



仮想の視点と手の操作による Pseudo-haptics

Pseudo-haptics by manipulation of virtual viewpoint and virtual hand

渡部理久¹⁾²⁾, 伊藤充¹⁾, 高橋哲史²⁾, 雨宮智浩²⁾, 伴祐樹²⁾

Riku WATANABE, Mitsuru ITO, Akifumi TAKAHASHI, Tomihiro AMEMIYA and Ban YUKI

1) 三菱電機 (株) 情報技術総合研究所 (〒 247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1, watanabe.riku@ak.mitsubishielectric.co.jp)

2) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, watanabe-riku-vr@amelab.vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では, 仮想環境における大きな身体運動の際に, 仮想視点と仮想手を同時に操作することで, 知覚重量を増強する手法を提案し評価する. Pseudo-haptics を用いた先行研究では, 主に仮想手の操作のみに着目していたが, 本研究では, 仮想視点の操作を加えることで, 知覚重量の変調を増幅できると仮定した. 実験では, 仮想手と仮想視点の動きをそれぞれ調整し, その組み合わせによる影響を評価した. 結果として, 仮想手の操作, 仮想視点の操作のどちらも知覚重量を増強し, 二つを組み合わせることで単独操作よりも大きく知覚重量を変調できることがわかった.

キーワード: Pseudo-haptics, 重量知覚, クロスモーダル

1. はじめに

近年の VR (Virtual Reality) 技術の急速な発展に伴い, 産業, 物流, リハビリテーションといった分野における物理的作業のシミュレーション手法として, VR トレーニングが有効なツールとして注目されている [1]. 先行研究では, VR トレーニングにおける効果的な技能習得のために, 姿勢 [2] や触覚 [3] の重要性が強調されている. これらはいずれもユーザが身体的な動作を知覚し実行する上で重要であり, 姿勢は生体力学的なリアリズムを促進し, 触覚はタスクの遂行に関する感覚を提供することで運動学習を促進する.

触覚を提示する手法の一つとして, Pseudo-haptics が提案されている [4]. このアプローチは, 身体動作を反映する視覚情報の変調によって, 疑似的な触力覚を提示するものであり, 物理的フィードバックを用いるものに比べてスケラブルかつ低コストである. Pseudo-haptics の一般的な例としては, 持ち上げ動作中に仮想の手や物体の動きをユーザの実際の手の動きとずらす方法があり, 仮想的な動きが遅ければ重く, 速ければ軽く感じられる [5].

多くの Pseudo-haptics の研究では座位姿勢のユーザを想定しており, 操作は手のみに限定されている. これは, 工業現場や建設現場などで重い物体を取り扱うために全身の協調動作が必要とされる現実世界のタスクを考慮する際に, 特に大きな制約となる. このようなタスクを VR トレーニングで学習する際, 誤った姿勢での練習は実際の作業時に怪我のリスクを高める可能性がある. したがって, 仮想環境内でも全身を使った自然な持ち上げ動作を再現することが重要である.

そこで, 本研究では手の動きと視点操作を組み合わせた新しい手法を導入することで, Pseudo-haptics を全身動作

に拡張することを目的とする. 先行研究では, 視点の変化が身体運動の知覚や自己運動感覚に影響を与えることが示されており [6], それが身体的な負担感や空間的な方向感覚の知覚に影響を与えることが知られている. 本研究では, 視点操作が全身運動の知覚に影響を与えるという知見と, 手の動きを用いた Pseudo-haptics の知見に基づき, 視点の操作によって手の動きが引き起こす重さ・軽さの知覚を強化できると仮定する.

2. 関連研究

2.1 重量知覚のための Pseudo-haptics

Pseudo-haptics は, 身体的な動作と視覚的な反応の間に制御されたずれを導入することで, 疑似的な重量感を提示する手法として広く研究されてきた. Samad ら [7] は, 実物体の持ち上げ時に視覚と物理的変位の比率を変更することで, 知覚される重さを変化させた. Rietzler ら [8] は, 仮想手の遅れ量が仮想物体の質量に対応する計算モデルを提案した. Taima ら [5] は, 持ち上げ動作中に視覚と固有感覚のずれを導入し, その後に整合性を回復させることで, 空間的一貫性を保ちつつ重さの変化を知覚させる手法を提案した. これらの研究はいずれも, 手による視覚フィードバックを通じて効果的に重量を模擬しているが, 多くは座位姿勢で手中心の利用を想定している. これに対して, 我々の研究は, 全身を使ったタスクにおいて, 手の動きに加えて視点操作を導入することで, 持ち上げ動作中の重量知覚を強化する Pseudo-haptics を探求する.

2.2 視点操作による触覚提示

先行研究から, 視点の操作は身体知覚や自己運動感覚, さらには視覚の手がかりを通じた触覚体験にまで影響を与えることが示されている. Tada ら [9] は視点の変位を導

入することで、手に抵抗感を生じさせる手法を提案した。Matsumuro ら [10] は、視点をわずかに変化させることで、仮想家具の柔らかさやしなやかさといった素材の印象を変化させた。これらの進展にもかかわらず、視点操作は重量知覚という特定の文脈においてはまだ十分に应用されていない。

3. 提案手法

本手法では、物体を持ち上げる動作中に仮想の手と仮想の視点を同時に操作する。これらの操作は、ユーザが物体を把持したときに開始される。物体を把持していないときは、仮想手と実手は視覚的に整合しており、仮想視点もユーザの頭部運動に歪みなく追従する。

3.1 仮想手の操作

仮想手の操作には、視覚的パラメータ k_h を用いて、実手に対する仮想手の移動量をスケールする。この k_h は、Pseudo-haptics 研究で一般に Control-Display 比 (C/D 比) として知られる、仮想と実世界の変位の比率を表す。 $k_h = 1.0$ は仮想手と実手の動きが完全に一致することを意味する。 $k_h < 1.0$ の場合、仮想手の変位が小さくなり、抵抗感や重さを感じられるようになる。 $k_h > 1.0$ の場合、仮想手の変位が大きくなり、軽さや支援されている感覚を与える。 $k_h \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ は次のように定義される。

$$Y_{h,f} = Y_{h,f-1} + (y_{h,f} - y_{h,f-1})k_h \quad (1)$$

ここで、 $y_{h,f}$ はフレーム f における実手の垂直位置、 $Y_{h,f}$ は仮想手の垂直位置である。

3.2 仮想視点の操作

仮想カメラの垂直変位を、ユーザの現実世界における頭部の動きに対してスケールするために、視点ゲインパラメータ k_v を定義する。

$k_v \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ は、現実と仮想における垂直方向の頭部運動の Control-Display 比を表す。 $k_v = 1.0$ の場合、仮想視点はユーザの物理的運動をそのまま反映する。 $k_v < 1.0$ のとき、垂直運動は視覚的に抑制され、遅れが生じることで物体の重さを強調する。 $k_v > 1.0$ の場合、運動が誇張され、負荷の感覚が軽減される可能性がある。

フレーム f における仮想垂直座標 $Y_{v,f}$ は次のように定義される。

$$Y_{v,f} = Y_{v,f-1} + (y_{v,f} - y_{v,f-1})k_v \quad (2)$$

ここで、 $y_{v,f}$ はフレーム f における現実世界の HMD の垂直位置を示す。この操作も物体とのインタラクション時にのみ適用される。

3.3 ずれの補正

仮想手や視点と現実の位置のずれは、Pseudo-haptics による重量感の増幅のために意図的に導入されるが、補正されないまま残すと、知覚的な違和感、空間的なずれ、リアリズムの低下を引き起こす恐れがある。そのため、我々は

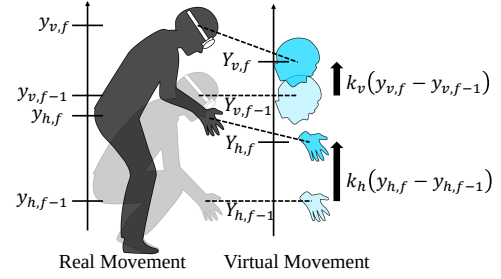


図 1: 仮想の手と視点を操作して、pseudo-haptics 効果を得る

Taima らの二段階持ち上げモデル [5] に基づき、時間的な補正機構を導入する。

補正のために、持ち上げ動作を 2 つのフェーズに分ける。前半は Early lift phase とし、Pseudo-haptics 効果を誘発するために視覚と固有感覚のずれを導入する。後半は Late lift phase とし、視覚的整合性を回復し、ずれを段階的に減少させる。

Early lift phase は、手と視点の両方が正の速度および加速度で上昇している区間と定義される。以下の条件を満たす。

$$v_{h,f} > 0 \wedge a_{h,f} > 0 \wedge v_{v,f} > 0 \wedge a_{v,f} > 0 \quad (3)$$

ここで、 $v_{v,f} = y_{v,f} - y_{v,f-1}$ 、 $a_{v,f} = v_{v,f} - v_{v,f-1}$ 、 $v_{h,f}$ および $a_{h,f}$ も同様に定義される。Late lift phase は、手または視点の垂直加速度が 0 以下になると開始され、上昇動作の終了を示す。

このフェーズでは、現実と仮想の位置のずれを指数関数的に減衰させて補正する。具体的には、前フレームからのずれを 90% に減らして、仮想の視点と手の位置を更新する。この操作により、空間的一貫性へのスムーズな復帰が可能となり、知覚的な不連続を回避できる。

4. 実験

4.1 本実験

4.1.1 実験デザイン

本研究では、仮想手の動きのスケール (k_h) および視点のスケール (k_v) が、(1) 物体の重さの知覚に与える個別および相互の影響を検証した。また、仮想と現実の身体部位のずれが大きくなるとプレゼンスが低下するという先行研究 [11] から、(2) プレゼンスに与える個別および相互の影響を検証した。 k_h と k_v のそれぞれに対して 0.2, 1.0, 1.8 の 3 水準を設定し、 3×3 の被験者内要因計画により合計 9 条件を構成した。

4.1.2 手続き

被験者は 23 名 (女性 5 名, 男性 18 名, 平均年齢 $M = 23.61$, 標準偏差 $SD = 4.76$, 右利き 21 名) であった。

練習ブロックの後、各参加者は順序をカウンターバランスした 3 つのブロック (各 9 試行, 計 27 試行) を実施した。

順序効果を抑えるためにラテン方格法を用いた。

各試行では、まず右側の基準物体 ($k_h = k_v = 1.0$) を持ち上げ、次に左側の比較物体 (条件に応じて操作された) を持ち上げた。持ち上げ動作では、しゃがんだ姿勢から視覚的バーで示された目標高さまで物体を引き上げる。

各試行後、参加者は比較物体については知覚された重さとプレゼンスについて 10 段階で評価した。知覚された重さについては 1 が最も軽く、10 が最も重かった。プレゼンスについては 1 が最もプレゼンスが小さく、10 が最もプレゼンスが大きかった。3 ブロック分の平均スコアを分析に用いた。

4.2 結果

重量知覚 反復測定分散分析の結果、 k_h ($p < .001$, $\eta_p^2 = .669$) および k_v ($p < .001$, $\eta_p^2 = .315$) の両方において有意な主効果が認められた。中でも k_h の影響がより大きかった (Fig. 3a)。両要因の交互作用は有意ではなかった ($p = .119$, $\eta_p^2 = .079$)。主効果に関する全ての多重比較で有意差が確認された (Holm 補正後の $p < .05$)。

プレゼンス プレゼンスに関しては、 k_h ($p < .001$, $\eta_p^2 = .529$) および k_v ($p = .006$, $\eta_p^2 = .209$) の両方で有意な主効果が見られた。また、両者の交互作用も有意であった ($p < .001$, $\eta_p^2 = .270$) (Fig. 3b)。特に $k_h = 1.8$ の条件では、 k_v の水準間での比較において全て有意差が認められた (Holm 補正後の $p < .05$)。

4.3 考察

重量知覚 k_h が小さく、 k_v が大きいと、物体はより重く感じられた。逆に k_h が大きく k_v が小さい場合には、物体は軽く感じられる傾向があった。

この現象は、仮想空間内における手と視点の相対速度や距離の変化で説明できる。 k_h が小さく k_v が大きいと、仮想手が視点から遠ざかり、その「離れ具合」が負担感・重さの感覚を高める要因となる。一方、 k_h が大きく k_v が小さいと、手と視点の距離が近づき、物体が軽く感じられる可能性がある。

また、視点の動きによって仮想空間内での姿勢安定性に違いが生まれ、それが重量知覚に影響した可能性もある。特にウエイトリフティングの経験者は、「最も軽く感じた (k_h, k_v) = (1.8, 0.2) の条件は、全身で支える安定した姿勢に近く、逆に最も重く感じた (0.2, 1.8) の条件は、腕だけで支える不安定な姿勢に似ていた」と報告している。

これらの結果は、視点速度を変化させることで、手の動きだけでは実現が難しい方向 (特に重く感じさせる方向) への知覚操作が可能であることを示している。

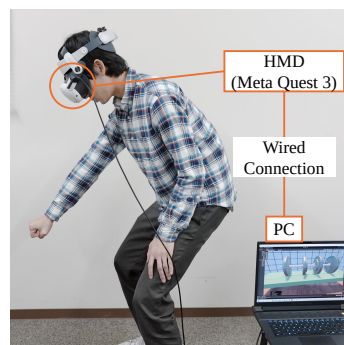
プレゼンス 視点スケーリングによって重量感の強化には成功したが、プレゼンスには一定のトレードオフが見られた。特に、物体の見た目に対して動きが軽すぎると、視覚と運動の手がかりが一致せず、現実感が損なわれた。

ただし、 $k_h = 1.8$ の軽量感提示において、 $k_v = 1.8$ の視

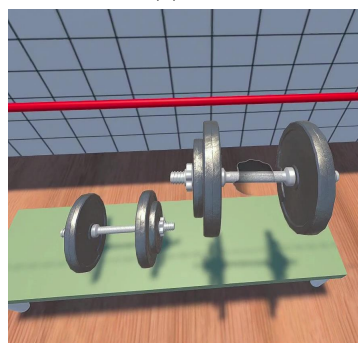
点スケーリングを加えるとプレゼンスの低下が抑えられることも確認された (Fig. 3b)。一方で、 k_v を上げすぎると今度は軽さの知覚が損なわれる傾向もあり、重量感とプレゼンスの間にはトレードオフ関係が存在することが示唆される。

重く感じる条件下では、このようなプレゼンスの低下はあまり見られなかった。少なくとも本研究の範囲では、仮想物体を「より重く感じさせる」方向であれば、プレゼンスへの悪影響は比較的小さいと考えられる。

このことから、プレゼンスは「軽すぎる表現」に対しては敏感に反応する一方、「重すぎる表現」には比較的寛容であるという、非対称的な感受性がある可能性がある。この点は、「視点を前方に動かすことで身体の上昇を模倣し、身体所有感を強化できる」という我々の初期仮説と矛盾しており、視点操作と物体の動きがバランスしていないと、かえって逆効果になる可能性を示している。



(a) 現実

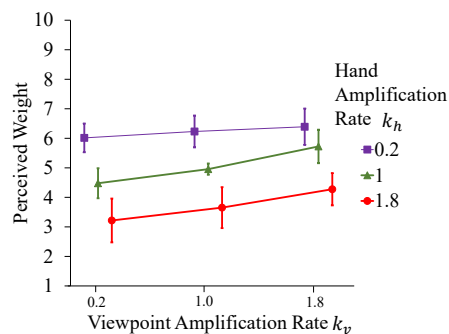


(b) 仮想環境

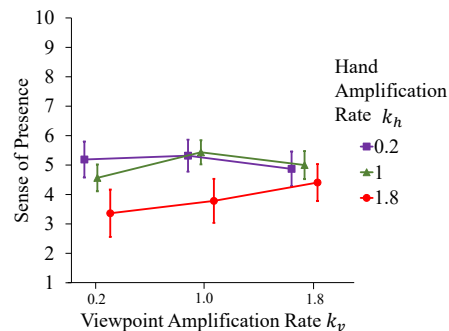
図 2: 実験の様子

5. まとめ

本研究では、手の操作と視点の操作を組み合わせることで、全身動作における重量知覚を強化する Pseudo-haptics を提案した。実験の結果、手の操作と視点の操作の両方が重量およびプレゼンスの知覚に有意な影響を与えることが示された。また、いくつかの設計上の示唆が得られた。まず、手の動きのスケーリングは、臨場感を損なうことなく重量錯覚を誘発する効果的かつスケーラブルな手法である。また、視点操作は視覚と身体の乖離を通じて負担感を強化



(a) 重量



(b) プレゼンス

図 3: 知覚される重量と存在感に関する全条件での参加者の平均評価 (エラーバーは 95 %信頼区間を示す)

する補完的な知覚チャンネルとして機能することがわかった。

本研究では仮想手と物体の相互作用に特化したタスクを対象としており、たとえばバックパックを背負う、もたれかかるといった手を使わない状況においては、視点の手がかりがより大きな影響を与える可能性があるため、こうしたタスクへの拡張も検討すべきである。

参考文献

- [1] Zhonggen Yu and Wei Xu. A meta - analysis and systematic review of the effect of virtual reality technology on users' learning outcomes. *Computer Applications in Engineering Education*, 30, 05 2022.
- [2] David J. Harris, Jonathan M. Bird, Philip A. Smart, Mark R. Wilson, and Samuel J. Vine. A framework for the testing and validation of simulated environments in experimentation and training. *Frontiers in Psychology*, 11, 2020.
- [3] E. Gallegos-Nieto, H. I. Medellín-Castillo, G. González-Badillo, and M. A. Salinas-Avila. The analysis and evaluation of the influence of haptic-enabled virtual assembly training on real assembly performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89:581–598, 2017.
- [4] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pages 83–90, New Brunswick, NJ, USA, 2000. IEEE Comput. Soc.
- [5] Yuki Taima, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Controlling fatigue while lifting objects using Pseudo-haptics in a mixed reality space. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pages 175–180, Houston, TX, USA, February 2014. IEEE.
- [6] Stephen Palmisano, Robert S. Allison, Mark M. Schira, and Robert J. Barry. Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Frontiers in Psychology*, 6, 2015.
- [7] 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*, pages 1–13, Glasgow Scotland Uk, May 2019. ACM.
- [8] Michael Rietzler, Florian Geiselhart, Jan Gugenheimer, and Enrico Rukzio. Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception using Perceivable Tracking Offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–12, Montreal QC Canada, April 2018. ACM.
- [9] Shoki Tada and Takefumi Ogawa. Evoking Pseudo-Haptics of Resistance Force by Viewpoint Displacement. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pages 674–675, Atlanta, GA, USA, March 2020. IEEE.
- [10] Miki Matsumuro, Shohei Mori, Yuta Kataoka, Fumiaki Igarashi, Fumihisa Shibata, and Asako Kimura. Modified Egocentric Viewpoint for Softer Seated Experience in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(5):2230–2238, May 2023.
- [11] Takeshi Honda, Nobuhiro Hagura, Taro Yoshioka, and Hiroshi Imamizu. Imposed visual feedback delay of an action changes mass perception based on the sensory prediction error. *Frontiers in Psychology*, 4:760, October 2013.