



平面ディスプレイの移動による 擬似力覚の生成に関する研究

A Study for Creation of Pseudo-force Feedback using Dynamic Flat Screen

大西悠貴, 高嶋和毅, 藤田和之, 北村喜文

Yuki ONISHI, Kazuki TAKASHIMA, Kazuyuki FUJITA, and Yoshifumi KITAMURA

東北大学 電気通信研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1-1, yuki87@riec.tohoku.ac.jp)

概要 : 本研究では, スクリーンに物理的な移動機構を付加しコンテンツの空間性の表現を拡張した先行研究 Living Wall Display を踏まえ, スクリーンの物理的な移動量の変化による擬似力覚生成の可能性の検討を行う. 今回はクロスモーダルな擬似力覚提示手法である Pseudo Haptics のアプローチを取り入れ, スクリーン内の映像やスクリーンの移動量を操作した場合の知覚する力覚の有無や程度を心理物理実験により調査する.

キーワード : Pseudo-Haptics, クロスモーダル, ロボティックディスプレイ, 拡張現実

1. 研究背景

近年は高画質・高性能のスクリーンが豊富に展開され, 用途や利用人数に応じた様々な選択肢があることで利用上の利点も多い. 一方で表示コンテンツとのインタラクションの面では, 2次元平面上の表現であるため, 絵画的な工夫がなされたとしてもコンテンツの奥行等の空間性の表現は難しい. また, フィードバックが視聴覚情報のみに限られることが多いために高い臨場感を生み出すことも難しい.

これに対する解決策として, 我々はこれまで自走式ディスプレイ Living Wall Display (LWD) [14]を検討してきた. これは, スクリーン上の視覚コンテンツに同期して壁面型スクリーン自体を物理的に並進や回転させることにより, インタラクション時に生じる衝撃や重さなどの力の成分を擬似的に表現し, コンテンツの臨場感の向上を狙った手法である. これまでの研究の結果, アニメーションに同期したスクリーンの動きが, コンテンツの奥行き感などの空間性, リアリティ, 楽しさを向上し, インタラクションを強化することが確認された [6][14][15]. しかし, これまでの実験や展示の経験から Living Wall Display によって擬似的に力を表現できる可能性が示唆されていたものの, それを実験的に明らかにしていなかった. なお, スクリーンを物理的に動かして映像内の動きを強調する方法は, エンターテインメントを中心に検討されているが (例えば[4, 13]), 非接触インタラクション (間接指示) において力覚が生成できるかは未だ検討されていない.

そこで本研究では, Living Wall Display における擬似力覚生成の可能性およびその程度を実験的に明らかにすることを目的とする. そのために, カーソル等の間接指示環境において疑似的な力触覚の生成が確認されている Pseudo Haptics [5]の考え方と実験方法を取り入れる. 具体的には, ユーザの入力量 (Control) に対するスクリーンそのものまたはスクリーン内のコンテンツの移動量 (Display) の比 (C/D 比) を様々に操作し, それらによってどのようにユーザの知覚する擬似力覚が変化するかを心理物理学実験により調査する. 本稿ではその予備実験の結果を報告し, Living Wall Display の機構による擬似力覚生成の可能性を議論する.

2. 関連研究

2.1 Pseudo Haptics に基づく擬似力触覚提示

Pseudo Haptics は, 入力と出力の関係の操作のみで, 複雑な機構なしに様々な密度の擬似力触覚が提示できることが示されている [5]. 例えば, 間接指示環境において, カーソル操作により対象オブジェクトの硬さや質量, さらにテクスチャを知覚できることが知られている [2]. また, 視触覚の刺激を適宜操作することで, 実際に触れているものとは異なる形状やサイズ[3]を知覚させたり, 手で触れているものと異なる柔らかさを知覚させようとする研究例もある [7]. 近年は VR や MR 環境への応用が注目され, 仮想物体の質量変化について検討した研究もある [8][9][10].

これまでの Pseudo Haptics 研究は概ね、視触覚のクロスモーダル刺激による力触覚提示を試みたものであるが、Living Wall Display のようなプラットフォームで、ディスプレイの物理的な動きをフィードバックとして扱い、疑似力覚が生成可能かどうかは未だ検討されていない。本研究は、Pseudo Haptics のシンプルな考えが Living Wall Display 等、ロボット型ディスプレイに適用可能かを検証することを主な目的としており、新たなアプローチと言える。

2.2 ロボットディスプレイ

コンテンツの空間性を拡張したり、柔軟な作業空間を提供したりするためにディスプレイを物理的に移動変形させるロボットディスプレイの研究は近年盛んになされている。TiltDisplay は複数の小さな画面から成るロボットディスプレイで、個々の画面が上下昇降およびチルト（傾く）することができる。これらを表示コンテンツに合わせて動的に稼働させるとコンテンツの立体感が増すことが示されている [1]。MovemenTable では、ディスプレイが物理的に移動する過程に関連したアニメーションをスクリーン上に提示することで、ディスプレイの移動をより知覚しやすいものとしている [11]。Shape-Shifting Wall Display は3枚の壁面ディスプレイで構成される変形可能なディスプレイであり、コンテンツに応じた配置の変更で没入感の高い体験を提供している [12]。また、これら以外にもロボットディスプレイはエンターテインメントやアート向けの映像機材として利用されており、映像と同期したディスプレイの動きによりコンテンツの臨場感を向上させている [4]。

以上のように、物理的に移動・変形する機構を持つディスプレイは増えているが、コンテンツとディスプレイの動きの連携が臨場感やインタラクションの質の向上にどのように寄与するのかは明確になっていない。本研究では、ロボットディスプレイとのインタラクション（例：オブジェクト操作）におけるリアリティや臨場感の向上にむけて、Living Wall Display [14]のシンプルなスクリーンの動きを用いた疑似的力覚提示の可能性を調査する。

3. ユーザスタディ

3.1 実験概要

本実験では、Living Wall Display をデスクトップ環境に合わせて小型化したデバイス（Living Wall Display Junior）を使用し、スクリーンの物理的な動きによって発生する疑似力覚の有無およびその強さを調査する。Pseudo-Haptics の原理に基づくと、ユーザの入力量に対して、スクリーンの物理的な動き又は映像による出力量が完全に一致する場合には、相対的に発生する力覚は小さくなると予想できる。一方、入力量に対して鈍い（例：遅い、長い）出力をした場合や、誇張した（例：速い、短い）出力をした場合には、それぞれ、重さや軽さを感じる可能性がある。そのために、本研究では、C/D 比(Control-Display ratio)と呼ばれる入出力の関係性を主な変数として取り扱う。実験では、

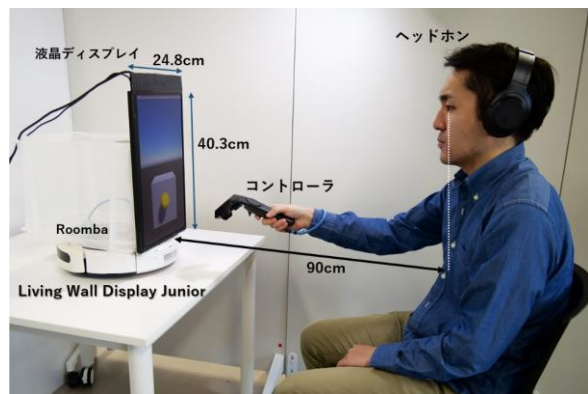


図 1. 実験環境

インタラクションとしてバーチャルなオブジェクトをバーチャルなカーソルで押しこむ操作に着目し、異なる C/D 比が設定されたときに、人は異なる力や重さを感じるかどうかを心理物理実験により調査する。

3.2 実験環境

Living Wall Display Junior は、17.3 インチの LCD ディスプレイ（cocopar 社、980 g、1980 x 1080px）を家庭用ロボット Roomba（iRobot 社 500i シリーズ）上に搭載したものである。これは先行研究の Living Wall Display の小型版ととらえることができ、各種センサを後付けすれば高精度な制御も可能である。参加者は、スクリーンの正面から 90 cm 離れた位置に座り、コントローラ（HTC VIVE）を用いて操作する。Roomba は、PC と Bluetooth を通じてシリアル通信で接続され、カーソルとターゲットオブジェクトが接触しているかつ、カーソルによってターゲットが押されている時に、ターゲットの移動量に対応する形で移動する。実験中は Roomba の機械音が判断の手がかりとなる可能性を考慮し、参加者はノイズキャンセリングヘッドホン（SONY、MDR-100ABN）を装着した。コントローラ、Roomba の制御を含めた全体のコンテンツは Unity3D（2018.4.0 f1）を用いて作成している。

3.3 実験刺激

実験用の刺激として、シンプルなオブジェクトを押すシーンを作成した。シーン内には、白い立方体のターゲットオブジェクトとユーザが把持するコントローラの動きに追従する黄色い三次元カーソルの 2 つが表示されている（図 2）。ユーザはシーン内でカーソルを用いてターゲッ

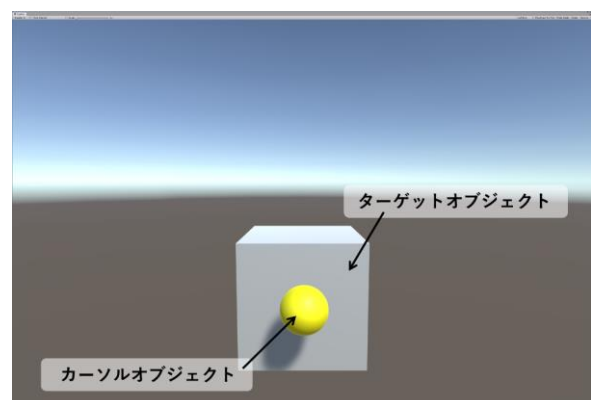


図 2. 視覚刺激

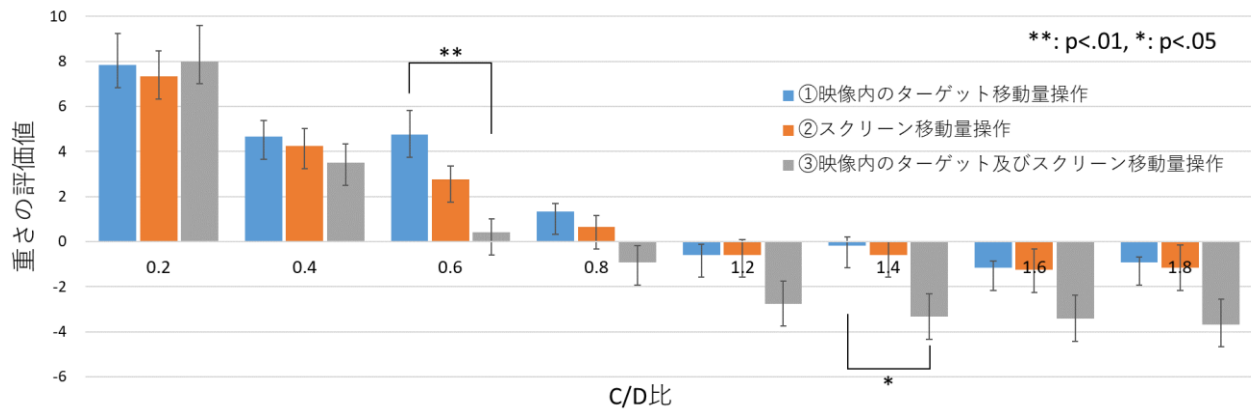


図3. Display 条件, C/D 比における知覚した重さの評価値

トに触れたり、それを押したりすることができ、その際に後述の Display 条件によって、映像内のターゲット、スクリーンそのもの、またはその両方が反応する。

実験では、カーソルがターゲットを押している間の映像内のターゲット、および、スクリーンの物理的な移動量を低減または増大させ、力覚の錯覚を誘発可能か検討する。動作量の低減・増大率については、コントローラの移動速度 (mm/s) に C/D 比をかけたものをシーン内のカーソルの移動速度及びスクリーンの移動速度として反映する。

3.4 実験条件

C/D 比を適用する対象として、映像内のターゲットアニメーション (Baseline) とスクリーンの物理的な動き (本実験の主題) の 2 つを考える。そのため、本実験では、C/D 比を 1 として映像内のターゲットの移動が入力に完全に一致する (ディスプレイは静止状態) ものを標準条件とし、C/D 比の操作対象の異なる 3 つの Display 条件を設定した。Display 条件:

- ① 映像内のターゲット移動量を操作 (スクリーンは固定で、従来の Pseudo Haptics)
- ② スクリーンの移動量を操作 (視覚情報は固定)
- ③ 映像内のターゲットとスクリーン移動量を共に操作

3.5 実験手順

参加者は実験の概要について説明を受けた後、練習を経て本試行に進み、実験の最後にインタビュー調査を行った。各試行において、参加者はスクリーン内に映った立方体のオブジェクトを、同じくスクリーン内のカーソルを用いて奥行き方向に 1 度押し込む操作を行う。この時、複雑な挙動を避けるために、1 度の操作に限ると明確に教示した。参加者は、この押し込む操作中に知覚するターゲットオブジェクトの重さを確かめる。

評価手法にマグニチュード推定法を採用し、基準刺激でオブジェクトを押し込んだ際、手に知覚した重さを 10 として、評価刺激で感じた感覚的な重さを相対値で回答させた。基準となる刺激を提示して参加者にオブジェクトを押し込む操作をしてもらった後、評価刺激を 3 つの実験条件の中からランダムに選んで提示した。参加者は再度オブジェクトを押し込む操作を行い、基準に対して知覚した重さを回答する。なお、評価する重さの対象はコントローラを

操作する手に感じた量を評価するよう教示した。また、重さの相対値に加えて、評価刺激の本物らしさの感覚値を 1 から 7 までの 7 段階 (7 が最も本物らしく感じた) で回答させた。これは、現実世界でオブジェクトを押す場面と比較した時の本物らしさを回答するように説明した。標準刺激と評価刺激の提示、重さと本物らしさの回答を 1 セットとして、一つの C/D 比条件の中で上記の 3 つの実験条件を各 2 回ずつ繰り返した計 6 試行を 1 タームとした。8 種類の CD 比 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8) に関して同様の手順を行い、結果として一人当たり実験全体で 3 (実験条件) \times 2 (繰り返し) \times 8 (C/D 比) = 48 試行となった。C/D 比の提示順は参加者間でカウンターバランスを取り、同一 C/D 比内の実験条件の提示順はランダム化した。実験参加者は 6 名 (全て男性、平均年齢 22.8 歳) であり、1 名あたりの実験時間は全体で 45 分程度だった。

3.6 結果

3 つの Display 条件に関して 8 種類の C/D 比を用いて得られた重さの評価値の平均を図 3 に示す。48 試行で用いた標準条件は全て同一であり、図 3 では標準条件での重さを基準 (0) とし、標準条件より重く知覚された場合は正、軽くと知覚された場合は負値をとる。重さの評価値に対して二元配置分散分析を実行した結果、C/D 比 ($F_{(7,264)} = 49.1$, $p < .001$) と Display 条件 ($F_{(2,264)} = 14.5$, $p < .001$) に主効果が見られた。交互作用は有意ではなかった ($F_{(14,264)} = 0.7694$, $p = .7020$)。Display 条件に主効果が見られたため Bonferroni 法による多重比較を行なったところ、C/D 比=0.6 及び 1.4 の場合において、Display 条件①と③の間に有意差が見られたが (図 3 中ブリッジで示す)、その他の同一 C/D 比内条件間には有意差は見られなかった。図 3 とこれらの統計解析の結果を踏まえ、特に C/D 比が小さい、重さを表現する条件 (C/D 比 < 0.8) においては、スクリーンの物理的移動量の操作によって、映像内のターゲット移動量を操作する従来の Pseudo Haptics と同程度の力覚が知覚されたことが分かる。また、C/D 比が大きくなるにつれ Display 条件③の絶対値が他 2 つの条件の値と比較して明確に大きくなっており、軽さが効果的に表現されていることが分かる。各 Display 条件における C/D 比の値に関して Bonferroni 法を用いた多重比較を行なったところ、Display 条件②に

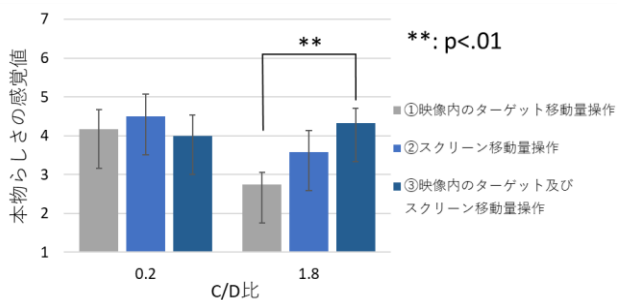


図4. 本物らしさの主観評価

において C/D 比 = 0.2, 0.4, 0.6 と 0.8 以上の C/D 比との間に有意差が見られており、スクリーンの物理的な動作を付加した表現方法は、標準条件より重たい表現においてより効果を持つことが明らかになった。

本物らしさの主観評価の結果について、二元配置分散分析を実行した結果、Display 条件にのみ主効果が見られた ($F(2, 264) = 7.84, p < .001$)。各 C/D 比における Display 条件に対して Bonferroni 法の多重比較を行ったところ、有意差は多く見られなかったが、 C/D 比=1 の前後で大きく傾向が分かっていたため一部を抜粋し図 4 に示す。 C/D 比が 1 未満においては 3 条件間で本物らしさに有意な差は見られない一方で、 C/D 比が 1 より大きくなると映像を操作した条件①のみにおいて本物らしさが有意に減少する傾向が見られ、これは C/D 比が異なる場合も共通していた。

4. 議論

スクリーンの物理的な動きが擬似的な重さの生成にどの程度寄与するか調査した結果、図 3 に示すように、概ねどの C/D 比条件においても、映像のみを操作した条件とスクリーン移動量のみ操作した条件は、同程度の重さを生成することができていた。この点、Pseudo Haptics の考えがロボットディスプレイに応用できることを示した重要な観察データと言える。さらに、図 3 を見ると C/D 比が大きくなり、軽さを表現する場面 (C/D 比 > 1) においては、Display 条件③では軽さの評価値が条件①や②の倍以上に知覚されていることが分かる。映像情報とスクリーンの動き両方に効果かけたことで誇張表現を期待したが、それは、軽さの表現において顕著に表れたことは興味深い。しかしながら、実験後のインタビューにおいて“ C/D 比が極端に大きい場合は軽さを感じた一方で、表現としては違和感を覚える。”と答えた参加者が複数いた。そのため、表現の質と軽さの誇張はトレードオフであり、細かなパラメータ検討は今後必要であるが、これまでの Living Wall Display のような厳密な表現の正確さを求めないエンタメ応用には向いていると考えられる。一方で、 C/D 比が小さく、重さを表現する場面においては Display 条件の違いによる重さの知覚量に大きな差は見られなかった。この理由を現時点で明快に説明することはできないため、詳細な検証が望まれる。

次に、重さを表現する際に有効な C/D 比の範囲に関して検討する。 C/D 比が 0.8 から 1.4 にかけては重さの評価値

は標準条件とほぼ差が見られず、 C/D 比 = 1 付近は重さの提示としては効果が微弱であった。一方で、 C/D 比が大きくなり/小さくなるほど知覚した重さの絶対値は大きくなることから、ユーザに対して効果的な重さの提示を行えるのは C/D 比 ≤ 0.6 、 C/D 比 ≥ 1.4 の範囲であると考えられる。以上より今回の実験結果からは、 $0.6 < C/D$ 比 < 1.4 を除いた C/D 比を用いることにより擬似的な力覚を効果的に提示可能であると考えられる。

5. 結論

本研究はスクリーンに物理的な動きを付加し視覚コンテンツの空間性の拡張を検討した先行研究 Living Wall Display で得られた知見を元に、クロスモーダルな擬似力覚提示手法である Pseudo Haptics のアプローチを取り入れ、スクリーンの物理的な動きの付加による擬似的な力覚生成の可能性を調査した。その結果、スクリーンの物理的な動きを付加しこれの移動量を操作することは、従来の Pseudo Haptics と同等の力覚生成効果を持つことや、スクリーンの動きと映像の組み合わせによる軽さの誇張表現の可能性が観察された。今後は本実験を行い、さらに物体を引く等の異なる力の表現についても検討する。

参考文献

- [1] Alexander, J. et al. Tilt displays: Designing Display Surfaces with Multi-axis Tilting and Actuation. *MobileHCI '12*, 161–170.
- [2] Anatole, L. 2009. Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. *Presence*, 18, 1, 39–53.
- [3] Ban, Y. et al. Magic pot: interactive metamorphosis of the perceived shape. *SIGGRAPH '12*
- [4] Box by Bot & Dolly: <https://www.youtube.com/watch?v=IX6JcybgDFo&t=17s>.
- [5] Lecuyer, A. et al. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? *Proceedings IEEE Virtual Reality (2002)*, 83–90.
- [6] Onishi, Y. et al. Exploring Living Wall Display that Physically Augments Interactive Content. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*. 24, 3 (2019).
- [7] Punpongsonon, P. et al. SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality. *IEEE TVCG'15*, 1279–1288.
- [8] Rietzler, M. et al. Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception using Perceivable Tracking Offsets. *CHI '18*, 1–12.
- [9] Samad, M. et al. Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio. 13.
- [10] Taima, Y. et al. Controlling fatigue while lifting objects using Pseudo-haptics in a mixed reality space. *IEEE Haptics Symposium'14*, 175–180.
- [11] Takashima, K. et al. MovementTable: The Design of Moving Interactive Tabletops. *INTERACT 2015*, 296–314.
- [12] Takashima, K. et al. 2016. Study and Design of a Shape-Shifting Wall Display. *DIS '16*, 796–806.
- [13] 役山 寛将ら. 運動強調ディスプレイの評価. 計測自動制御学会東北支部第267回研究集会 (2011), 267–284.
- [14] Onishi, Y. et al. The Living Wall Display: Physical Augmentation of Interactive Content Using an Autonomous Mobile Display. *SIGGRAPH Asia 2018*.
- [15] 大西 悠貴ら. 自走式ディスプレイの並進と回転を用いたコンテンツ表現の拡張の試み. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集. 2017, 383–384