

Pen Shadow Haptics: ペンの影による疑似触覚提示システム

西郷 利基^{1,a)} 森本 浩輔² 渡邊 恵太¹

概要: タブレットでのペン入力とは広く普及しているが、ユーザーは紙やキャンバスなどの筆記媒体の質感を感じることはできない。この問題に対し、物理的な機構を用いて触覚フィードバックを提供する方法が研究されているが、これらの方法はペンのサイズや重さを増加させ、ユーザー体験を損なう可能性がある。そこで本研究では、ペンの影を活用した疑似触覚提示システム「Pen Shadow Haptics」を提案する。このシステムは、ペンのバーチャルな影を動的に変化させることで、ユーザーに疑似触覚を提供する。実験では、設定した凹凸に合わせてペンの影が変化するシステムを使用し、タッチペンシルによる入力体験において、ペンの影が与える影響を調査した。その結果、Pen Shadow Haptics は参加者に凹凸の疑似触覚を与え、高低差の認識を容易にする効果があることが明らかになった。

1. はじめに

タブレットでのペン入力は、マウスやキーボードと並び広く普及している。その理由の一つは、現実世界で親しみのある紙とペンをメタファーとして取り入れている点にある。これにより、直感的な操作が可能になる。

しかし、タブレットにおけるペン入力では、ユーザーは紙やキャンバスなどの筆記媒体が持つ質感を感じ取ることはできない。たとえば、実際にシワのある紙をペンでなぞると、その凹凸感がペン先を通じて手に伝わる。同様に粗いキャンバスの場合も、ざらざらとした感触が伝わる。一方で、タブレットは平滑な表面であるため、これらの触覚的な要素が欠如している。

この課題に対して、触覚フィードバックを提示するさまざまな方法が研究されている。たとえば、ソレノイドを使い筆圧を制御する方法 [1] や、ペンに振動を与えてテクスチャを再現する方法 [2]、聴覚フィードバックと触覚フィードバックを組み合わせる方法 [3] が挙げられる。しかし、これらの方法は物理的な機構が必要であり、ペンのサイズや質量が増加し、ユーザー体験を低下させる課題が存在する。

そこで本研究では、ペンそのものではなく「ペンの影」に着目し、疑似触覚を提示するシステム「Pen Shadow Haptics」を提案する。疑似触覚とは、視覚や聴覚などの刺激を用いることで、ユーザーに対して、実際に触れていない物

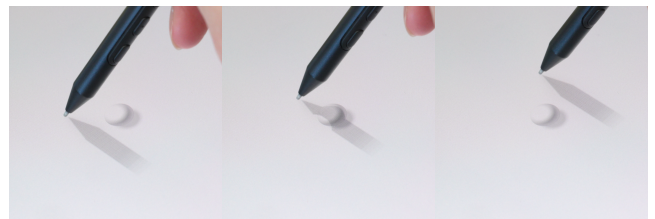


図 1 ペンの影が投影された面の凹凸に合わせて変形するプロトタイプ。

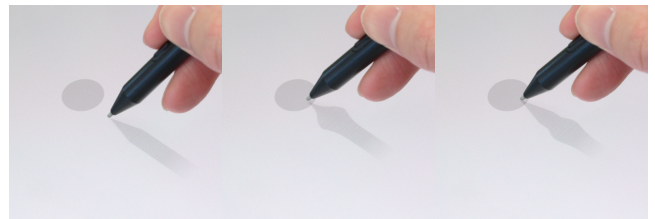


図 2 ペンが特定の領域にぶつくと、ペンの影が波打つプロトタイプ。

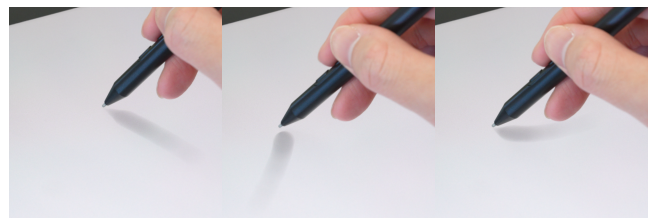


図 3 ペンの加速度に合わせて、ペンの影がたわむプロトタイプ。

体や表面の触覚的な感覚を錯覚させる技術である。本システムは、バーチャルな影を表示し、視覚的刺激を用いて疑似触覚を与える。そのため、物理的な機構を必要とせず、

¹ 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

² 明治大学大学院 先端数理科学研究科
先端メディアサイエンス専攻

a) ev220563@meiji.ac.jp



図 4 実験で比較した 3 つの影の条件: 著者らが提案する Pen Shadow Haptics は条件 C である。

ペンに新たな装置を取り付ける必要がない。よって、ユーザー体験を維持したまま触覚フィードバックを与えることが期待できる。

2. Pen Shadow Haptics

2.1 3 つのプロトタイプ

Pen Shadow Haptics はペンの影による疑似触覚提示システムである。著者らは図 1, 図 2, 図 3 に示す 3 つのプロトタイプを作成した。

図 1 のシステムは、あらかじめ設定した凹凸に合わせてペンの影が変形する。現実世界の影は、投影面に凹凸がある場合その凹凸に応じて変形して見える。本システムでは、この性質をタブレットで再現することで、ペンで凹凸をなぞる触覚をユーザーに提供することを目的とする。図 1 では、半球の物体に影が投影されており、影が半球にあわせて変形している様子を再現している。

図 2 のシステムは、ペン先が特定の領域にぶつかる、ペン先からペンの影が太くなり、その変形が反対側の端まで波のようにして伝わる。本システムでは、ペンが凹凸にぶつかる触覚をユーザーに提供することを目的とする。

図 3 のシステムは、ペンの加速度に合わせて慣性の法則に従ってペンの影がたわむ。たとえば、左向きに動かしているペンを急に減速すると、ペンの影は慣性の法則に従って左側にたわむ。本システムでは、ペンの加速度による触覚をユーザーに提供することを目的とする。

本研究は、図 1 のシステムを対象として、実験を行った。3 つのシステムのパイロットスタディの結果から、図 1 のシステムは「紙の筆記媒体の質感をもっとも与えられる」ことが明らかになり、筆記媒体の質感提示に最適だと考えたからだ。以下、図 1 のシステムを Pen Shadow Haptics と呼ぶ。

2.2 システム構成

Pen Shadow Haptics は、タブレット、タッチペンシル、PC で構成されている。タッチペンシルがタブレットに触れると、バーチャルな影が表示され、あらかじめ設定された凹凸のパターンに基づき影が変形する。ペンの位置が変わると、影も動的に変化し、ユーザーは影が実際に凹凸のある筆記媒体に映っているように感じる。

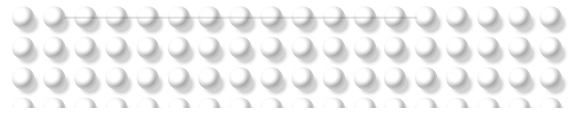


図 5 ガイド: 描画される線のアニメーション

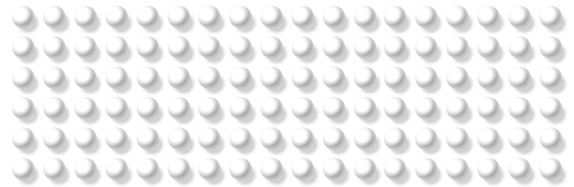


図 6 凹凸パターン: 半球が等間隔に並んだパターンを使用した。

3. 実験

本実験の目的は、タッチペンシルでの入力体験において、ペンの影が与える影響を調査することである。ペンの影の有無とペンの影の凹凸に伴う変形の有無に着目し、図 4 に示す条件 A(影なし), B(影あり・変形なし), C(影あり・変形あり) の 3 つの条件に分類した。提案手法である Pen Shadow Haptics は条件 C に該当する。なお、ディスプレイに表示する凹凸の陰影は、すべての条件で共通して表示した。

実験には 21 名が参加し、そのうち 10 名はタッチペンシルの使用経験を持つ。用途としては、メモ、PDF への書き込み、3DS のゲームプレイが挙げられた。参加者は各条件で、ガイドと同じ位置および速さで線を描く試行を繰り返して、その後アンケートに回答した。

3.1 設計方針

事前のユーザースタディから得られた知見をもとに、以下の 2 つの設計方針を立てた。

ユーザースタディでは、ペンで線を描いたり線の上をなぞったりすると、参加者はペン先や描画された線に注意が向き、ペンの影に注意が向かなくなることが明らかになった。そこで、参加者がペンの影に注意を向けるよう、ペンで線を引ける描画の機能を無効化した。しかし、参加者間で線を引く位置を統一する必要があるため、その位置を参加者に示すガイドが必要である。そこで、図 5 のようなガイドを表示し、参加者にガイドが消えた後、同じ位置に線を引くよう指示した。これにより、参加者はペンの影に注意を向けたまま、特定の線を引くことができる。

また、ユーザースタディでは影の表示の遅延によって、ディスプレイに表示された影をリアルな影と知覚することが難しくなることも明らかになった。表示の遅延は、ペンを早く動かすことで起こる。そこで、ガイドを、線が描画されるアニメーションにし、参加者にガイドと同様の速さで線を描くよう指示した。アニメーションは遅延が目立たない速度に設定した。これにより、参加者はペンを動かす速度が遅くなり、遅延を感じにくくなる。

3.2 実験装置

実験では、半球が等間隔に並んでいる凹凸のパターンを使用した(図6)。半球の直径は55 pxであり、半球の中心から中心の距離は23 pxである。ペンの影は最大17 px変形する。また、以下の機器を使用し、実装はProcessingで行なった。

- PC: MacBook Pro
- タブレット: Wacom Movink 13 (13.3型, 解像度: 1920 × 1080, フレームレート: 60fps)
- タッチペンシル: Wacom Pro Pen 3

実験時、参加者がタブレットを平滑なディスプレイとして知覚することを避けるため、メニューバーをテープで隠した。

3.3 手順

実験は以下の(1)-(13)の手順で行った。

——実験準備——

- (1) 属性調査アンケートの回答
- (2) 実験目的および注意事項の説明

——実験練習——

- (3) 条件Aの体験
- (4) 条件Bの体験
- (5) 条件Cの体験

——本実験——

- (6) 条件Aの体験
- (7) アンケート回答
- (8) 条件Bの体験
- (9) アンケート回答
- (10) 条件Cの体験
- (11) アンケート回答
- (12) (6)～(11)の試行を5回繰り返す。
- (13) 感想や気づきなどの自由回答

条件A, B, Cのそれぞれの体験で参加者はタッチペンシルで線を4回描く試行を行った。また、参加者には、ガイドと同じ位置・速さでペンを動かすよう指示した。ガイドは図5のような横の直線とし、各試行でガイドの位置は変化する。

アンケートの内容は表1に示した6つの質問を選定した。

参加者には、Q2はディスプレイに表示された半球の陰影の質問で、Q3はペンの影の質問であることを画像を添えて伝えた。これらの質問を1から7の7段階のリッカートスケールで実施した。

参加者は一人当たり合計60回の線を書き、15回のアンケートに回答した。実験時間は一人あたり約30分であった。

4. 結果

4.1 アンケート結果

アンケート結果を図7に示す。各質問について条件A, B, C間の差異を検討するためフリードマン検定を実施し、その後事後検定としてWilcoxonの符号順位検定を用いた。以下、各質問の結果について述べる。

Q1ではディスプレイとの関わりの自然さに関する質問をした。フリードマン検定の結果、 $\chi^2(2)=12.234$, $p=0.002$ となり有意差を示した。Wilcoxonの符号順位検定の結果、AB間で $W=28.000$, $p=0.004$, $r=0.664$ となり有意差を示した。AC間では $W=35.500$, $p=0.017$, $r=0.607$ となり有意差を示した。BC間では $W=81.000$, $p=0.845$, $r=0.262$ となり有意差を示さなかった。これらの結果はペンの影が表示されるとディスプレイへの関わりが自然になることを示した。加えて、影の変形の有無によって、ディスプレイへの関わりの自然さは変わらないことも示した。

Q2ではディスプレイの凹凸の陰影への注目度に関する質問をした。フリードマン検定の結果、 $\chi^2(2)=30.537$, $p<0.001$ となり有意差を示した。Wilcoxonの符号順位検定の結果、AB間で $W=33.500$, $p=0.003$, $r=0.622$ となり有意差を示した。AC間では $W=2.500$, $p<0.001$, $r=0.857$ となり有意差を示した。BC間では $W<0.001$, $p<0.001$, $r=0.876$ となり有意差を示した。これらの結果は参加者は条件C(影あり・変形あり)でディスプレイの凹凸の陰影にもっとも注目したことを示した。

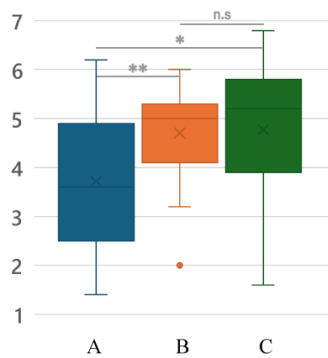
Q3ではペンの影への注目度に関する質問をした。フリードマン検定の結果、 $\chi^2(2)=37.506$, $p<0.001$ となり有意差を示した。Wilcoxonの符号順位検定の結果、AB間で $W<0.001$, $p<0.001$, $r=0.876$ となり有意差を示した。AC間では $W<0.001$, $p<0.001$, $r=0.876$ となり有意差を示した。BC間では $W=27.000$, $p=0.011$, $r=0.671$ となり有意差を示した。これらの結果は、参加者は条件C(影あり・変形あり)でペンの影にもっとも注目したことを示した。

Q4では体験の魅力度に関する質問をした。フリードマン検定の結果、 $\chi^2(2)=27.671$, $p<0.001$ となり有意差を示した。Wilcoxonの符号順位検定の結果、AB間で $W=13.500$, $p<0.001$, $r=0.774$ となり有意差を示した。AC間では $W=6.000$, $p<0.001$, $r=0.831$ となり有意差を示した。BC間では $W=32.500$, $p=0.011$, $r=0.630$ となり

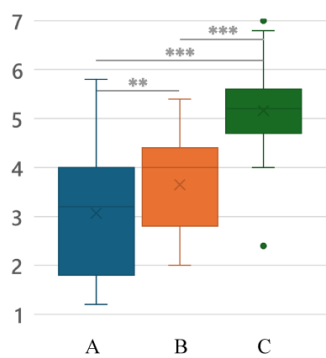
表 1 6つの質問とそれぞれの回答基準: 1から7の7段階のリッカートスケールで実施した。

記号	質問文	回答の1の基準	回答の7の基準
Q1	ディスプレイとの関わりは、どの程度自然に感じられましたか？	不自然	自然
Q2	ディスプレイの（半球の）陰影にどのくらい注目しましたか？	注目していない	よく注目した
Q3	（ペンの）影にどのくらい注目しましたか？	注目していない	よく注目した
Q4	陰影のあるペン入力の体験はどのくらい魅力的でしたか？	魅力的ではない	とても魅力的
Q5	凹凸の触覚はどのくらい感じられましたか？	感じられなかった	とても感じられた
Q6	凹凸の高低の程度はどのくらい推測できましたか？	推測できなかった	推測できた

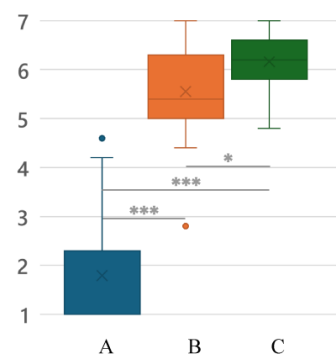
Q1: ディスプレイとの関わりは、
どの程度自然に感じられましたか？



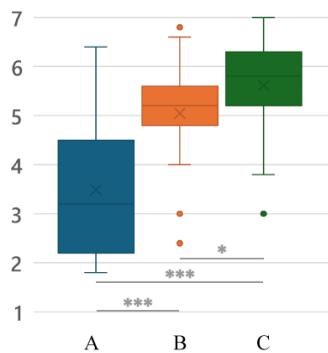
Q2: ディスプレイの（凹凸の）
陰影にどのくらい注目しましたか？



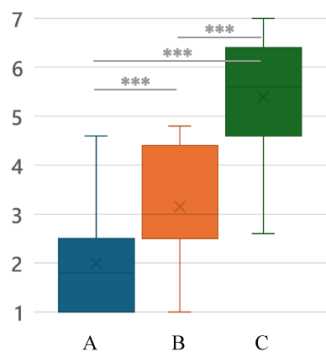
Q3: ペンの影にどのくらい
注目しましたか？



Q4: 陰影のあるペン入力の体験は
どのくらい魅力的でしたか？



Q5: 凹凸の触覚はどのくらい
感じられましたか？



Q6: 凹凸の高低の程度は
どのくらい推測できましたか？

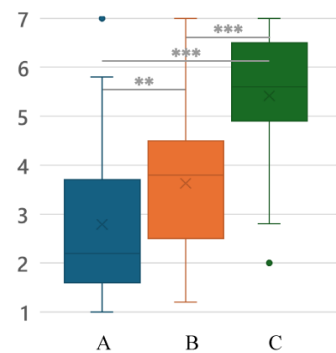


図 7 アンケートの結果: それぞれの質問項目の箱ひげ図の結果と Wilcoxon の符号順位検定の結果を示した。

有意差を示した。これらの結果はペンの影が表示されるとペン入力の体験が魅力的になることを示した。

Q5 では凹凸の触覚に関する質問をした。フリードマン検定の結果, $\chi^2(2)=37.171, p<0.001$ となり有意差を示した。Wilcoxon の符号順位検定の結果, AB 間で, $W=6.500, p<0.001, r=0.827$ となり有意差を示した。AC 間では $W<0.001, p<0.001, r=0.876$ となり有意差を示した。BC 間では $W=12.000, p<0.001, r=0.785$ となり有意差を示した。これらの結果は、条件 C(影あり・変形あり)で参加者は凹凸の触覚をもっとも感じたことを示した。また、条件

A(影なし) に比べて、条件 B(影あり・変形なし)でも参加者は凹凸の触覚を感じることも示した。

Q6 では凹凸の高低差の推測に関する質問をした。フリードマン検定の結果, $\chi^2(2)=26.703, p<0.001$ となり有意差を示した。Wilcoxon の符号順位検定の結果, AB 間で, $W=9.000, p=0.0014, r=0.808$ となり有意差を示した。AC 間では $W=1.500, p<0.001, r=0.865$ となり有意差を示した。BC 間では $W=12.500, p<0.001, r=0.781$ となり有意差を示した。これらの結果は、条件 C(影あり・変形あり)で参加者は凹凸の高低の程度をもっとも推測できるこ

と示した。また、条件 A(影なし) に比べて、条件 B(影あり・変形なし) で参加者は凹凸の高低の程度を推測できることも示した。

4.2 自由記述

体験後の自由回答のコメントを下に示す。

- (a) 条件 B で凹凸の陰影とペンの影が重なり合って影が変形しているように見えた。
- (b) 半球の上をペンが通った時に「すーっ」と音が鳴っているように感じた。
- (c) 条件 C は直線が描きにくく、条件 B は直線が描きやすい。
- (d) 条件 C は目障りになることがある。
- (e) 条件 C は文字を書くなどのタスクにおいて鬱陶しいだろう。

(a) は、参加者は試行を繰り返していくうちに、条件 B(影あり・変形なし) でもペンの影が変形したように錯覚したことを示唆した。(b) は、参加者は試行を繰り返していくうちに、実際に凹凸の上をペンで線を引いたときのような錯聴があったことを示唆した。(c)-(e) は、参加者は条件 C(影あり・変形なし) で思った通りの線が描けない、ペンの変形が目障りになることを示した。

5. 議論

5.1 変形する影の効果

結果から、ペンのバーチャルな影を凹凸に合わせて変形することで、参加者は凹凸の疑似触覚を感じ、凹凸の高低の程度を推測しやすくなった。この理由は、参加者は触覚情報よりもペンの影を優先して知覚し、凹凸の上をペンでなぞったように錯覚したからだと考えた。実際に Rock らは、視覚と触覚の情報が異なるとき視覚の情報が優先されて知覚されることを示している [4]。

一方で、ディスプレイに表示された半球の陰影も、結果に影響している可能性がある。ペンの影が変形がない条件 A、B でも疑似触覚を感じる参加者がいたためである。人間は凹凸の陰影から立体物を再構成することができる。そのため、半球の陰影によって、参加者は疑似触覚を感じ、高低の推測を容易にした可能性がある。よって、Pen Shadow Haptics の効果は影の変形だけでなく、ディスプレイの凹凸の陰影も影響している可能性がある。今後は触覚フィードバックにおける、ディスプレイの凹凸の陰影の影響を調査していく。

5.2 変形しない影による効果

アンケートの結果は、影が変形しない条件 B でも、影が表示されない条件 A と比べて、参加者は疑似触覚を感じ、高低の程度の推測を容易にする効果があることを示し

た。著者らはこの理由を影の濃さのムラによる錯覚だと考えた。ある参加者は「ペンの影が動いていなくても、凹凸の陰影と重なり合って変形しているように見えた」とコメントしたからだ。今回の実験ではペンの影は、凹凸の陰影に対して乗算して表示しており、位置によって影の濃さにムラがある。ペンを動かすとムラの位置も変化するので、影が変形して見える錯覚が起こった可能性がある。

5.3 Pen Shadow Haptics の課題

Pen Shadow Haptics は疑似触覚を提示できるが、ユーザーは影の変形を煩わしいと感じる可能性がある。参加者は変形する影に対して、「直線が描きにくい」、「目障りになることがある」、「文字を書く際には鬱陶しいだろう」などのコメントをしたからだ。これらの意見は、影の変形が参加者の思い通りに線を描くことを難しくする可能性を示している。今後はユーザー体験を損なわずにユーザーに疑似触覚を提示できるよう、影の変形の度合いを調整していく。

さらに、本実験では描画の機能を無効化しているため、描画の機能が有効な場合に疑似触覚や凹凸の推測がどの程度影響を受けるかは明らかにしていない。描画機能が有効な場合、参加者の注意がペンの影ではなく、描画された線やペン先に向く可能性がある。そのため、Pen Shadow Haptics は描画の機能がある環境では効果が大きくない可能性がある。今後は描画される線の太さによる影響や絵を描くのか文字を書くのかなどのタスクによる影響を明らかにしていく。

5.4 質感表現と立体物ペイントへの応用

これらの課題を解決することで、Pen Shadow Haptics はキャンパスの質感表現や立体物のペイントへ応用が期待できる。凹凸の肌理を調整することでユーザーはタッチペンシルでもざらざら、でこぼこといった筆記媒体の幅広い質感の知覚が可能になる。これにより、ユーザーはシワのある紙や粗いキャンパスなどの筆記媒体の種類や状態を疑似触覚を通じて知ることができる。また Pen Shadow Haptics はユーザーに凹凸の高低差を知覚させる性質があるため、タッチペンシルで 3D オブジェクトに対してペイントする際に高低差を知覚させることが可能となる。これにより、ユーザーは奥行きを把握しながら立体物にペイントを施すことが期待できる。

6. おわりに

本研究では、影による疑似触覚提示システム「Pen Shadow Haptics」を提案した。実験結果は、ペンのバーチャルな影を筆記媒体の凹凸にあわせて変化させることで、参加者に凹凸の触覚を与え、凹凸の高低差の推測を容易にしたことを示した。今後は凹凸の陰影の影響度や描画の機能がある

場合の効果を調査していく。

参考文献

- [1] Johnny C Lee, Paul H Dietz, Darren Leigh, William S Yerazunis, and Scott E Hudson. Haptic pen: a tactile feedback stylus for touch screens. In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 291–294, 2004.
- [2] William McMahan, Joseph M. Romano, Amal M. Abdul Rahuman, and Katherine J. Kuchenbecker. High frequency acceleration feedback significantly increases the realism of haptically rendered textured surfaces. In *2010 IEEE Haptics Symposium*, pp. 141–148, 2010.
- [3] Youngjun Cho, Andrea Bianchi, Nicolai Marquardt, and Nadia Bianchi-Berthouze. Realpen: Providing realism in handwriting tasks on touch surfaces using auditory-tactile feedback. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 195–205, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [4] Irvin Rock and Jack Victor. Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, Vol. 143, No. 3606, pp. 594–596, 1964.