字の縦横比に対して統計的に有意な差は見られなかった。

各参加者の筆記文字の縦横比を条件ごとの全参加者で平均を取ったところ, 表 6 のような結果になった。また, 文字ごとの平均縦横比の分布を図 6~図 9 に示す。結果として, ひらがな(「む」「ふ」)は漢字(「四」「永」)よりも縦横比のばらつきが小さく, ペンによる平均縦横比の変化もほとんど見られなかった。一方, 漢字では一部にペンによる影響が見られた。「四」の平均縦横比はペン A で最小, ペン D で最大となり, わずかにペンごとの差が確認された。「永」の平均縦横比は, ペン D において他のペンよりも小さくなり, 文字が横長になるという結果が得られた。

さらに, キャンバスサイズの違いによる文字の縦横比への影響を調べるため, 「小」条件における各文字の平均縦横比を「大」条件における縦横比で割り, 縦横比の比率を算出した。この値が 1 に近いほどキャンバスサイズの条件の違いによる文字の縦横比への影響が少なく, 1 より大きいほど「小」条件で筆記した文字の方が縦長になりやすい。その結果を表 7 に示す。表 7 より, 文字間の比較については, 「四」は全てのペンで 1 以上の値を記録しており, これは「小」条件において筆記された文字の方が「大」条件における筆記文字よりも文字が縦長になっていた。しかし, それ以外の文字では全てのペンにおいて, 「大」条件で筆記された文字の方が縦長, もしくは「小」条件で筆記された文字と同等の縦横比になるという結果となり, 特に「永」の筆記においてその傾向が強く見られた。また, ペンごとの平均比率を求めた結果, ペン A, B, C の間ではほとんど差が見られなかったが, ペン D は他と比較して値が小さく, キャンバスサイズ条件の違いによる縦横比の変化が大きいという結果が得られた。

5. 考察

5.1 主観的評価アンケートに関する考察

表 3 や表 4 に示したアンケート結果から, ペンの重心が主観評価に影響を及ぼしていることが確認できた。書き心地の評価値に関しては, 筆記直後に実施したアンケートではペン B の評価が最も高く, その次にペン D が高評価であったが, 実験終了後のアンケートではペン D の評価が最も高く, 重心が低いペンほど評価が高くなる傾向が見られた。このような結果になった原因は, それぞれの書き心地の評価方法の違いにあると考えられる。筆記直後の評価では, その時に使用したペンのみの評価を行ってもらう絶対評価方式であったのに対して, 実験終了後の評価では, 同時にそれぞれのペンの書き心地を評価してもらう方式であった。そのため, 全てのペンを比較して評価することでそれぞれのペンの特性の違いが知覚しやすくなり, このような結果になったと考えられる。

また, 実験後のアンケートにおいて, 「一番長時間使用に向いている」ペンとして低重心のものが選ばれやすい結果となったのは, ペンの回転モーメントが影響していると考えられる。参加者のペンを持つ位置が全てのペンの重心位置よりもペン先に近い場合, 重心がペン先に近いほど回転モーメントが小さくなり, ペンを支えるために必要な力が抑えられる。これにより疲労が蓄積しにくくなるため, 長時間使用に適していると評価されたと考えられる。

5.2 筆記文字のブレに関する考察

本研究の主目的は, H1「筆記時のブレが小さい重心設計のペンは, ユーザ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。

筆記時の全体的なブレに関する分析においては, キャンバスサイズ「小」の条件の方が「大」条件よりもブレが大きいという結果が得られた。これは, 人間の生理的な震え(手指の微細な振動)や運動制御の限界により, ある一定以上の誤差は避けられないが, この平均文字からの絶対的なずれの量はストローク長が短くなればなるほど影響が大きくなる。その結果, ストローク長が著しく小さくなる「小」条件においては, 人間の生理的なブレが相対的に数値として現れたと考えられる。

筆記時のブレと主観的な評価の相関においては, 全ての実験参加者や全ての条件を統合した分析では相関は確認さ

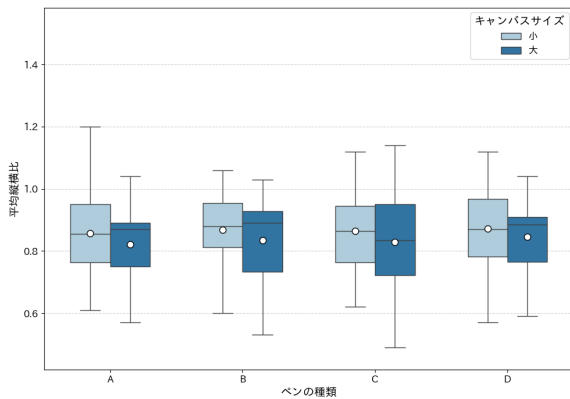


図 6 ペンごとの平均縦横比 (「四」)

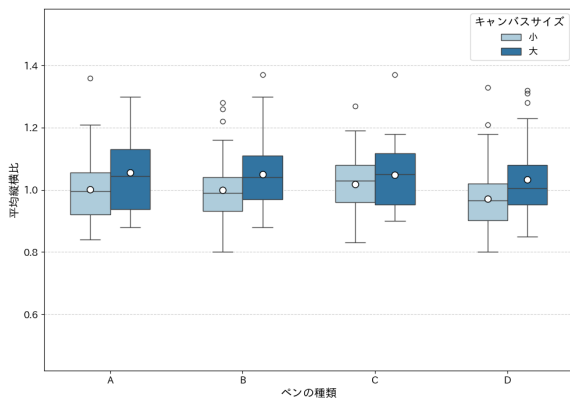


図 7 ペンごとの平均縦横比 (「永」)

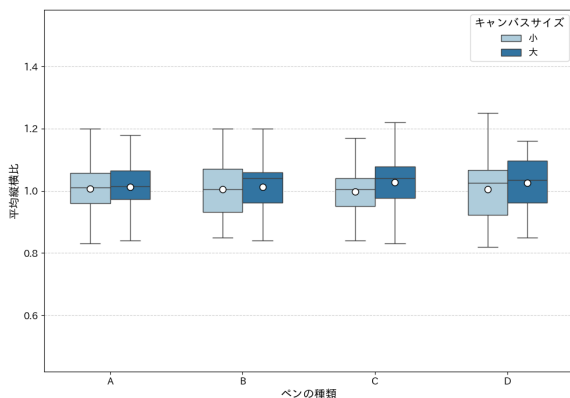


図 8 ペンごとの平均縦横比 (「む」)

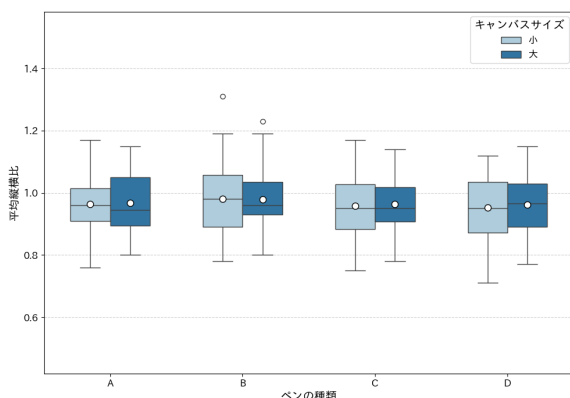


図 9 ペンごとの平均縦横比 (「ふ」)

れなかった。これは、単純な集計では主観的な書き心地と客観的なブレが直接関連付かないことを示唆している。一方、個別の参加者ごとに分析を行った結果、強い正の相関 (0.7 以上) を示すケースが複数存在した。また、属性ごとの分析では、左利きの参加者全体において、キャンバスサイズ「小」の条件で強い正の相関が見られ、LT 型の参加者全体においては、「小」条件で弱い正の相関、「大」条件で中程度の正の相関が見られた。左利きは、左から右の横方向のストロークを筆記する際に「押す」動作になるが、これは右利きの「引く」動作に比べてペン先にかかる摩擦が大きく、不安定な動作である。そのため、特にキャンバスサイズ「小」のような動作の精密な制御が必要な場面において、重心の違いがもたらす安定性の変化を敏感に知覚することができ、主観評価に影響を与えたのではないかと考えられる。また、LT 型は主に人差し指と中指を使ってペンを動かす持ち方であり、今回の実験参加者内で見られた他の持ち方と比較して、ペンを直接支えるのに使用する指の本数が最も少ない。そのため、ペンを動かす際の安定性が低く、左利きの参加者と同様に重心の影響を受けやすかったのではないかと考えられる。しかし、今回の参加者について、利き手やペンの持ち方の分類に偏りがあったことから、今後さらなる検証が必要である。

5.3 文字の縦横比に関する考察

筆記文字の縦横比へ影響を及ぼす要因の調査では、ペンの種類、キャンバスサイズ、ブレのいずれも統計的に有意な差は見られなかったが、条件ごとに縦横比を比較した結果、一部条件で縦横比に影響が生じていることがわかった。

ペンごとの比較において、漢字よりもひらがなの方が縦横比に影響が見られなかった原因については、文字の複雑さにあると考えられる。「む」や「ふ」は文字を構成するストローク数が少ないことや、一般的にひらがなは漢字に比べて書く頻度が高く書き慣れていることで、安定した筆記ができると考えられる。また、「四」においてペン A で横長、ペン D で縦長になる傾向が見られたことや、「永」においてペン D で横長になる傾向が見られたことから、複雑な文字の筆記においては、ペンの重心位置の違いが縦横比に影響する可能性が示唆された。

キャンバスサイズごとの比較においても、漢字の筆記を行った際にペンの重心による影響が確認できた。「永」「む」「ふ」では、キャンバスサイズが大きいほど縦長になる傾向があり、これは横方向のストロークの制御の難しさにあると考えられる。横方向のストロークは、筆記時の手と指の運動方向の違いにより制御が困難であり、縦方向のストロークと比較して短くなりやすい傾向がある [8] ことから、筆記時の手や腕の運動量が大きい「大」条件では、より一層そのような傾向が強くなったと考えられる。

また、「永」については特にキャンバスサイズによる縦横

比への影響が見られたが、これは「永」の筆記の際の特有の筆運びが影響していると考えられる。「永」は三画目と五画目において斜め下方向へ「払う」動作を必要とする。払いはストロークの終わりにかけて徐々に力を抜く運動であり、単調な「止め」の動作よりも制御が困難であることが考えられる。そのため、「む」や「ふ」よりも横方向のストロークが短くなる傾向が強く見られた可能性がある。この点についてはさらなる検証が必要である。

一方、「四」においては「小」条件の方が筆記文字が縦長になる傾向が見られたが、これは「四」特有の筆記の際の筆運びにあると考えられる。「四」は「口（くにがまえ）」という閉じた四角形の構造を持ち、一画目に短い縦方向のストロークを筆記した後、二画目に横方向へ長いストロークを書く。そのため、限られた大きさのキャンバス内で筆記をする際に、キャンバスサイズに対して一画目のストロークを長く書いてしまうと、窮屈さから二画目の横方向へのストロークが伸び切らず相対的に短くなり、筆記された文字が縦長になってしまう可能性が考えられる。

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の重心が書き心地や筆記文字のブレ、縦横比と関係するという仮説のもと、重心設計の異なる4種類のペンを用意した実験を実施し、筆記文字のブレや縦横比に関する分析と主観評価との相関の分析を実施した。実験の結果、筆記のブレと主観評価に関しては、参加者全体で強い相関は確認されなかったが、左利きやLT型など筆記の安定性が低いと考えられる特定の属性の参加者において中程度から強い正の相関が認められた。また、筆記文字の縦横比に関しては、統計的に有意な差は見られなかったが、漢字の筆記においてキャンバスサイズの違いによる文字の縦横比の変化に逆の傾向が確認され、文字の構造や筆記環境の制約による影響が示唆された。

今回の結果は、主観的な「書き心地」が、筆記時のブレだけでなく多様な要因によって複雑に形成されることを示唆している。客観的なブレの指標と主観評価が必ずしも一致しないことから、ユーザの満足度を推定するには、ブレ以外の要因も考慮する必要がある。また今回の実験では、参加者全体において重心による強い影響は見られなかったが、実験条件を拡張することで、筆記のブレや主観評価への影響をより明確に捉えられる可能性がある。特に、「四」と「永」で異なる傾向が見られたように、多様なストロークを含む文字を対象とすることで、重心特性が筆記の安定性に与える影響を詳細に分析できると考えられる。さらに、多様な重心位置や他の物理的特性を組み合わせたペンを用いることで、ユーザの嗜好に応じた、より実用的な評価の実現が期待される。

参考文献

- [1] 辛島光彦, 西口宏美: 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, pp. S268–S269 (2016).
- [2] 文部科学省: 令和6年度学校における教育の情報化の実態等に関する調査結果, https://www.mext.go.jp/content/20250829-mxt_shuukyo01-000044325_001.pdf (2025). 最終アクセス日: 2025-10-17.
- [3] 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, p. 1–12 (2020).
- [4] 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, p. 193–200 (2014).
- [5] 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).
- [6] 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, pp. 2599–2609 (2016).
- [7] 新納真次郎, 中村聡史, 鈴木正明, 小松孝徳: ひとの評価にあった手書き文字の類似度評価手法の提案, 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. 2019-HCI-181, No. 24, pp. 1–8 (2019).
- [8] Meulenbroek, R. G. and Thomassen, A. J.: Stroke-direction preferences in drawing and handwriting, *Human Movement Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 247–270 (1991).
- [9] Kim, K., Proctor, R. and Salvendy, G.: Emotional factors and physical properties of ballpoint pens that affect user satisfaction: Implications for pen and stylus design, *Applied Ergonomics*, Vol. 85, p. 103067 (2020).
- [10] 鈴木剛: ボールペンの使用性評価と使用実態に関する研究, 人間工学, Vol. 41, pp. 306–307 (2005).
- [11] 鈴木剛, 上野義雪: 筆記面の高さを考慮したボールペンの条件に関する研究, 日本インテリア学会 研究発表梗概集, Vol. 18, pp. 41–42 (2006).
- [12] Huang, K.-C., Sun, C.-K., Huang, D.-Y., Chen, Y.-C., Chang, R.-C., Hsu, S.-w., Yang, C.-Y. and Chen, B.-Y.: Glissade: Generating Balance Shifting Feedback to Facilitate Auxiliary Digital Pen Input, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–13 (2020).
- [13] Boppana, A. and Anderson, A. P.: Dynamic foot morphology explained through 4D scanning and shape modeling, *Journal of Biomechanics*, Vol. 122, p. 110465 (2021).
- [14] 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).
- [15] PILOT Corporation: 万年筆 — 製品情報 — PILOT, <https://www.pilot-custom.jp/feature/nib.html> (2025). Accessed on Nov 2nd, 2025.
- [16] Schwellnus, H., Carnahan, H., Kushki, A., Polatajko, H., Missiuna, C. and Chau, T.: Effect of pencil grasp on the speed and legibility of handwriting after a 10-minute copy task in Grade 4 children, *Australian Occupational Therapy Journal*, Vol. 59, No. 3, pp. 180–187 (2012).