

フットステップ錯視を用いた触力覚提示手法における強度制御に関する検討

菫澤雄太¹ 小川剛史²

概要: 筆者らの研究グループでは、錯視現象の1つであるフットステップ錯視を用いたタッチパネル上での擬似触覚提示方式を提案している。人差し指でのスワイプ操作のように人差し指で一方向に直線移動させる操作に対して提案方式によって、操作中における触力覚の印象が変化することを明らかにしてきた。本稿では、タッチパネル上での自由な移動操作へ擬似触力覚を提示するため、回転移動操作を制御することを目的として、操作方法やパラメータによる知覚強度の違いを検証した。直線移動操作および回転移動操作の際に知覚する擬似触力覚の強度検証実験の結果、操作方法によらず、生じられる擬似触覚の大きさはポインタの面積と背景のストライプの縦幅によることが示唆された。

キーワード: Pseudo-Haptics, 錯視, タッチパネル

Intensity Control of Pseudo-Haptics Feedback Using the Footstep Illusion

YUTA NIRASAWA^{†1} TAKEFUMI OGAWA^{†2}

Abstract: We have proposed a pseudo-tactile presentation method on a touch panel using the footstep illusion, which is one of the visual illusions. We have shown that the proposed method can change the tactile impression during operations such as swiping with the index finger in a straight line in one direction. In this paper, we examine the difference in the perceived tactile intensity depending on the operation method and parameters, with the goal of controlling rotational movement operations to present a pseudo-haptics sensation for free movement operations on a touch panel. The results of experiments verifying the intensity of pseudo-tactile perception during linear and rotational movement operations suggested that the size of the pseudo-haptics feedback depends on the area of the pointer and the vertical width of the background stripe, regardless of the operation method.

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でき、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]。アクチュエータを用いた触力覚フィードバックの提示によって、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[2]や静電気吸着[3]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[4]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

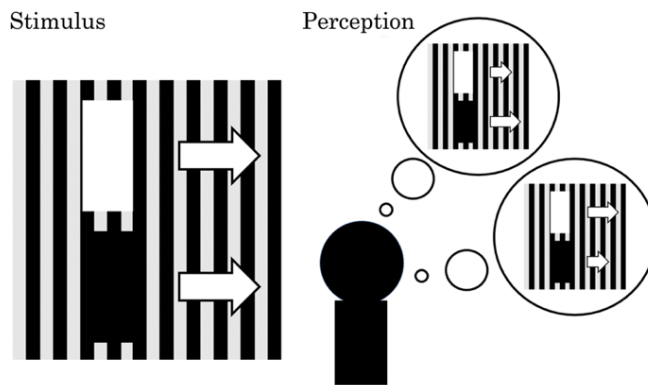


図1 フットステップ錯視によるポインタの動き

現象である。Pseudo-Hapticsの生起や強度の制御には、ユーザの入力操作 (Control) とその出力であるポインタ動作 (Display) の速度から算出した CD(Control/Display)比が用いられる。CD比を適切に制御するソフトウェアを組み込むことで視覚フィードバックのみを変更して触力覚を制御

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

でき、専用のデバイスを必要としない。

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、重さや弾力性といった触力覚の生起が確認されてきた[5-7]。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。伴ら[8]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。Costes ら[9]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。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。

著者らの研究グループでは、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 を生起させるために、フットステップ錯視[10]を用いた触覚提示手法について検討してきた[11-13]。フットステップ錯視とは、図 1 に示すように縞模様の背景上を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現象である。これまで、タッチパネル上での操作として、スワイプ操作のような一方向へ直線移動させる操作や、なめらかな曲線を描いたり、写真を回転させたりといった直線的な動きではない操作を想定し、1 本指および 2 本指による直線移動操作と 1 本指による回転移動操作についてフットステップ錯視を用いた提案方式を適用したところ、操作時に知覚する触力覚の印象が変化することを明らかにした。

本稿では、フットステップ錯視を用いた触力覚提示手法において、知覚する触力覚の強度を制御することを目的として、提示条件による知覚強度の違いを検証する。

2. 関連研究

タッチパネルにおける触力覚提示に関する研究は以前より行われており、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[2,3]。2 つ目はペンなどの機械的な操作機器を用いて画面に inputs 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[14]。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げられる。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[4]。ユーザの入力操作量に対するポインタの移動量の割合を変更することで、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)式でその関係を表す [9]。

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

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[5-7]。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[15]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[9]は機械的な機構を含まないタッチパネルを用いて、表現したい触覚に応じて、ポインタ表示パターンを組み合わせることで、多様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[8]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[16]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. フットステップ錯視を用いた擬似触覚提示

従来の Pseudo-Haptics 研究では、生起の原理から、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。そこで提案手法では、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[10]を用いる。

3.1 直線移動操作における擬似触覚提示方式

フットステップ錯視は、背景の縞模様幅を ω 、ポインタの幅を 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 周期として、両端が白いストライプにある時間と 1 周期の比を T と置いた場合、 $\omega = \omega_1 = \omega_2$ かつ $\omega \leq x \leq 2\omega$ の場合はフットステップ錯視に

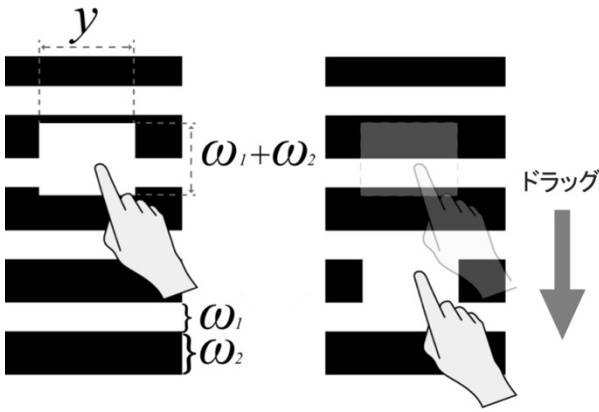


図2 直線移動操作におけるフットステップ錯視を用いた擬似触力覚提示

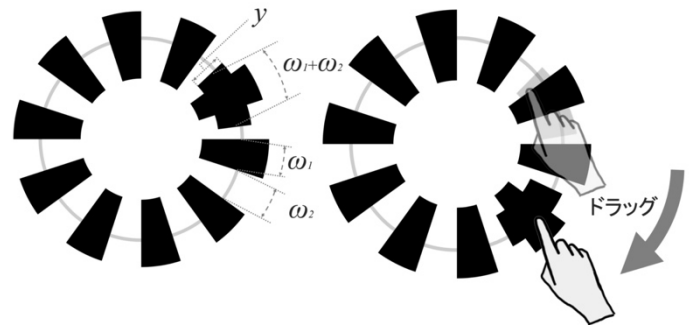


図3 回転移動操作におけるフットステップ錯視を用いた擬似触力覚提示

における錯視の強さは以下のように数値化されている[10].

$$T = \frac{x-\omega}{2\omega} \quad (2)$$

T は $x = 2\omega$ で最大値 $1/2$ となり, $x = \omega$ で最小値 0 となる.

これらを応用して, フットステップ錯視を応用した Pseudo-Haptics 生起を行う[11]. フットステップ錯視を用いて擬似触覚を提示するために, 図2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, フットステップ錯視効果が強くなるよう, 式(2)の T が最大となる条件に合わせるために, ポインタの縦幅を背景ストライプの幅の合計値となる $\omega_1 + \omega_2$ として設定する.

3.2 回転移動操作における擬似触覚提示方式

フットステップ錯視を用いて回転移動操作における擬似触覚を提示するインタフェースを図3に示す. 黒色のポインタをグレーの円周上に沿って回転移動させる際, 背景が黒と白のストライプとなるよう, 黒い扇面型領域を円周上に並べている. 円周上を基準として, 進捗方向に対して扇面型領域の縦幅を ω_1 , 扇面型領域間の長さを ω_2 , 扇面型領域との接触するポインタの幅を y とする. また, ポインタはグレーの円周上のみを動くように制約を設ける. 実装では, 各ポインタが遅延なく指の移動に追従するよう $R_{CD} = 1$ に設定する.

4. 実験

4.1 実験目的

フットステップ錯視を用いた直線移動操作と, 提案手法である自由移動を想定した回転移動操作において, フットステップ錯視が Pseudo-Haptic の生起に及ぼす効果を評価

することを目的とする. 具体的な検証項目は下記の2点である.

- パラメータが擬似触覚の知覚強度に与える影響
- 移動方法の違い(直線移動操作・回転移動操作)が擬似触覚の知覚強度に与える影響

4.2 実験内容

図2及び図3に示したインタフェースを実験システムとして iPad(Apple 社)に実装した. ポインタの移動速度に意図的な遅延は設定しない. 実験システムのフレームレートは 60 fps である.

実験では, 直線移動操作, 回転移動操作ともに背景のストライプの幅とポインタの大きさを各2条件ずつ, 計4条件を用いる(表1). 実験設計及び解析にはシェッフェの対比較法(浦の変法)を用いる[17]. 本手法は, 順位と差の程度を算出することが可能な対比較法のうち, 1人の実験参加者が施行の全ての組合せに対して評価を行う方法である. 実験参加者は, 直線移動操作と回転移動操作のそれぞれに対して, 2条件でドラッグ操作を行い, 知覚した抵抗感や摩擦感, 衝突感といった擬似触覚の強度を比較し7段階(-3: 前者の方が非常に強い ~ 3: 後者の方が非常に強い)で回答する. 試行回数は4条件の提示順序を考慮した全組合せ(12通り)となる.

実験参加者には, 実験開始前に操作に慣れるための練習をさせる. 実験では各比較条件をランダムに提示して強度

表1 ポインタの幅と黒ストライプの縦幅における条件設定

		黒ストライプの縦幅	
		45pt	90pt
ポインタの横幅	100pt	A	B
	200pt	C	D

を回答させ、実験終了後に、実験に関する感想や所感などアンケートに答えさせる。実験解析は、シェッフェの対比較法(浦の変法)を用いて算出し、値が正方向に大きい場合は、生じられた擬似触覚の効果が大きく感じたことを示す。また、主効果が確認された場合、式(3)の尺度 Y (yardstick)を使用し、各条件間における信頼区間(CI)を算出する。平均評価値間が式(3)よりも大きい評価対象を算出する。 φ は検定における有意水準(0.05 または 0.01), t は評価対象数(4), n は評価者数(10), f_e は誤差の自由度, V_e は誤差の分散を表す。 q はスチューデント化された範囲の分散から算出される[17].

$$Y_\varphi = q_\varphi(t, f_e) \frac{\sqrt{V_e}}{2tn} \quad (3)$$

5. 実験結果と考察

本実験の各評価項目における全実験参加者から算出されたシェッフェの対比較法(浦の変法)の結果を、図 4 に示す

直線移動操作における擬似触力覚提示方式の主効果は、 $F = 27.9$, $p < 0.01$ で有意であった。 Y の算出結果から、99%CIではA(-0.7)とB(-0.2), BとC(0.125)の組み合わせを除く全ての条件間に有意差が確認された。また、95%CIではBとCの組み合わせを除く全ての条件間において有意差が確認された。

回転移動操作における擬似触力覚提示方式の主効果は、 $F = 60.4$, $p < 0.001$ で有意であった。 Y の算出結果から、99%CIではA(-0.9)とB(-0.45), C(0.525)とD(0.825)の組み合わせを除く、全ての条件間に有意差が確認された、また、95%CIではCとDの組み合わせを除く全ての条件間において有意差が確認された。

これらの結果から、直線移動操作、回転移動操作の双方で、提示条件に対して知覚する擬似触覚の強度が同じ順序に並んだ。そのため、AからDにかけてポイントの面積が大きくなっていることに加えて、ストライプに接するポイントの幅が長くなっていることから、フットステップ錯視を用いた擬似触覚の生起には、ポイントの大きさストライプの幅が起因していることが考えられる。

表 2 に実験参加者から得た自由記述によるアンケート結果のうち、代表的なものを示す。「ポイントのサイズが大きい方が感じやすかった」といった意見が 10 人中 8 人集まっていたことから、実験参加者への擬似触覚の提示にポイントのサイズによる影響があったことがうかがえた。ただし、回転移動操作では衝突感や抵抗感ではなく「吸い込まれるような感覚だった」という意見もあった。これは、衝突感を与えるフットステップ錯視に対して、吸い込まれるような錯視現象をひき起こすインチワーム錯視[10]として知覚できてしまっていた可能性がある。実験で用いた提

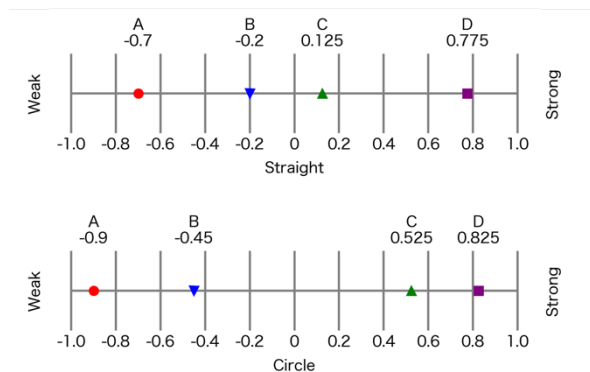


図 4 直線移動操作と回転移動操作における実験参加者が知覚した擬似触覚の強さ

示条件は、インチワーム錯視を引き起こす条件とはなっていないもの、錯視は見る人によってその生起に差があることや、回転移動操作では条件 C と D のポイントの横幅が背景のストライプと同じ幅であったため、実験参加者がポイントの操作時にインチワーム錯視に近い条件が一部揃ってしまっていた可能性がある。

6. おわりに

タッチパネル上での操作に対する触力覚フィードバック提示のために、Pseudo-Haptics を用いた研究が進められてきたが、タッチパネル上のオブジェクトを移動させる際に指の移動距離とオブジェクトの移動距離に意図的なズレを生じさせる必要があり、直接オブジェクトに触れて操作できるタッチパネルの利点が活かさない状況にあった。そこで筆者らはフットステップ錯視を用いることで、意図的な

表 2 直線移動操作と回転移動操作における触力覚提示の比較における自由記述

自由記述
当たる面が広い方が抵抗感を感じやすかった。また、回転の方が抵抗感を感じにくかった。
幅が揃っている場合と揃っていない場合では、感覚の大きさが結構離れているように感じた。特に円の方が生起される感覚の差が激しかった。
直線移動はポイントの大きさが小さい方が進みやすい感じがした。 円は、ポイントの大きさが大きいほど進みづらい感じがした。
サイズの差が大きいものは触覚の差を大きく感じやすく驚いた。
円の方は、幅が一緒の方が抵抗を大きく感じたが、粘着質のよう吸い込まれていくような感じがした。

ズレを生じさせずに Pseudo-Haptics を生起させ、触力覚を提示する手法を提案しており、本稿では、タッチパネル上での直線移動操作と回転移動操作に関して、フットステップ錯視を適用する際のパラメータが触力覚の知覚強度に与える影響について検証した。被験者実験により、移動方式によらず、生起される擬似触覚の大きさの条件の順序が同じとなった。ポインタの大きさやストライプに接するポインタの幅が長さから、フットステップ錯視を用いた擬似触覚の生起には、ポインタの面積とストライプの幅が起因していることが考えられる。また、自由記述によるアンケートの結果からも、10人中8人から「ポインタのサイズが大きい方が感じやすかった」といった意見が得られたことから、ポインタの面積の大きさが実験参加者の体験に影響を与えていることが確認できた。

今後は、タッチパネル上を自由移動操作可能な背景ストライプを設置することで、タッチパネルにおける擬似触覚提示の体験を向上させることを目的とする。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 19H04150 の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

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] 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
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 蕨澤雄太, 星野聖, 小川剛史. "タッチパネルにおける錯視現象を利用した Pseudo-Haptics の生起." 情報処理学会研究報告, Vol.2021-HCI-194, No.21, pp.1-8, 2021
- [12] 蕨澤雄太, 小川剛史. "二点マルチタッチにおけるフットステップ錯視を用いた擬似触力覚生起に関する一検討." 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.27, No. CS-3, CSVC2022-19, pp. 126-131, 2022.
- [13] 蕨澤雄太, 小川剛史. "回転移動操作に対するフットステップ錯視を用いた擬似触力覚提示." 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.27, No. CS-4, 2022 (発表予定).
- [14] K. Watanabe, & M. Yasumura. "FlexibleBrush: A realistic brush stroke experience with a virtual nib." UIST. Vol. 7. pp. 47-48, 2007.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] S.Ura. "An analysis of experiments of paired comparisons", Quality Control – Journal of JUSE, vol. 16, pp. 78–80, 1959.