

タッチパネルにおける錯視現象を利用した Pseudo-Haptics の生起

菫澤雄太¹ 星野聖² 小川剛史³

概要: タッチパネルにおける Pseudo-Haptics は、指の動きとポインタの表示にずれを生じさせることで生起されているが、このずれを生じさせずに Pseudo-Haptics を生起する方法はまだ検討されていない。本稿では、背景を白黒の縞模様、ポインタを白の矩形としたフットステップ錯視を応用することで、Pseudo-Haptics を生起させる方法を提案する。感覚に関わる形容詞対を用いた意味微分法による評価実験では、白の縞模様の高さとポインタの横幅に応じて、被験者が知覚する擬似触覚に変化が生じることを確認した。

キーワード: Pseudo-Haptics, 錯視, タッチパネル

Generating Pseudo-Haptics Feedback on Touch Panel using Illusion Phenomena

YUTA NIRASAWA^{†1} KIYOSHI HOSHINO^{†2}
TAKEFUMI OGAWA^{†3}

Abstract: Pseudo-Haptics in touch panels are generated by creating a gap between the finger movement and the pointer display, but a method to generate Pseudo-Haptics without this gap has not yet been investigated. In this paper, we propose a method of generating Pseudo-Haptics by applying the footstep illusion, in which the background is a black-and-white stripe pattern and the pointer is a white rectangle. In an evaluation experiment using the semantic differential method with sensory adjective pairs, it was confirmed that Pseudo-Haptics perceived by the subject changed depending on the height of the white stripes and the width of the pointer.

Keywords: Pseudo-Haptics, illusion phenomena, touch panel

1. はじめに

タッチパネルは、画面に表示された情報を指で直接操作することが可能であり、直感的なインタラクションを提供できる一方で、ユーザからの入力に対する触力覚フィードバックがないため、例えばボタンを押せたかどうか分かりづらいなどの問題が指摘されてきた[1]。近年では、振動モータなどのアクチュエータを搭載したデバイスが普及し、振動刺激によって画面に触れたことを伝えたり、電話やメールの着信を伝えたりすることが可能になっている。また、iPhone(Apple Inc.)に搭載されている Taptic Engine[2]では、振動するおもりとアクチュエータを用いて、あたかもパネル上のボタンを押し込んだような感覚を表現している。アクチュエータを用いた触力覚フィードバックの提示では、実際に物理的な刺激を指に与えることが可能であるが、タッチパネル内に振動刺激[3]や静電気吸着[4]を実現する機構を組み込む必要があり、タッチパネルが大きくなるとコストの面だけでなく、目的とする感覚を提示することが困難となるといった問題が考えられる。

物理的なアクチュエータを用いずに触力覚を提示する方法として、Pseudo-Haptics[5]を応用した研究が進められている。Pseudo-Haptics とは、ヒトが知覚する視覚刺激と触覚刺激に不整合があった場合に、脳がその不整合を解消しようとして、実際には存在しない触覚や触感を知覚する現象である。例えば、マウス操作に対して画面上のポインタの位置や移動速度を変化させることで、特殊なデバイスを用いなくてもマウスが重くなったり、軽くなったり、抵抗感が変化したように感じさせることが可能である。Pseudo-Haptics の生起や強度の制御は、入力となる操作量と出力となるポインタの動作量に対して CD 比 (Control/Display Ratio: 入力量と出力量の比) を設定し、それを動的に変化させることで行われる。CD 比を適切に制御するソフトウェアを組み込むことで表現でき、専用のデバイスを必要としない利点がある。しかし、Pseudo-Haptics は、その生起原理から、入力と出力に意図的に不整合を生じさせる必要があるため、ポインタなどの操作対象を直接触れて操作するタッチパネルにおけるインタフェースでは問題が生じる。

¹ 東京大学大学院 学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,
The University of Tokyo

² 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems,
The University of Tsukuba

³ 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center,
The University of Tokyo

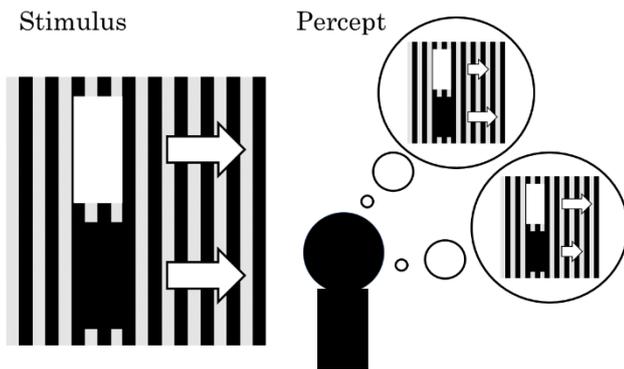


図 1. フットステップ錯視によるポインタの動向

そこで本研究では、タッチパネル上において入力と出力に意図的な不整合を生じさせることなく Pseudo-Haptics を生起させるため、フットステップ錯視[6]を用いた触覚提示手法を提案する。フットステップ錯視とは、縞模様の背景上で等速で移動するオブジェクトが不連続に移動しているように見える錯覚である(図 1)。本稿では、提案手法について述べ、フットステップ錯視によってどのような触覚錯覚が生起するかを調査した実験について述べる。

2. 関連研究

タッチパネルを用いた触力覚提示は以前より幅広く研究が行われており、その手法は大きく 3 つに分類される。1 つ目はタッチパネルに触れた際に、電気刺激や振動刺激を与えることで指に感覚刺激を伝える手法である[3,4]。2 つ目はペンなどの機械的な操作機器を用いて画面に入力操作を行い、入力機器そのものに対して機械的な刺激を加えることで感覚を提示する手法である[7]。これらの 2 つに分類される手法は追加の入力機器が必要であるため、日常的に使用しているデバイスへの応用が難しいという問題点がある。3 つ目は、視触覚間の相互作用を利用して触力覚を提示する手法である。その代表例として Pseudo-Haptics があげられる[5]。ユーザの入力操作 (Control) とユーザの入力として反映されるポインタの出力動作 (Display) の速度比を CD (Control/Display) 比として設定し、視覚フィードバックのみで触力覚を提示する。例えば、タッチパネルにおける操作を考えると、入力はドラッグする指の移動距離 (C: Control), 出力は画面上のポインタの移動距離 (D: Display) となり、CD 比 (R_{CD}) を用いて(1)式でその関係が表される[14]。

$$D = R_{CD} * C \quad (1)$$

CD 比が 1 よりも小さい場合はポインタは入力動作よりも遅く、1 よりも大きい場合は入力動作よりも速く移動する。

これまで Pseudo-Haptics に関する研究の多くは、主にデスクトップ環境を対象として進められており、ポインタの

形状やサイズ、重さや弾力性といった触力覚の生起が確認されてきた[8-11]。近年では、この Pseudo-Haptics をタッチパネル上で生起させることを目的とした研究も行われている。宇治土公ら[12]は、タッチパネル上での操作はポインタと指の動きを直視できてしまうことから両者の位置のズレを容易に確認できてしまうこと、そしてタッチパネルで CD 比を変化させると指でポインタが隠れてしまうという問題点を解決するため、スワイプ操作によって背景移動量を変化させて Pseudo-Haptics を生起させることに成功している。Costes ら[13]は機械的な機構を含まないタッチパネルを使用し、背景のテクスチャや表現したい触り心地に応じて、複数のポインタ表示パターンを組み合わせ、様々な材質の面に触れているような感覚を表現することを試みている。伴ら[14]は、タッチパネル上でオブジェクトを移動させた際に生じる指とオブジェクトのズレに着目し、オブジェクトと指をバーチャルな紐でつなぐことで、より効果的に Pseudo-Haptics を生起させることを検討している。また、小島ら[15]は CD 比の操作だけでなく、背景の移動を工夫することでざらざら感を提示することを検討している。

3. 提案手法

これまでのタッチパネルにおける Pseudo-Haptics の生起に関する研究では、ポインタに相当する対象に対して行った指の動きと表示するポインタの間で不整合を生じさせることで擬似触力覚を提示しているが、ポインタが指によって隠れてしまうために、操作をスワイプに限定するなどして問題に対応している。提案手法では、指の動きとポインタの動きに不整合を生じさせずに Pseudo-Haptics を生起させることを目的として、フットステップ錯視を応用してポインタを提示する。

3.1 フットステップ錯視

フットステップ錯視とは、図 1 に示すように黒と灰色の縞模様の背景の上で白と黒の矩形が等速で並進しているとき、あたかも矩形が交互に移動しているように見える錯覚現象である[16]。動く矩形と背景のコントラストによって錯視現象が引き起こされていると考えられている[16-19]。また、フットステップ錯視は中心視野より周辺視野で知覚した場合のほうが大きいという特徴がある[20]。この錯視現象は、矩形の色と背景の色とのコントラストが低い場合には、矩形の移動を観測することが困難となり矩形が停止しているように感じ、コントラストが大きい場合には矩形の動きの認知が容易になることから起こると考えられている。図 2 のように、背景の縞模様幅を ω 、オブジェクトの幅を x 、ポインタの先端がポインタと同色の次のストライプに移動するまでの区間を 1 周期とし、両端が白いストライプ

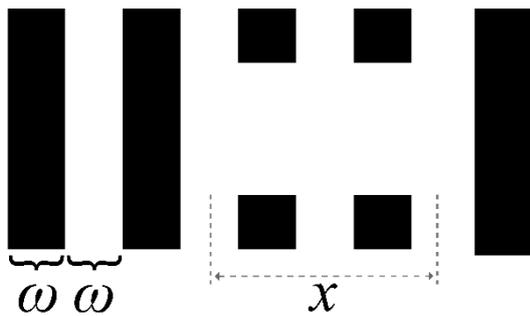


図2. ポインタと背景の各幅に x と ω を設置

イブにある時間と1周期の比を T と置くと、フットステップ錯視における錯視の度合いは以下のように数値化されている[21].

(i) $\omega \leq x \leq 2\omega$ の時

$$T = \frac{x - \omega}{2\omega}$$

ただし、 T は $x = 2\omega$ の時最大値 $1/2$ となり、 $x = 0$ のとき最小値 0 をとる.

(ii) $2\omega \leq x \leq 3\omega$ の時

$$T = \frac{3\omega - x}{2\omega}$$

ただし、 T は $x = 2\omega$ の時最大値 $1/2$ となり、 $x = 3\omega$ のとき最小値 0 をとる.

以上より、 T が最大となるのは $x = 2\omega, 4\omega, 6\omega \dots$ とされている.

3.2 フットステップ錯視を用いた擬似触覚提示

フットステップ錯視を用いて擬似触覚を提示するため図3のようなインタフェースを構成する. 背景は白と黒の横縞模様とし、その上に表示したひとつの白い長方形を上下に指でスライドさせるシンプルなインタフェースである. この際、ポインタと背景に対するCD比は1で固定し、指の移動速度とポインタの移動速度に遅延がないものとする.

また実験を行う際はポインタの横幅とストライプの幅が知覚に与える影響を調査するため、 $\omega = \omega_1 + \omega_2$ として白のストライプの縦幅 ω_1 を20~140[pt]、ポインタの横幅 y を20~200[pt]で変更して評価する. この際黒と白のストライプの幅の合計値は $\omega_1 + \omega_2 = 150$ [pt]で固定する. 提案手法では、フットステップ錯視を最も引き起こしやすくするために、3.1(ii)を満たす ω の条件を保持しつつ、ポインタを1つに減らしてポインタの横幅とストライプの幅を変更して感覚を提示する.

4. 実験1：提案手法による擬似触力覚の提示と評価

4.1 実験目的

提案手法では、従来のようにCD比を設定して意図的な

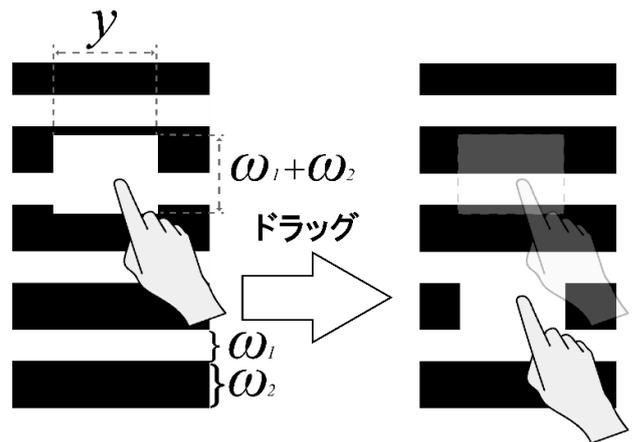


図3. 提案手法における擬似触力覚の提示

視覚と触覚の不整合を生じさせず、錯視によって不整合が生じているように感じさせて擬似触覚を生起しようとするのがポイントである. そこで本実験では、錯視によって擬似触覚が生起するのかどうか、また擬似触覚が生起した場合にどのような触感を知覚するのかを明らかにすることを目的とする.

4.2 実験内容

図3に示したインタフェースを実験システムとしてiPhone11 (Apple Inc.) に実装した. ポインタ (長方形) の背景に対するCD比を1で固定し、指の移動速度とポインタの移動速度に意図的な遅延は設定しない. 背景は黒と白のストライプの幅の合計値を $\omega_1 + \omega_2 = 150$ [pt]固定し、白のストライプの縦幅 ω_1 を20~140[pt]で変更する. またポインタの横幅 y も20~200[pt]で変更できるようにした. 実験システムのフレームレートは60[fps]である. また、実験参加者は20代5名 (男性3名、女性2名)、利き手は全員右手であった.

以下に実験タスクについて示す. 実験参加者は端末を机の上に置き、タッチパネル上に表示されたポインタを利き手で上下に3回連続してドラッグする. 白のストライプの

表1. SD法における評価項目

	評価項目
a	すべすべした(-3) - ざらざらした(+3)
b	平らな(-3) - 凹凸な(+3)
c	キメの細かい(-3) - きめの粗い(+3)
d	ちくちくしない(-3) - ちくちくする(+3)
e	滑らかな(-3) - 引っかかる(+3)
f	ヒヤッとしない(-3) - ヒヤッとした(+3)
g	暖かい(-3) - 冷たい(+3)
h	しっとりとした(-3) - 乾いた(+3)
i	ぬるぬるした(-3) - さらさらとした(+3)
j	かたい(-3) - 柔らかい(+3)
k	弾性力のある(-3) - 弾性力のない(+3)

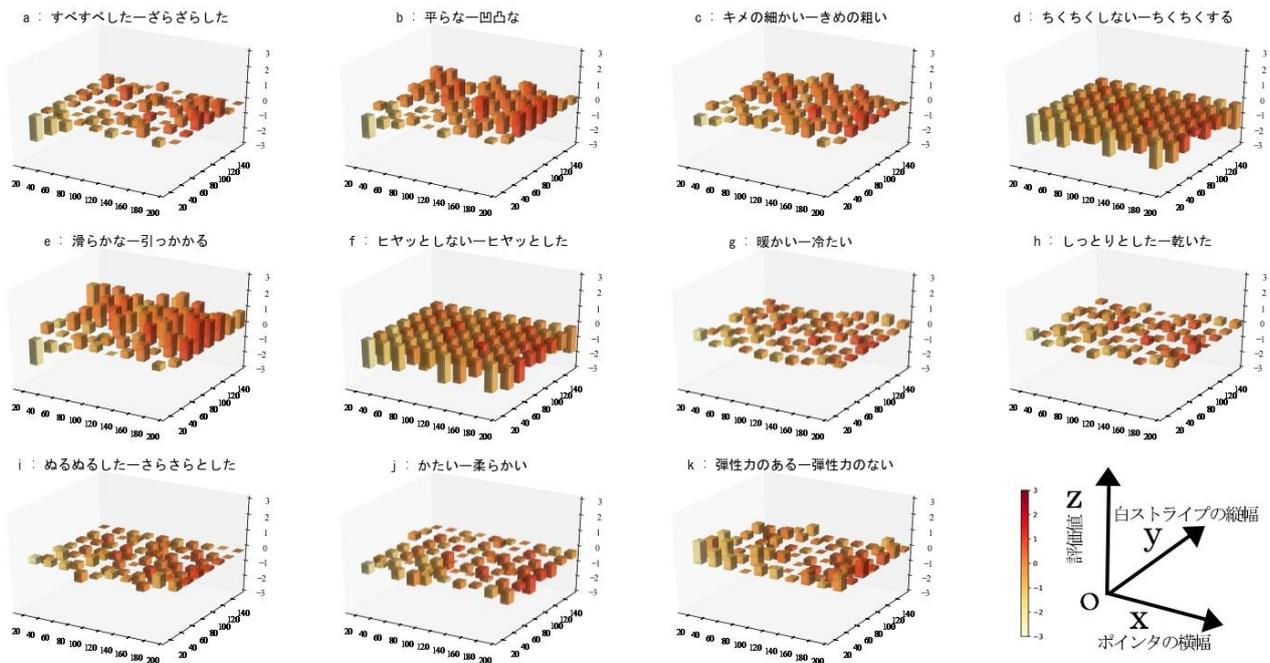


図 4. 実験 2 における全参加者の評価値から算出された各評価項目の平均値の 3 次元棒グラフ
(x 軸をポインタの横幅, y 軸を白ストライプの縦幅, z 軸を評価値)

縦幅を 20~140[pt] (間隔 20[pt]), ポインタの横幅を 20~200[pt] (間隔 20[pt]) で変更し, 計 70 通り (白ストライプの幅 7 通り×ポインタの横幅 10 通り) の条件で体験する. 各条件の体験後, 表 1 に示した形容詞対 11 項目について 7 段階 (-3 から 3) でどちらの形容詞に近い感覚を得たか評価させ, SD 法(意味微分法)により分析した[22]. 用いた形容詞対は, 日常で触れる機会のある材質から連想される触り心地から連想される形容詞対[23]をもとに決定した(表 1). また, 条件の提示順序は, 順序効果を考慮して被験者ごとにランダムに設定した.

4.3 実験結果と考察

本実験の各評価項目における全参加者の評価値から算出された平均値の 3 次元棒グラフを図 4 に示す. x 軸, y 軸, z 軸は, それぞれポインタの横幅, 白ストライプの縦幅, および評価値を示している.

結果より, ポインタの横幅と白ストライプの縦幅の違いによって, 印象が変化する形容詞対と変化しない形容詞対が存在している. 項目 a, b, c, e, i, j, k は条件によって評価値が比較的大きく変化しているのに対し, 項目 d, f, g, h はあまり変化していない. 前者は, 比較的表面形状や抵抗感, 力覚などに関連する形容詞対であり, 後者は, 温度感や湿度感に関連する形容詞対となっていることから, 提案手法が触力覚の提示に寄与している可能性が考えられる.

ここで特に変化の大きい項目 b, c, e, k に注目し, 評価値が 0.6 以上となったポインタの横幅と白のストライプの縦幅の組み合わせをプロットした散布図を図 5 に示す. x

軸, y 軸は, それぞれアイコンの横幅, 白ストライプの縦幅である. 図 5 から, 白のストライプ幅が狭い状態ではポインタの横幅が小さい場合に弾性力を感じる事が多く, ポインタの横幅を大きくしても弾性は知覚されていない. 一方で, 白のストライプ幅とポインタの横幅が大きくなるにしたがい, 凹凸感や引っかかりといった擬似触力覚の知覚に影響していることが考えられる. すなわち, ポインタの横幅と白ストライプの縦幅の変化に応じて擬似触力覚に大きく影響する形容詞対の項目が変化することを示唆している.

5. 実験 2 : 従来手法による Pseudo-Haptics 生成と評価

5.1 実験目的

実験 1 では SD 法により提案手法におけるパラメータの変化が触力覚に関する形容詞対の評価に影響を与えることが示唆されたが, 実際に Pseudo-Haptics が生じた際の知覚との関係は明らかでない. そこで実験 2 ではこの問題点を踏まえて, 提案手法と同じ評価項目で SD 法によって従来手法の評価を行い, 実験 1 と比較することで Pseudo-Haptics と同様の現象が生じているかを検討する. この実験では, 従来から提示されてきた Pseudo-Haptics 生起手法について取得できる擬似触力覚を意味微分法 (SD 法) で評価を行い, 各評価項目における被験者全員の評価値の分布と平均値の移り変わりから擬似触力覚の生起の変化について調査する. CD 比が 1 の場合, ポインタの動きと指の動きが同一速度になることから, この値を境界として各項目の

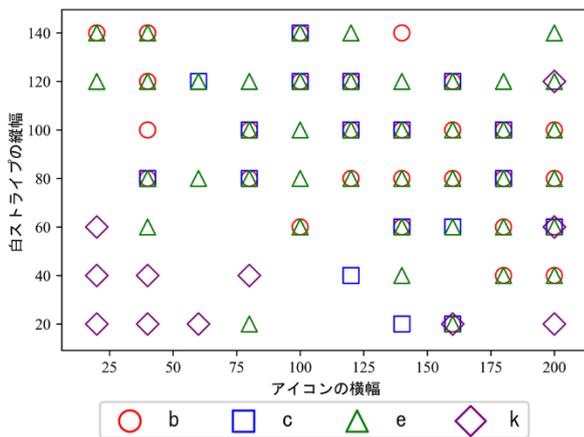


図 5. b, c, e, k における散布図

感覚の変化が観測できることが予測される. 従来の Pseudo-Haptics 生起手法では主に抵抗感について議論されてきたが, 抵抗感という表現は漠然としており, その他の感覚も生起されている可能性があると考えられる. また, CD 比を変更する領域の与え方の違いによる知覚についても検討する.

5.2 実験内容

図 6 に示すようなインタフェースを実験システムとして, 実験 1 と同様に iPhone11 (Apple Inc.) に実装した. 提案手法ではフットステップ錯視を引き起こすことを目的としてポインタの色を白に設定したが, 実験 2 のインタフェースではフットステップ錯視が起らないよう, ポインタの色を青に変更して実験を行う. フレームレートは 60fps である. 背景の領域に応じて CD 比の設定条件を以下の 2 パターンとした.

- (i) すべての白い領域で R_{CD} を変更
- (ii) 縞模様の境界線に沿った微小区間で R_{CD} を変更

実験参加者は実験 1 と同じく 20 代 5 名 (男性 3 名, 女性 2 名), 利き手は全員右手であった.

以下に実験のタスクを示す. 実験参加者はタブレット端末を机の上に置き, タッチパネル上に表示されたポインタを利き手で上下に 3 回連続してドラッグする. 式(1)より R_{CD} を 0 から 1.4 まで 0.2 間隔で変更し, 計 16 通り (CD 比 8 通り \times 提示方法 2 パターン) の条件で体験する. 各条件を体験した後, 実験 1 と同様に形容詞対 11 項目について評価させ, SD 法により評価した. なお, 条件の提示順序については, R_{CD} の 8 通りはランダムに提示し, 提示方法については (i) から (ii) の順で実施した. ドラッグ操作については, 実験開始前に操作の練習としてポインタを上下に 3 回ドラッグさせた. その際の R_{CD} は実験者がランダムに選定した.

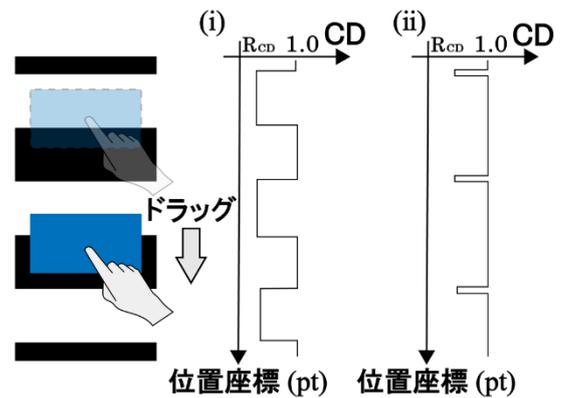


図 6. 実験 2 で用いた従来手法における Pseudo-haptics の生起

5.3 実験結果と考察

CD 比の設定条件 (i) (ii) のそれぞれについて, 評価項目ごとに算出した実験参加者全員の各 R_{CD} における評価値の平均値の推移を図 7 に示す. また, 各評価項目における評価値の分布と平均値の変化を示した結果を図 8, 9 に, 各実験における標準偏差を図 10 に示す. 図 7 から図 9 は縦軸が提示した R_{CD} , 横軸が SD 法による感覚の評価値を示し, 図 10 の横軸は標準偏差を示している.

図 7 から, 条件 (i) (ii) の双方において, R_{CD} の変化に応じて各評価項目も変化しており, 以前より主張されてきた CD 比による擬似触力覚の制御によって, 知覚も影響を受けることが確認できた. R_{CD} が 0.8 から 1.2 の時に注目すると, R_{CD} が 1.0 に近づくにつれて評価項目の形容詞対のどちらか片方に近づくように印象が推移することが確認できた. また, R_{CD} が 1.0 のときに評価値が正となる項目と負となる項目が条件 (i) と (ii) で一致し, R_{CD} が 1.0 から離れると感覚の評価値も逆側に変化する傾向が確認できた. R_{CD} が 1.0 のときは, 画面のどの部分でもドラッグ操作時の指の速度とポインタの速度が常に一致している. 一方, R_{CD} が 0.8 や 1.2 のときは, 操作する指よりもポインタが遅れて (もしくは速く) 進むため, 擬似触力覚提示の境界となっていると考えられる.

R_{CD} が 1.0 から 1.4 の場合に注目すると, 条件 (i), (ii) とともに 1.0 から 1.2 にかけては各評価項目の形容詞対の中央に近いような感覚 (評価値の絶対値が 1.0 以下) であったのに対し, 1.2 から 1.4 では条件 (i) では 7 項目, 条件 (ii) では 8 項目において, 再び谷(山)になるように評価値が変動している.

さらに, 図 8 から図 10 において, 各項目について各被験者が知覚した感覚に注目する. 図 10 では, 標準偏差のばらつきが大きかった. しかし, 個人差はあるものの平均値の推移の折れ線グラフと散布された点の推移を比較すると, 平均値の折れ線グラフとおおむね同一の変化をしているパターンが多く見られた. これは, 実験参加者が各評価項目

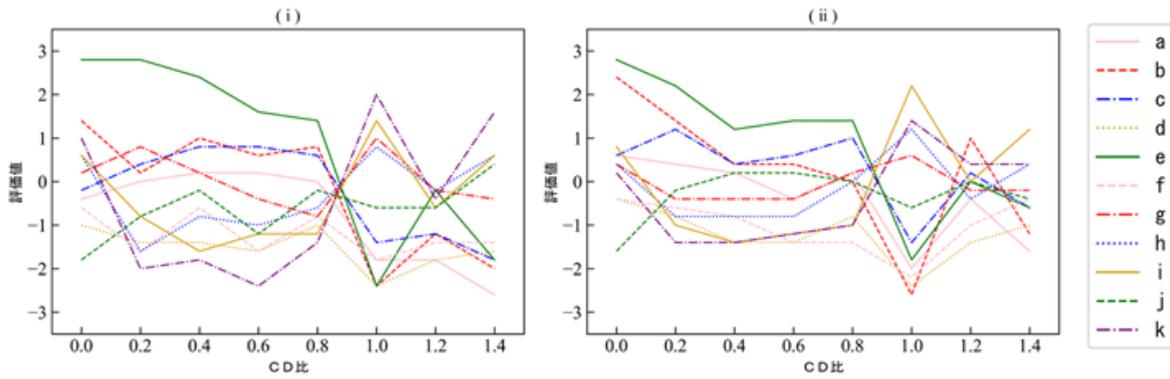


図7. 実験2(i),(ii)における評価項目ごとのCD比に対する

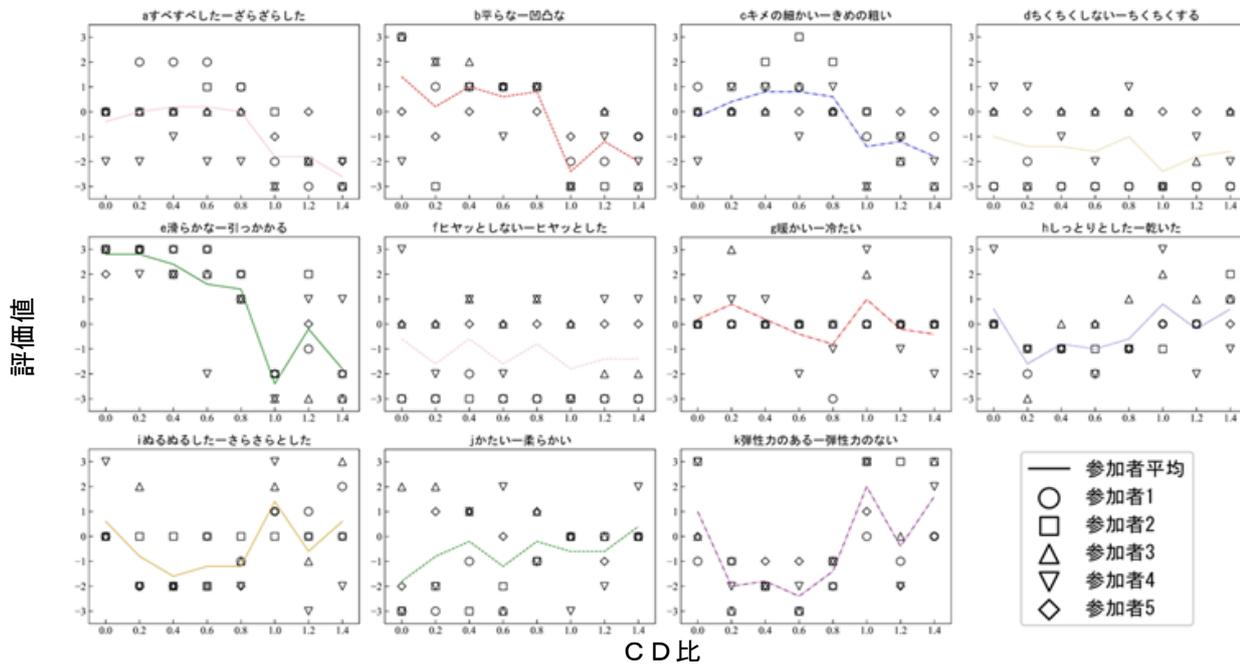


図8. (i)における評価項目ごとのCD比に対する実験参加者全員の評価値の推移と評価値の平均の推移平均値の推移

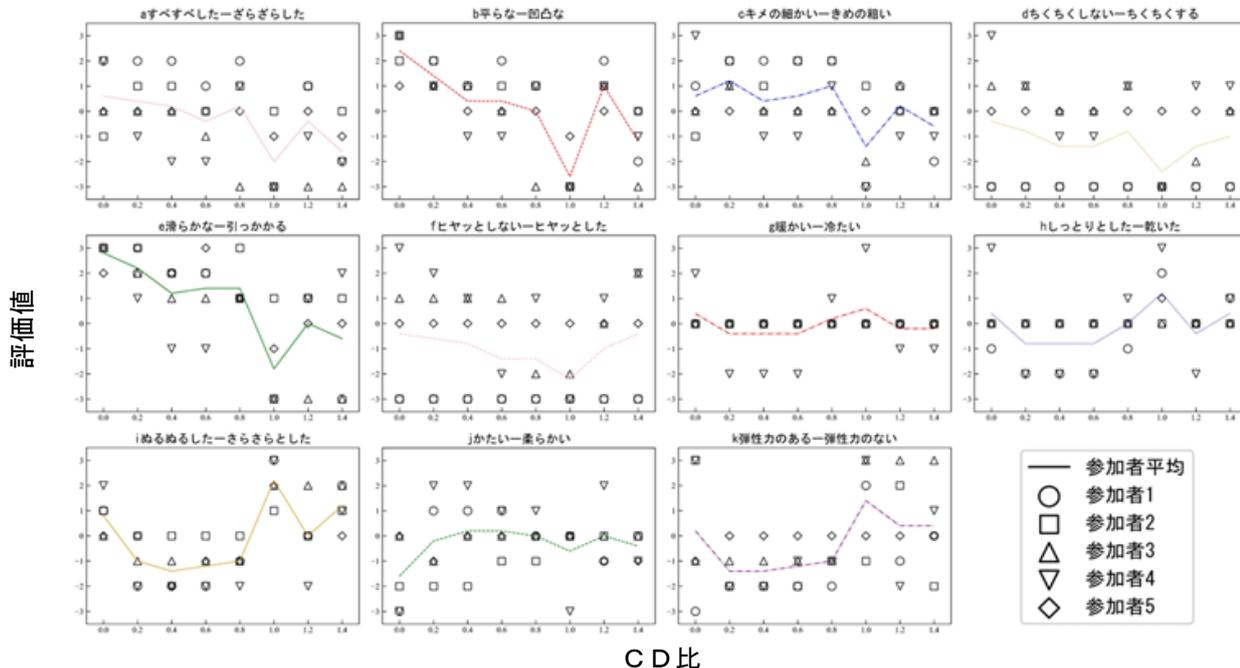


図9. (ii)における評価項目ごとのCD比に対する実験参加者全員の評価値の推移と評価値の平均の推移

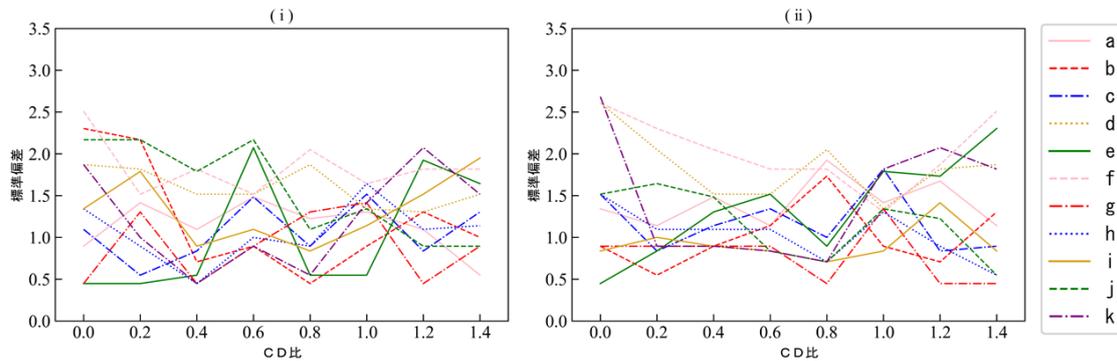


図 10. 実験 2 (i), (ii)における評価項目ごとの CD 比に対する平均値の推移

に対する解釈の差と触力覚に個人差が生じていることが示唆される。

実験 1 における図 5 より, b, c, e の項目において, 先行研究[14]を踏まえると実験 2 ではこれらの項目が大きく働いているときに抵抗感を知覚している状態であると考えられるが, 抵抗感が生じている状態はポインタの表示と指の移動速度に移動差が生じている状態である。すなわち, 実験 2 において評価項目 b, c, e が大きく働いているときというのは指の進行速度とポインタの進行速度に対してラグが生じているように認知しやすくなり, 擬似触力覚が生じている可能性があると考えられる。

以上により, 提案手法では, フットステップ錯視を応用することで擬似触力覚提示手法の 1 つである Pseudo-Haptics を生起できることが示唆された。ただし, フットステップ錯視現象と擬似触力覚の直接的な因果関係を明らかにするには, さらなる検討が必要である。

6. おわりに

Pseudo-Haptics を応用した従来研究では, 視覚刺激と触覚刺激に意図的に不整合を発生させて, 擬似的な触力覚を提示していたが, タッチパネルにおけるインタフェースでは, ポインタなどの操作対象を直接触れて操作するため, 操作をスワイプに限定するなどの対応が必要であった。そこで本稿では, 意図的な不整合は発生させずに Pseudo-Haptics を生起させるため, 既存の錯視現象の 1 つであるフットステップ錯視を応用したアプローチを提案した。

また, タッチパネル上での Pseudo-Haptics 生起に関して, 従来手法で得られる知覚を細分化して評価し, 2 つの実験結果から提案手法では, ポインタの横幅と白ストライプの縦幅を適切に設定することによって擬似触力覚を提示できること, さらに白と黒のストライプの幅の合計値が一定である条件のもとでは, ポインタの横幅と白ストライプの縦幅を狭くすることで, 擬似触力覚の生起を抑制できることが示唆された。

本稿では, 錯視現象を起こす条件を利用することで

Pseudo-Haptics を生起させることが確認できたが, この特定の錯視現象そのものと擬似触力覚の直接的な因果関係までは言及できていない。今後, 電子デバイス上の感覚提示のみならず, 紙などのアナログ媒体に対しての擬似触力覚提示の研究も期待されることから, 擬似触力覚の提示と錯視現象に関する直接的な因果関係について解明を目指す予定である。

参考文献

- [1] W. Buxton, R. Hill, & P. Rowley. "Issues and techniques in touch-sensitive tablet input." Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 215-224, 1985.
- [2] C. Moussette, J. B. Morrell, P. Kessler, & S. Weiss, "Magnetic actuators for haptic response." U.S. Patent No. 10,236,760. 19 .Mar. 2019.
- [3] A. Lécuyer, Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, pp. 39-53, 2009
- [4] B. Stephen, F. Chohan, & L. Brown. "Tactile feedback for mobile interactions." Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 159-162, 2007.
- [5] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Khedda, P. Richard, & P. Coiffet, "Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?." Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048). IEEE, pp. 83-90, 2000.
- [6] 小野隼, 友枝明保, 杉原厚吉. "フットステップ錯視アートの設計法 (応用)." 日本応用数学会論文誌 23.4, pp. 585-600, 2013.
- [7] K. Watanabe, & M. Yasumura. "FlexibleBrush: A realistic brush stroke experience with a virtual nib." UIST. Vol. 7. pp. 47-48, 2007.
- [8] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, & M. Hirose, Modifying an Identified Size of Objects Handled with Two Fingers Using Pseudo-Haptic Effects. In ICAT/EGVE/EuroVR, pp. 1-8. 2012.
- [9] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, & M. Hirose "Modifying perceived size of a handled object through hand image deformation." Presence: Teleoperators and Virtual Environments 22.3, pp. 255-270, 2013.
- [10] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, & M. Hirose, "Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space." 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS). IEEE, pp. 175-180, 2014.
- [11] A. Lécuyer, J. M. Burkhardt, S. Coquillart, & P. Coiffet, "Boundary of illusion": an experiment of sensory integration with a

- pseudo-haptic system." Proceedings IEEE Virtual Reality 2001. IEEE, pp. 115-122, 2001.
- [12] 宇治土公雄介, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 広田光一, & 廣瀬通孝. "背景移動量操作を利用した視触覚間相互作用生起によるタッチパネルでの擬似触力覚提示." 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 22.3. pp. 305-313, 2017.
- [13] A. Costes, F. Argelaguet, F. Danieau, P. Guillotel, & A. Lécuyer, "Touchy: A visual approach for simulating haptic effects on touchscreens." *Frontiers in ICT* 6 .2019. 1.
- [14] 伴祐樹, 宇治土公雄介. "バーチャル紐を用いることによるタッチスクリーンでの Pseudo-haptics 効果の向上." 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 24.4, pp. 389-399, 2019.
- [15] 小島諒介, 渡邊恵太, 稲見昌彦, & 五十嵐健夫. "VisualHaptics 2.0: 感触の解像度向上とタッチパネルへの応用." *Interaction (1EXB-32)*. 2013.
- [16] S. Anstis, "Footsteps and inchworms: Illusions show that contrast affects apparent speed." *Perception* 30.7, pp. 785-794, 2001.
- [17] S. Anstis, "Moving Objects Appear to Slow down at Low Contrasts." *International Joint Conference on Neural Network*, vol. 16, no. 5, pp. 933-938, 2003,
- [18] S. Anstis, "Factors affecting footsteps: Contrast can change the apparent speed, amplitude and direction of motion." *Vision Research* 44.18. pp. 2171-2178, 2004.
- [19] P. D. Howe, P. G. Thompson, S. M. Anstis, H. Sagreiya, & M. S. Livingstone, "Explaining the footsteps, belly dancer, Wenceslas, and kickback illusions." *Journal of vision* 6.12, pp. 5-5, 2006.
- [20] 鷲野希望, 石原彰人. "G-001 網膜外網状層の生理工学的モデルによる Footstep 錯視の解析 (G 分野: 生体情報科学, 一般論文)." 情報科学技術フォーラム講演論文集 9.2, pp. 531-532, 2010.
- [21] 小野隼, 友枝明保, 杉原厚吉. "フットステップ錯視アートの設計法 (応用)." 日本応用数学会論文誌 23.4, pp.585-600, 2013.
- [22] 井上正明, 小林利宣. "日本における SD 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観." 教育心理学研究 33.3, pp. 253-260, 1985.
- [23] 白土寛和, 前野隆司. "触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化 (< 特集> 五感情報インタフェース)." 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 9.3, pp. 235-240, 2004.