

Pen Shadow Haptics C/D: ペンのバーチャル影を用いた疑似触覚提示システム

西郷 利基^{1,a)}

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。この課題に対し、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、スタイラス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、スタイラスペンのバーチャルな影の C/D 比を操作することで疑似触覚を与えるシステム「Pen Shadow Haptics C/D」を提案する。このシステムは、スタイラス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、7 種類の C/D 比を比較し、7 段階リッカートスケールによる主観評価を調査した。その結果、C/D 比を小さくすると重く感じさせ、C/D 比を大きくすると軽く感じさせることが示された。Pen Shadow Haptics C/D は筆記媒体の質感表現や、UI での疑似触覚フィードバックに応用できる可能性がある。

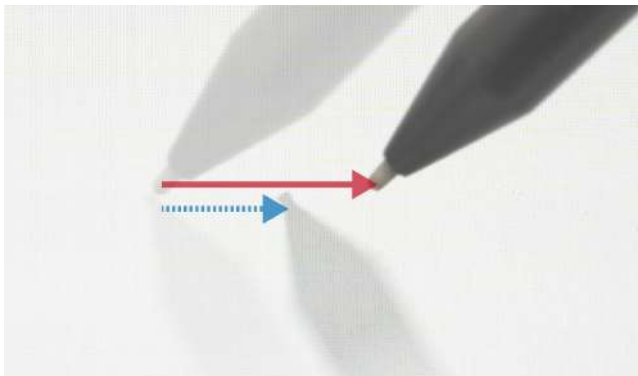


図 1 Pen Shadow Haptics C/D: スタイラスペンのバーチャルな影の C/D 比を操作することで疑似触覚を与えるシステム。画像は C/D 比が 0.5 のもの。スタイラスペンの移動量に対して、ペンの影の移動量は 0.5 倍になっている。

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。例えば、実際にシワのある紙をペンでなぞる

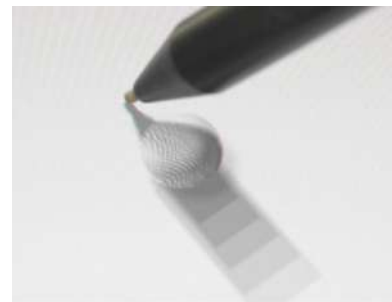


図 2 Pen Shadow Haptics: スタイラスペンのバーチャルな影が変形することで、凹凸の触覚を提示するシステム。

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。例えば、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ある。

そこで我々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 を提案した [4]。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体や表面の触覚的な感覚を錯覚させる現象である。図 2 のよ

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

うに、Pen Shadow Haptics は、バーチャルな影を表示し、その影が凹凸があるかのように変形することで疑似的な触覚を与える。

しかし、Pen Shadow Haptics は、疑似触覚の強度が弱く、線を描くペイント機能がある場合、触覚が感じにくいという課題があった。一般的には疑似触覚とは、ユーザの操作量と操作対象の移動量との間に意図的な不一致を生じさせることで、体験者に重さや軽さを知覚させる。一方で Pen Shadow Haptics は操作量（スタイラスペンの動き）と操作対象の移動量（スタイラスペンのバーチャルな影の動き）の間に意図的な不一致はなく、凹凸に沿って影を変形させただけである。このような理由から Pen Shadow Haptics は疑似触覚の強度が弱い。特にペイント機能がある場合は描画された線に注目が向き、影の変化を認識しにくくなるため疑似触覚を感じにくいことが指摘されていた。

これらの課題に対して、本研究ではペンのバーチャルな影の C/D 比を操作することで疑似触覚を与える Pen Shadow Haptics C/D を提案する (図 1)。C/D 比 (Control/Display Ratio) とは、物理的な入力デバイスの移動量 (Control) に対する、表示された操作対象 (カーソルやバーチャルハンド等) の移動量 (Display) の比率を指す。Pen Shadow Haptics C/D において、入力デバイスの移動量はスタイラスペンの移動量で、操作対象の移動量はバーチャルな影の移動量である。例えば、図 1 では、スタラスペンの移動量に対して、影の移動量は半分であるため、C/D 比が 0.5 になる。C/D 比が小さくなると体験者は重さを知覚し、大きくなると軽さを知覚することが知られている [5]。従来の Pen Shadow Haptics と異なり、影全体が移動するため、疑似触覚の強度が強く、ペイントタスクでも疑似触覚を提示できると仮定した。本研究では、ペンのバーチャルな影に C/D 比を適応し、体験者に疑似的な重さと軽さを提示する手法を提案する。

2. 関連研究

2.1 一般的な疑似触覚

疑似触覚 (Pseudo-Haptics) とは、視覚的なフィードバックを操作することで、体験者に疑似的な力覚や触覚を知覚させる錯覚現象である [6]。疑似触覚は単なる重さの表現にとどまらず、対象物の表面形状や質感の表現へと応用されている。Watanabe らは、マウスカーソルが画像上の特定の領域を通過する際、カーソルの形を変形させたり、動きに振動を加えたりすることで、ザラザラとした粗さや摩擦感を提示する Visual Haptics を提案した [7]。さらに、Saigo らはスタイラスペンのバーチャルな影を変形させることで、疑似触覚を提示する Pen Shadow Haptics を提案した [4]。

2.2 操作対象以外のオブジェクトを操作した疑似触覚

カーソルやバーチャルハンドなどの操作対象の位置をずらすのではなく、操作対象に追従するオブジェクトや操作される対象の形状を変化させることで疑似触覚を提示する手法も存在する。例えば、Mori らは、AR 使用時に手元のデバイスに付随して表示される仮想的なオブジェクトに意図的な遅延を加えることで、ユーザーに重さを感じさせる手法を提案した [8]。また、Argelaguet らは、マウスカーソルでディスプレイに表示された画像をクリックし続けると、カーソルで押しこんだように画像が凹んで表示されることで、硬さの疑似触覚を提示した [9]。Iwai らは空間型 AR において、体験者がクッションなどのオブジェクトに触る際、クッションに沈み込むアニメーションを投影することで、疑似的な柔らかさを提示した [10]。

これらの研究から、スタイラスペンの影という操作対象ではないオブジェクトに C/D 比操作を適応しても、重量知覚を与えることができると考えた。

2.3 スタイラスペンにおける疑似触覚

スタイラスペンを用いた入力操作においても、疑似触覚を生起させる手法が研究されている。例えば、Ujitoko らはペンタブレット使用時に物理刺激に加え、スタイラスペンと連動した画面上のポインタの座標を振動させることで、テクスチャをより粗く感じさせることを示した [11]。また、Ban らはペンタブレット使用時に、スタイラスペンと連動するポインタを表示し、そのポインタが一時的に静止することで静止摩擦感を提示する手法を提案した [12]。

これらの手法はポインタを表示する必要があるため、ペイントタスクのような筆記作業においては、ポインタのずれがノイズになる可能性がある。提案手法は、ポインタの表示が不要であるため、ペイントタスクでも UX を損なわずに疑似触覚を提示できる可能性がある。

3. Pen Shadow Haptics C/D

3.1 コンセプト

Pen Shadow Haptics C/D はペンのバーチャルな影に C/D 比操作を適応することで、体験者に疑似触覚を与えるシステムである。C/D 比が適応される領域にスタイラスペンが侵入すると、バーチャルな影に C/D 比が適応され、スタイラスペンとその影の位置にズレが生じる。スタイラスペンが C/D 比が適応される領域から抜け出すと、0.5 秒間かけてスタイラスペンの位置にその影に戻る。

C/D 比が適応される領域において、バーチャルな影の描画位置 (x', y') は C/D 比 (k) によって以下の式で決定している。

$$x' = x + k \cdot \Delta x$$

$$y' = y + k \cdot \Delta y$$

ここで (x, y) は 1 フレーム前の描画位置, $(\Delta x, \Delta y)$ はスタイラスペンの 1 フレーム前からの変位である. -1.0 から 2.0 までの C/D 比において, それぞれのバーチャルな影の動きを図 3 に示している.

3.2 仮説

私たちは以下の 2 つの仮説を立てた.

- ペンの影に C/D 比を適用することで, 重量知覚を提示でき, C/D 比を大きくすると軽さを提示し, C/D 比を小さくすると重さを提示する.
- 線を描画できるペイント機能がある場合でも, 疑似触覚を提示できる.

4. 実験

本実験の目的は, スタイラスペンのバーチャルな影に適用される C/D 比が, ユーザの重量知覚に及ぼす影響を調査することである. 具体的には, C/D 比, C/D 比が適用される範囲の幅 (C/D Width), およびペイント機能の有無の 3 つの独立変数を操作し, これらが主観的な重量感覚に与える影響を検証した. 事前のパイロットスタディより, C/D 比が適用される範囲の幅によって疑似触覚の感じ方が変わる可能性が示されたため, その幅による重量知覚への大まかな影響も調査した.

実験には, 大学生 14 名 (男性 5 名, 女性 9 名, 平均年齢 21.8 歳, $SD=1.5$) が参加した. すべての参加者は右利きであり, スタイラスペンの使用は 9 人がほとんどなく, 4 人が月に 1,2 回, 1 人が週 2,3 回であった.

実験システムは, ペンタブレット (Wacom Movink 13) および付属のスタイラスペンを用いて構成した. ディスプレイのリフレッシュレートは 60Hz であった. 実験用アプリケーションはスタイラスペンの傾きを取得しやすい Swift を用いて開発した.

4.1 実験条件

本実験では, 以下の 3 つの独立変数を設定した (合計 $7 \times 2 \times 2 = 28$ 条件).

(1) C/D 比 (7 水準):

スタイラスペンの移動量に対する影の移動量として, 事前のパイロットスタディから -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の 7 種類を設定した (図 3).

(2) C/D Width (2 水準):

C/D 比が適用される画面上の横方向の長さとして, 事前のパイロットスタディから 100, 200 pixel の 2 種類を設定した (図 4). この領域にスタイラスペンが入るとバーチャルな影に C/D 比が適応され, 領域から出るとペン先にバーチャルな影が滑らかに戻る.

(3) ペイント機能の有無 (2 水準):

スタイラスペンで線が描画されるペイント機能有り条件と, 線が描画されない無し条件を設定した (図 4). ペイント機能があっても疑似触覚を与えるという仮説を確かめるためだ.

4.2 実験手順

実験は以下の流れで行われた. 本実験は「ペイント機能有りセッション」と「ペイント機能無しセッション」の 2 つのセッションを実施した. 順序効果を相殺するため, 半数の参加者でセッションの順番を逆転した.

- (1) 概要説明: 実験の目的と手順を説明した.
- (2) 実験練習: 実験システムの操作方法に慣れるため, 2 回の練習試行を行った.
- (3) 本実験 (ペイント機能有りセッション): ペイント機能有りの条件下で, 7 種類の C/D 比と 2 種類の C/D Width の合計 14 種類の比較刺激について調査した.
- (4) 本実験 (ペイント機能無しセッション): ペイント機能無しの条件下で, 7 種類の C/D 比と 2 種類の C/D Width の合計 14 種類の比較刺激について調査した.
- (5) 半構造化インタビュー: 全試行終了後に半構造化インタビューを行った.

4.3 タスク

参加者は本実験のセッションで, 画面左側に提示される標準刺激 (C/D 比 = 1.0) と, 画面右側に提示される比較刺激の 2 つを順に体験し, アンケートに回答した. 比較刺激は, 各セッションにおいて $7(\text{C/D 比}) \times 2(\text{C/D Width}) = 14$ 条件をそれぞれ 5 試行実施し合計 70 試行がランダムな順序で提示された. これらのタスクをペイント機能有りセッションとペイント機能無しセッションで繰り返すため, 合計 140 試行が行われた.

参加者には標準刺激と比較刺激において, 以下の手順にしたがって, 線を書くことを指示した (図 5).

- (1) 画面に表示されるガイド線のアニメーションを目視する.
- (2) 次に, ガイド線と同じ位置, 同じ移動速度でスタイラスペンを動かす.

このガイド線による制御を行った理由は 2 点ある. 第一に, ペンを極端に速く動かすことによって生じるラグの知覚を防ぐためである. 第二に, 参加者によって C/D 比が適用される移動距離にばらつきが生じるのを防ぎ, すべての参加者が C/D 比の影響を等しく受けるようにするためである.

4.4 評価方法

4.4.1 リッカート尺度による主観評価

参加者は標準刺激と比較刺激を体験した後, 標準刺激の

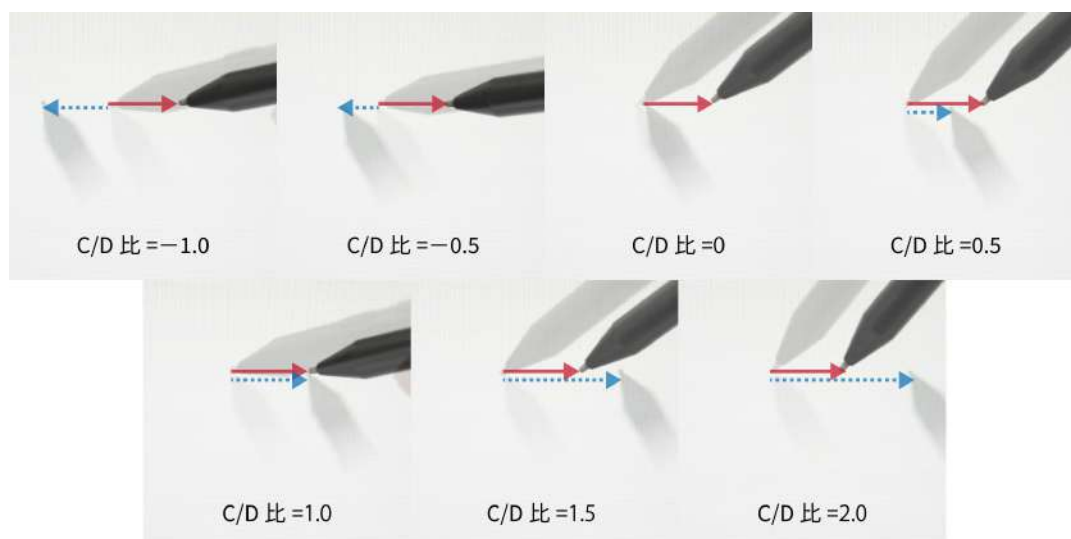


図 3 それぞれの C/D 比に対するバーチャルな影の挙動。例えば、C/D 比が-0.5 の時、C/D 比が適応される領域において、影の速度はスタイラスペンの速度の-0.5 倍になり、スタイラスペンの進行方向逆に移動する。C/D 比が 0 の時、影の速度はスタイラスペンの速度の 0 倍になり、静止する。C/D 比が 0.5 の時、影の速度はスタイラスペンの速度の 0.5 倍になり、動きは鈍くなる。C/D 比が 1.0 の時、影の速度はスタイラスペンの速度と同じになる。C/D 比が 1.5 の時、C/D 比が適応される領域において、影の速度はスタイラスペンの速度の 1.5 倍になり影がスタイラスペンを追い抜く

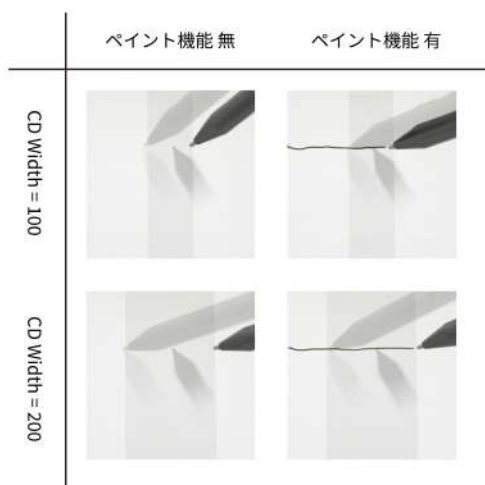


図 4 実験の独立変数であるペイント機能の有無と 2 種類の C/D Width:7 種類の C/D 比に対してそれぞれこの 4 つの条件を調査した。C/D Width の幅をわかりやすく着色している。

重さを基準としたとき、比較刺激の重さをどのように感じるかを 1 (非常に軽い) から 7 (非常に重い) までの 7 段階のリッカート尺度で回答した。

4.4.2 半構造化インタビュー

実験終了後、半構造化インタビューを行い、以下の 5 項目について聴取した。

- それぞれの影の挙動において、どのような感覚を覚えたか。
- 影がペン先から離れる際、影の見た目や感触をどう感じたか。

表 1 Art Anova の結果

要因 (Factors)	<i>F</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
ペイント機能	0.14	1, 13	.714
C/D 比	49.84	6, 78	< .001
C/D Width	30.33	1, 13	< .001
ペイント機能 × C/D 比	1.00	6, 78	.435
ペイント機能 × C/D Width	2.38	1, 13	.147
C/D 比 × C/D Width	5.68	6, 78	< .001
ペイント機能 × C/D 比 × C/D Width	1.41	6, 78	.220

- 影がペン先から離れすぎた場合、どう感じたか。
- 操作中に違和感やラグを感じることはあったか。
- ペイント機能有りとペイント機能無しで、感覚にどのような違いがあったか。

5. 結果

5.1 リッカート尺度による主観評価

リッカート尺度による主観評価では、C/D 比 (7 水準)、C/D Width (2 水準)、および、ペイント機能の有無 (2 水準) の 3 要因が、参加者の主観の評価に与える影響を検証した。

データは正規分布に従わない順序尺度 (7 段階リッカート尺度) であったため、順位変換を用いた 3 要因反復測定分散分析 (Art Anova) を実施した。主効果または交互作用が有意であった場合、事後検定として Holm 補正を用いた Wilcoxon 符号付順位検定を行った。有意水準は 5% とした。

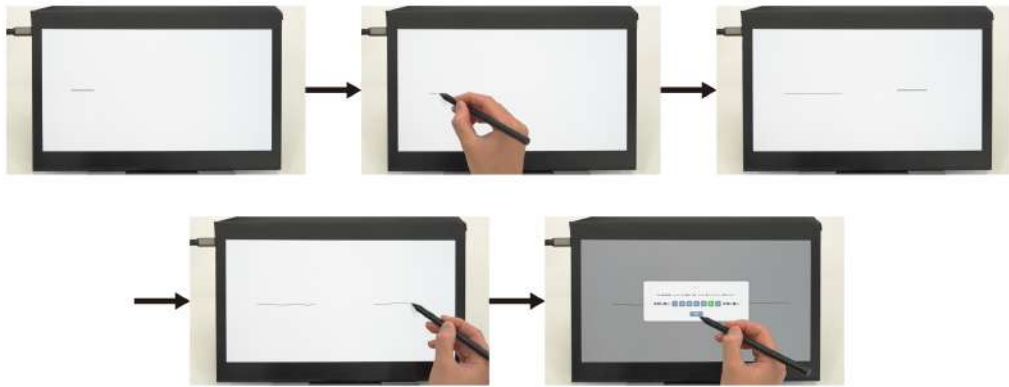


図 5 実験参加者はそれぞれの試行において、画面左で標準刺激を体験し、画面右で比較刺激を体験する。それぞれの体験では、まずガイド線を目視し、次にガイド線と同じ位置、速さで線を書くよう指示された。体験者は標準刺激と比較刺激を体験した後、アンケートに答えた。

5.1.1 全体的な傾向

Art Anova の結果を表 1 に示す。この結果から、C/D 比の主効果 ($F(6, 78) = 49.84, p < .001$)、および C/D Width の主効果 ($F(1, 13) = 30.33, p < .001$) に有意な差が認められた。C/D 比と C/D Width によって、重量知覚が変化することを示している。また、C/D 比と C/D Width の間の交互作用 ($F(6, 78) = 5.68, p < .001$) も有意であった。C/D 比による重量知覚の変化の仕方は、C/D Width によって異なることを示している。

一方で、ペイント機能の有無による主効果は有意ではなかった ($F(1, 13) = 0.14, p = .71$)。これはペイント機能があっても、提案手法による疑似触覚提示の効果が変わらないことを示している。

5.1.2 C/D 比のと C/D Width の影響

C/D 比の違いは主観評価に強い影響を与えた。図 6 にペイント機能無しの場合の各条件における結果を、図 7 にペイント機能有りの場合の各条件における結果を示す。標準刺激 (C/D 比 = 1.0) との比較検定を行った結果、ペイント機能の有無や C/D Width に関わらず、C/D 比が 1.0 未満 (-1.0, -0.5, 0.0, 0.5) の条件では有意に重さを知覚させ、C/D 比が 1.5 の条件では有意に軽さを知覚させることが示された ($p < .05$)。

また、C/D Width の違いによっても主観評価に強い影響を与えた。図 8 はそれぞれの C/D 比における、2 種類の C/D Width を比較したグラフである。2 種類の C/D Width に対して、比較検定を行った結果、C/D 比が 1.0 未満 (-1.0, -0.5, 0.0, 0.5) の条件では C/D Width=200 の方が優位に重さを知覚させ、C/D 比が 1.5 の時は C/D Width=200 の方が優位に軽さを知覚させた。これは、C/D Width が大きい方が、より強い重量知覚を与えられることを示している。

5.2 半構造化インタビュー

半構造化インタビューの結果を整理し、(1) C/D 比の変化による感覚の違い、(2) 離れる影と主体感の喪失、および (3) ペイント機能の有無による影響の 3 つの観点から分析した。

5.2.1 C/D 比の変化による感覚の違い

参加者は提示された C/D 比の条件ごとに、単なる「重い・軽い」という尺度だけでなく、異なる質の感覚を報告した。

まず、影がペン先とは逆方向に移動する条件 (C/D 比 < 0) については、「(ゴムなどで) 引っ張られているような弾性力を感じた (5 人)」、「ペットの散歩のように引っ張られる感覚があった (1 人)」といった、張力や弾性力に関する記述をした参加者がいた。

影がペン先よりも先行する条件 (C/D 比 > 1) については、「勝手に先に進んでしまう」という意見があった (3 名)。一方で、右利きの参加者が右方向にペンを動かすタスクの性質上、「自分の手で影が隠れてしまい、視認できなかった」または「見えにくかった」と報告した参加者がいた (6 名)。

5.2.2 離れる影と主体感の喪失

影とスタイラスペンの先の距離が広がりすぎた場合、影をスタイラスペンの影と認識できず、疑似触覚効果が薄れることが報告された。具体的には、「影が離れすぎると、自分のペンの影ではなく別物体のように感じた」、「犬がリードを離れて暴走したように感じた」、「自分とは関係ないガイドのように見えた」といった、自己帰属感の喪失を示唆する発言があった (5 名)。この際、「距離が離れすぎると重さも軽さも感じなくなる」という意見も見られた (3 名)。

また、システムの挙動に対する解釈として、疑似触覚ではなくシステムの不具合として認識する傾向も見られた。影の遅れや動きに対して「ラグのように感じた」「バグや

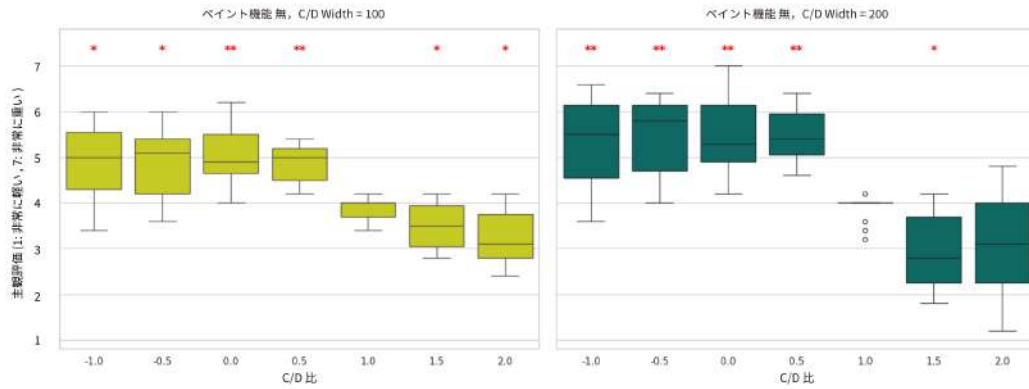


図 6 ペイント機能無しの場合の各条件の事後検定の結果. *は C/D 比=1.0 と比較した時の優位差を示している.

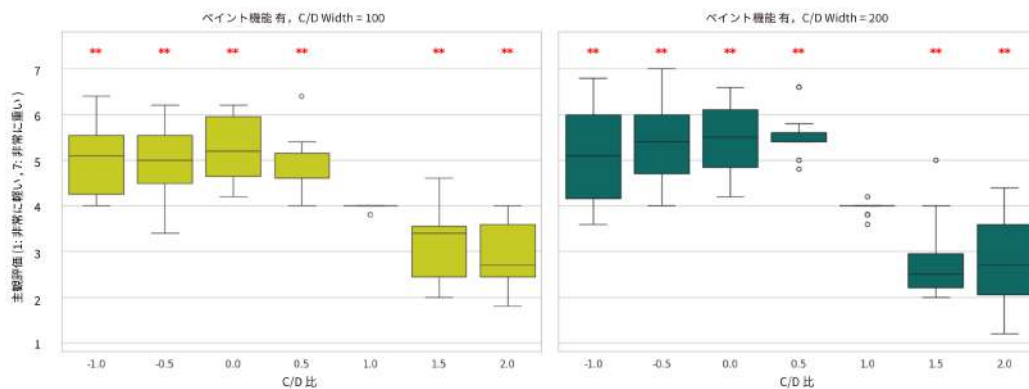


図 7 ペイント機能有りの場合の各条件の事後検定の結果. *は C/D 比=1.0 と比較した時の優位差を示している.

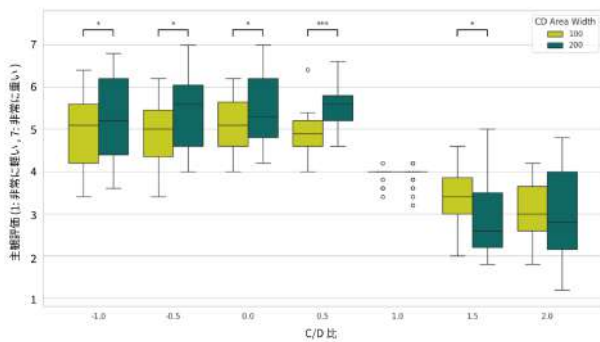


図 8 2 種類の C/D Width を比較した各条件の事後検定の結果. * は 2 つの C/D Width を比較した時の優位差を示している.

故障のように感じた」と述べた参加者がいた (9 名). ただし, ラグと認識するからこそ, 疑似触覚を感じると報告した参加者もいた (2 名). また, 最初はラグや違和感として捉えていたが, 「徐々に慣れてきた」, 「試行を重ねると重さとして感じるようになった」と, 時間経過による順応を報告した参加者もいた (2 名).

5.2.3 ペイント機能の有無による影響

実際に線が描画される「ペイント機能有り」条件と, 線

が描画されない「ペイント機能無し」条件の比較において, 参加者の感覚には 2 つの相反する傾向が見られた.

第一に, 線が描画されることで主体感が強化されるという傾向である. 「線が描ける方が, 自分で操作している感覚が強かった」と回答した参加者は 3 名いた. 線という物理的な軌跡が残ることで, 影の動きが不自然であっても, システムに対する信頼を持ちやすくなると考えられる.

第二に, 線が描画されない方が「影の動き」に意識が集中し, 結果として重量錯覚を感じやすかったという傾向である. 「線がない方が影を意識するため, 重さの違いにははっきりと気づけた」と述べた参加者がいた (2 名).

また, 「線がある方が, 自分の手の速度と影の速度の差分を比較しやすいため, 重さや軽さを感じやすかった」と逆の意見を述べる参加者もあり (3 名), ペイント機能が主体感を向上させるか, 注意を阻害するノイズとして機能するかは, 個人や注目するポイントによって異なることが示唆された.

6. 議論

6.1 タブレットにおける疑似触覚提示

本研究の成果は、体験者が入力部分とディスプレイを同時に見る状況において、操作対象そのものではなく、操作対象の影に C/D 比を適応することで、重量知覚の操作が可能であることを示した点だ。従来の疑似触覚の多くは、マウスカーソルやバーチャルハンドの表示位置をずらすことで提示していた。しかし、タブレットや AR といった環境では体験者は入力部分と表示部分を同時に見るため、従来の方法を用いることが難しい。我々は、操作対象ではなく、その影に注目し C/D 比を適応することで、体験者は入力部分と表示部分を同時に見る状況においても「重さ」「軽さ」の知覚が可能であることを示した。実験の結果から、スタイラスペンのバーチャルな影に対し、C/D 比を 1.0 未満に設定することで重さを、1.0 より大きく設定することで軽さを知覚させる傾向を示した。体験者がスタイラスペンのバーチャルな影をスタイラスペンの動きと連動させ、スタイラスペンに C/D 比が適応されたような重量知覚を与えられたのだと考えられる。操作対象の影に C/D 比を適応することで、タブレットや AR 環境でも疑似触覚を提示できる可能性がある。

6.2 スタイラスペンから離れるペンの影

本来、物理現象としての影は、ペン先から遊離して動くことはあり得ない。したがって、もしユーザーがバーチャルな影をリアルな影として厳密に捉えているのであれば、ペン先から影が離れた瞬間に、影に対する主体感の喪失を報告するはずだ。

しかし、本実験の半構造化インタビュー結果はこれとは異なることを示した。参加者は、影がスタイラスペンから極端に離れた条件においてのみ「主体感が低下した」「自分とは無関係な物体に見えた」という報告がなされた。この事実は、ユーザーがバーチャルな影を、物理法則に完全に従う「影」としてではなく、自身の操作位置を視覚的にフィードバックするための「ポインタのような記号的な存在」として無意識的に解釈していた可能性を示唆している。

また、影に対する主体感の喪失に関する報告は、影への主体感を保ちながら操作できる境界線が存在することを意味する。バーチャルな影がスタイラスペンに近いとき、体験者はバーチャルな影を操作対象に連動するポインタとして認識できる。しかし、バーチャルな影とスタイラスペンの距離が閾値を超えると、操作対象に連動するポインタとしての認識が薄れる。

以上のことから、Pen Shadow Haptics C/D は、バーチャルな影を単に遅延させるだけでなく、この主体感の境界線を超えない範囲でズレを制御するパラメータ設計が、効果

的な触覚提示と操作性の両立において不可欠となる。今後はバーチャルな影に対する主体感の境界線を調査していく必要がある。

6.3 ペイント機能の有無と疑似触覚の強度

我々の仮説通り、ペイント機能がある場合でも疑似触覚を提示できることが示されたが、これには個人差があることが示唆された。半構造化インタビューの結果から、「線が描ける方が、自分で操作している感覚が強かった」というコメントがあった一方で、「線がない方が影を意識するため、重さの違いにはっきりと気づけた」というコメントもあった。これらのことから、ペイント機能があることで「影への主体感の強化」と「影への注目の低下」の2つの相反する効果が同時に働き、互いに打ち消した可能性が考えられる。

6.4 疑似的な質感表現への応用

本実験では主に「重さ」の知覚について検証したが、C/D 比の操作は「重さ」以外の質感表現にも応用できる可能性が示された。特に C/D 比が負の値においては、インタビューにて「ゴムで引っ張られているような感覚」を感じたという報告が複数得られた。これは、影の挙動によって「重さ」だけでなく、「弾性」や「粘性」といった質感を表現できる可能性を示唆している。

Pen Shadow Haptics C/D は質感表現や UI に応用できる可能性がある。画面上のテクスチャ画像に合わせて影の C/D 比を動的に変化させることで、重さや軽さを提示し、テクスチャの質感を表現することができる可能性がある。また、スタイラスペンをドラッグアンドドロップして操作するスライダーなどの UI において、提案手法を導入すれば疑似触覚フィードバックを与えられるので UX が向上する可能性がある。

7. おわりに

本研究では、タブレットにおけるペン入力時の触覚フィードバックの欠如という課題に対し、物理的なアクチュエータを用いずに視覚的な錯覚のみで疑似触覚を提示する手法 Pen Shadow Haptics C/D を提案した。本手法は、スタイラスペンのバーチャルな影に対して C/D 比を適用することで、体験者に重さや軽さの知覚を生起させるものである。評価実験の結果は、影の C/D 比を 1.0 未満に設定することで重さを、1.0 より大きく設定することで軽さを提示可能であることを示した。

今後の展望として、C/D 比の変化を制御することで、弾性や粘性といった多様な材質感の表現への応用が挙げられる。特別なハードウェアを用いず、既存のタブレットにおける UI や疑似的なテクスチャ再現など、幅広いアプリケー

ションにおける UX 向上に寄与することが期待される。

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] 西郷利基, 森本浩輔, 渡邊恵太. Pen shadow haptics: ペンの影による疑似触覚提示システム. 情報処理学会 インタラクション 2025, pp. 267–272. 情報処理学会, 2025.
- [5] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, p. 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] Anatole Lécuyer, Sabine Coquillart, Abderrahmane Kheddar, Paul Richard, and Philippe Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90, 2000.
- [7] Keita Watanabe and Michiaki Yasumura. Visual-haptics: generating haptic sensation using only visual cues. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '08, p. 405, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [8] Shohei Mori, Yuta Kataoka, and Satoshi Hashiguchi. Exploring pseudo-weight in augmented reality extended displays. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 703–710, 2022.
- [9] Ferran Argelaguet, David Antonio Gómez Jáuregui, Maud Marchal, and Anatole Lécuyer. Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect. *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 10, No. 3, August 2013.
- [10] Parinya Punpongsonan, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Softar: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1279–1288, 2015.
- [11] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, and Koichi Hirota. Modulating fine roughness perception of vibrotactile textured surface using pseudo-haptic effect. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, No. 5, pp. 1981–1990, 2019.
- [12] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, and Koichi Hirota. Presenting static friction sensation at stick-slip transition using pseudo-haptic effect. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 181–186, 2019.