

筆記感の再現性向上のための 高速応答ペン型インタフェースの開発

渡辺 凌大^{1,a)} 山崎 陽一¹ 井村 誠孝^{1,b)}

概要：タブレット上でのスタイラスペンを用いた筆記において、紙上での筆記感をインタフェース内の振動子によってユーザに提示できるペン型インタフェースが数多く開発されているが、書き出し時刻と振動開始時刻に差が生じ、紙上での筆記との不一致感を覚えるという問題点が存在する。本研究では振動の遅延が筆記感に与える影響を調査し、遅延を解消するシステムの構築を行い、より筆記感の再現性が高いインタフェースの開発を目指す。振動開始の遅延が筆記感に与える影響を調査したところ、0.1秒以下の遅延であれば違和感をほとんど覚えないことがわかった。可視光によって移動を検出するジェスチャーセンサをペンに装着し、筆記面に表示されたパターンを観測することで、0.1秒以下の高速応答を達成することができた。

1. はじめに

近年、様々な分野でタブレット端末を用いた作業の効率化がなされている。例えば教育界においては、2020年より学習指導要領の改訂によるICT導入が推進[1]され、タブレット端末を用いた授業の増加が予測される。

タブレット端末への入力方法として、指やスタイラスペンを用いた入力主流である。筆記具を用いて紙に筆記したことがある人にとって、スタイラスペンを用いた筆記は直感的な操作を行えるという利点がある。一方で、タブレット端末上にスタイラスペンを用いて筆記する際に得られる触覚フィードバックでは紙上に筆記用具で筆記する感覚が得られない。そのため、押下感がないことによって多くのユーザが違和感を覚えるなどの問題がある。紙上での筆記に近づけるためにペン先に工夫がなされているが、多くのタブレット端末は静電容量式のためペン先は導電性素材に限られる。そのため、タブレット端末のガラス面上を導電性素材が滑るような感覚しか得ることができない。

本研究の目的は、筆記感を構成する要素である振動を振動子で再現することで、紙上での筆記時に生じる振動感と同等の感覚をユーザに提示することである。筆記動作と振動提示の開始タイミングのずれが筆記感に与える影響を調査し、遅延を許容範囲内に低減することにより快適な筆記感を実現する。

2. 関連研究

ペン型インタフェースは3つの種類に分類できる。1種類目は触覚フィードバックを返さないインタフェースで、いわゆるスタイラスペンと呼ばれている。スタイラスペンはタブレット端末などの筆記面上にペンでなぞった跡を描画する機能を有している。Apple PencilやSurface Penがこれに該当し、タブレット端末使用者に最も使用されている種類である。しかし、1節で述べたように紙上での筆記感と同等の筆記感を得られず、スタイラスペンでの筆記を好まないユーザは多い。2種類目は電気振動の原理によって筆記時の触覚フィードバックを提示するスタイラスペンである。3種類目は機械式振動子をペン内部に搭載したインタフェースで、紙上での筆記時の振動を振動子で再現することによってユーザに振動感を提示する。本研究で開発するインタフェースは3種類目に属する。

Wangらは、電気振動の原理によってユーザに筆記時の振動を提示するEV-Pen[2]を開発している。設定した振幅、周波数の振動波形をペンに流しながら筆記すると、ペンとタブレット面の電極層の間に静電引力が生じることによって触覚フィードバックがユーザに提示される。EV-Penは決められた経路上をなぞるステアリングタスクや、図形の上をなぞるトレースタスクにおいて、他種のインタフェースよりエラー率が少なく、正確な筆記ができることが確認されている。しかし、EV-Penから得られる振動は設定した振幅と周波数からなる周期的な振動のため、紙上での筆記感とは異なる。

¹ 関西学院大学

^{a)} dik39181@kwansei.ac.jp

^{b)} m.imura@kwansei.ac.jp

大菅らの研究 [3] では、梶本らの提唱した触原色原理 [4] を基に、筆記具に装着した加速度センサで取得した筆記振動から振動モデルを生成し、インタフェース内に内蔵した振動子に振動モデルに基づいた振動を提示することで筆記感の再現を行っている。振動モデルの生成には線形予測符号化 (Linear Predictive Coding, LPC) を用いており、筆記速度や筆圧に応じてパラメータを変化させることで、筆記状態に応じた振動の生成が可能である。大菅らの研究を発展させた伊井の研究 [5] では、紙上での筆記振動と、タブレット-デバイス間に生じる摩擦振動の周波数スペクトルの差を求め、PC からデバイスまでの伝達関数を考慮することによって、より筆記感の再現性を向上させている。

しかし、これらの研究で開発されたインタフェースでは、PC でペン先の移動を検知した後に振動パターンを生成し出力しているため、書き出してから振動が開始するまでに遅延が発生し違和感を覚える。筆記速度が遅い場合は違和感を覚えるような遅延は発生しないが、筆記速度が速くなるほど遅延が目立つという問題点がある。

3. 振動遅延の筆記感に与える影響評価

本研究では先行研究で開発されたインタフェースに生じている振動の遅延という問題点を改善することで、より筆記感の再現性が高いペン型インタフェースを開発する。

3.1 先行システムの遅延測定

タブレットの筆記面に円形圧力センサ (ALPHA-MF01-N-221-A04) を設置し、インタフェースを把持した状態でペン先を圧力センサ上に載せ、筆記速度 1 cm/s, 2 cm/s, 3 cm/s で右方向に書き出した。圧力センサの出力が変化した時刻から書き出しタイミングを取得し、インタフェースの把持部に装着した 3 軸加速度センサ (ADXL337) によって振動開始タイミングを取得した。それぞれの差を求めることで、遅延値を測定したところ、最大 0.32 秒の遅延が発生した。先行研究の描画ソフトではタブレット上でのペン先の座標を取得し、ペン先移動時の座標の変化度合いによって筆記速度を決定している。移動を検知した後に自己回帰モデルを用いた振動波形生成を行い、アンプを通した音声出力をしているため遅延が発生していると考えられる。

3.2 許容遅延時間測定実験

ユーザはどの程度の遅延なら許容できるのかを、宮里らの遅延に関する評価実験 [6] を基に調査した。

- 目的

何秒以内の遅延から違和感を覚えるのかの客観的指標を取得し、遅延を解消するにあたって、解消後の目標遅延値を設定する。

- 方法

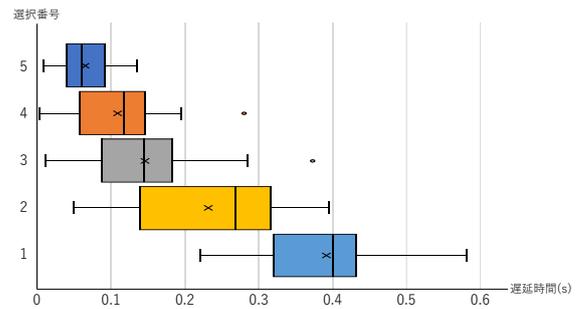


図 1 振動遅延による違和感評価

表 1 各選択番号の平均遅延値

選択番号	平均遅延値 (s)
5	0.065
4	0.109
3	0.146
2	0.232
1	0.391

実験協力者 (20~40 代の男女 5 名, 全員右利き) は椅子に座った状態で、ペン型インタフェースを把持する。その際、ペン先をタブレット端末上の圧力センサに乗せる。机上の PC 画面に表示されているカウントダウンタイマーが 0 になると同時にペン型インタフェースを用いて右方向に直線を筆記する。筆記後、以下の 5 項目で時間遅れによる違和感の評価を行った。

- (1) 非常に不自然である
- (2) 不自然である
- (3) 違和感を感じて不自然である
- (4) 違和感を僅かに感じるが不自然でない
- (5) 違和感を全く感じない

書き出しタイミングは筆記面に敷いた圧力センサによって取得し、提示振動は 0.033 s から 0.495 s の 11 通りの遅延をランダムに加えた。440 Hz の正弦波を各 11 通りの遅延時間後に流すため、振動開始タイミングは筆記速度の影響を受けない。そのため、実験協力者に筆記速度の指定は行わなかった。

- 結果

振動遅延と 5 段階評価の値をまとめた箱ひげ図を図 1 に示す。また、箱ひげ図における平均値をまとめたものが表 1 である。選択肢 4 (違和感を僅かに感じるが不自然でない) を選択した場合の振動遅延値の平均が 0.109 秒のため、遅延値をおおよそ 0.1 秒以内に抑えることができれば違和感を覚えさせず、ユーザエクスペリエンスが向上することがわかった。本研究では PC による振動波形生成は行わず、かつ遅延値を 0.1 秒以内に抑えるインタフェースの開発を目指す。



図 2 ジェスチャーセンサ

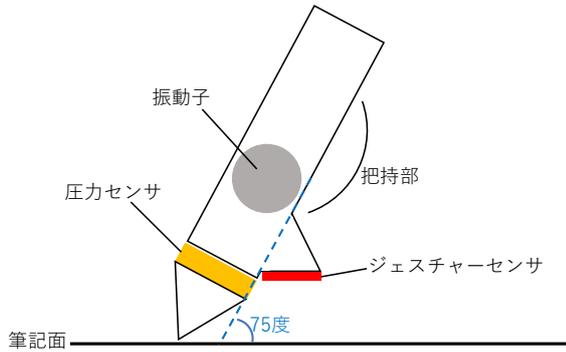


図 3 インタフェースの構成

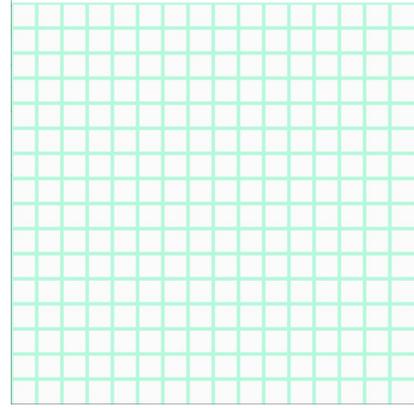


図 4 表示パターン



図 5 インタフェースの試作機

4. 遅延短縮手法

3節の実験より遅延の原因が筆記面であるタブレット側のソフトウェアであることが分かったため、本研究では、ペン型インタフェース単体で書き出しタイミングを取得する。本節ではジェスチャーセンサを用いた書き出しタイミング検出の実装について述べる。

4.1 ジェスチャーセンサ

本研究では、遅延を短縮させる計測手法としてジェスチャーセンサ (APDS-9960)(図2)を使用する。APDS-9960は4つの可視光フォトダイオードによって対象物との相対距離、周囲の照度識別、色の識別ができるセンサである。また、上下左右を感知する4つのフォトダイオードに加え、光源用LEDを内蔵しており、対象物からの反射光がそれぞれの赤外フォトダイオードに入射する時間差によって移動方向を検出できる。本研究では照度識別機能を用いて書き出しタイミングの検知を行う。

4.2 システム

システムの構成を図3に示す。筆記振動を提示するための振動子、筆記時の筆圧検出のための圧力センサ、筆記時の書き出しタイミングを検知するジェスチャーセンサがインタフェースに取り付けられている。パターン光を表示させた筆記面上をペン型インタフェースが移動すると、ジェスチャーセンサの照度識別機能によってパターン光の色の変化を取得し、振動子が振動を開始する。

また、三菱鉛筆株式会社によると、ペン軸と筆記面の角度を60~90度に保ちながらの筆記が理想的 [7] である。インタフェースの軸を60~90の中央値である75度に傾けた際に、筆記面とジェスチャーセンサが平行になるように取り付ける。ディスプレイ面上に表示するパターンを図4に示す。線のRGB値はそれぞれR=180, G=250, B=220で、格子状に表示されている。線の太さは6ピクセルで、線と線の間隔は50ピクセルである。パターン光を、日常的に使用するノートの罫線に近い色と模様にする事で、ユーザの視覚的妨害にならずに、普段ノートへ筆記する際と同じ感覚で筆記できるようにする。また、縞模様ではなく格子模様にする事で、漢数字の「一」や数字の「1」のように横方向や縦方向のみに筆記する文字に対応できる。

インタフェースのペン先付近に取り付けた圧力センサによって、ペン先と筆記面との接地状態を取得し、接地状態での移動時のみ振動が開始される。そのため、文字を書く際に次の画の開始点へとペン先を浮かして移動する場合には振動は開始されない。

4.3 短縮遅延値計測実験

圧力センサ、振動子、ジェスチャーセンサを搭載した新インタフェースの試作機(図5)を作成し、短縮された遅延値の計測を行った。試作機は銅板を筒状に加工し、内部に振動子を取り付けられている。ペン先のスポンジ部分と銅板部分の境目に圧力センサが取り付けられている。また、

表 2 ジェスチャーセンサを用いたシステムにおける遅延値

筆記速度 (cm/s)	平均値 (s)	最大値 (s)	最小値 (s)
1	0.064	0.071	0.047
2	0.059	0.070	0.049
3	0.061	0.075	0.048

ジェスチャーセンサは図 3 で示すように、ペン軸が筆記面と 75 度の角度をなす場合にジェスチャーセンサと筆記面が平行になるように取り付けた。

● 目的

ジェスチャーセンサを用いた書き出しタイミング検知システムによる筆記が、従来のシステムに比べてどれだけ遅延が短縮できたのか計測する。また、筆記速度の違いによる遅延値の増減の有無を確認する。

● 方法

ジェスチャーセンサを搭載したペン型インタフェースの試作機を用いて、筆記速度 1 cm/s, 2 cm/s, 3 cm/s で右方向に直線を筆記する。各筆記速度に対して 10 回の計測を行った。ペン先を圧力センサに乗せた状態から筆記を開始することで、書き出しタイミングを取得する。加速度センサによって振動開始タイミングを取得し、書き出しタイミングとの差を求めることで、遅延値を計測した。

● 結果

各筆記速度ごとに計測された遅延の平均値と、最大値、最小値を表 2 に示す。最も遅延値が大きかった値は、筆記速度 3 cm/s で筆記した際に計測された 0.075 秒、最も遅延が小さかった値は、筆記速度 3 cm/s で筆記した際に計測された 0.048 秒だった。有意水準 5% で一元配置分散分析 (ANOVA) を行った結果、筆記速度の変化による遅延値の増減に有意差は確認できなかった。

以上より、ジェスチャーセンサを用いたシステムによって遅延値が短縮していることがわかる。遅延値は 0.1 秒を下回っており、ユーザに違和感を覚えさせないシステムを実装できた。また、遅延が筆記速度による影響を受けないことが判明した。

5. おわりに

本稿では、ペン型インタフェースにおける振動遅延の原因が描画ソフトウェアであり、ユーザが許容できる 0.1 秒以内に遅延を抑える手法としてジェスチャーセンサを用いた書き出しタイミングを検知するシステムの構築を行ったことを述べた。また、ジェスチャーセンサを用いたシステムによって遅延が改善されたことを明らかにした。現段階では、簡易的な試作機を用いた計測実験しかしていないため、今後は 3D プリンタを使用してインタフェースの外装を製作し、振動子や各センサ類を搭載したインタフェースを構築する。完成した新インタフェースを用いて、使用感に関する前インタフェースとの比較実験を行い、より筆記

感の再現性が向上したことを証明する。また、筆記感を構成する要素として振動覚のみに焦点を当てているが、その他に筆記感を構成する要素がないか検討し、筆記感を正確に定量化する。

参考文献

- [1] 文部科学省：平成 30 年度文部科学白書，第 11 章 ICT の活用の推進，https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpab201901/detail/1422160.htm
- [2] Qinglong Wang, Xiangshi Ren, Sayan Sarcar, Xiaoying Sun: EV-Pen: Leveraging Electrovibration Haptic Feedback in Pen Interaction, Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces, pp.57-66, 2016.
- [3] 大菅誠弥, 井村誠孝, 伊藤雄一, 岸野文朗：接触部の特性変化による多様な筆記感提示，第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，33B-2, 2015.
- [4] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暲：皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ，電子情報通信学会論文誌，Vol. j84-D2, No. 1, pp. 120-128, 2001.
- [5] 伊井千晶：筆記具の振動伝達特性に基づくタブレット上の筆記感生成，関西学院大学理工学部卒業研究論文，2019.
- [6] 宮里勉, 岸野文朗：視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価，テレビジョン学会誌，Vol.49, No.10, pp.1353-1356, 1995.
- [7] 三菱鉛筆株式会社：お客様相談室，紙の上でボールペンが回らない場合，https://www.mpuni.co.jp/customer/ans_11f.html