



ピンチ力に応じた視覚フィードバックによる重さ感提示

Weight Presentation with Visual Feedback Modulated by Pinch Force

小林 修也¹⁾, 伴 祐樹¹⁾, 割澤 伸一¹⁾

Shuya KOBAYASHI, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, kobayashi_shuya@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: VR 空間での重さ感提示手法として視触覚クロスモーダルを用いた手法が注目されてきた。しかし、それらの手法の多くは MR 環境で利用することが難しい。本研究では、仮想物体をピンチした時の力に応じて物体がずり落ちるといった視覚フィードバックによって MR 環境でも利用可能な重さ感提示手法を提案した。実験により、提案手法によって重さ感の提示が可能であるが、異なる重さ感の提示はできないことが示唆された。

キーワード: Mixed Reality, 触覚, クロスモーダル

1. はじめに

Virtual Reality (VR) や Mixed Reality (MR) は産業訓練において、手軽で安全な学習環境を提供できる技術として注目されている。しかし、一般的な VR/MR デバイスが提示可能な刺激は視聴覚刺激のみであり、重さなどの現実世界の物理的特性を忠実に再現するには限界がある。特に、MR の具体的な利用場面としては自動車の点検・設備や手術のトレーニングなどがあり、触覚フィードバックは操作性や学習効果を高める [1] という点で重要であることが分かっている。VR 空間での重さ感提示手法としては、視触覚クロスモーダルを用いたアプローチが知られている。複雑なハードウェアを必要としないため、ユーザーの動きを妨げず、快適に様々な仮想物体へ柔軟に適用できるという利点がある。しかし、これらの研究の多くは VR 環境での検証に留まっている。MR 環境では現実世界が見えているため、VR とは異なる制約が存在するためである。実際、視触覚クロスモーダルの代表である Pseudo-haptics は MR において VR と同じような重さ感提示が出来ない事が知られている [2]。

また、従来の研究では大きさ-重さ錯覚 [3] やプロテウス効果 [4] などの手法を用いた重さ提示が行われてきたが、これらのアプローチでは物体の形状や映像を大きく変える必要がある。

本研究では、以上の課題を解決する手法として、ユーザーのピンチ力に応じた視覚フィードバックによる重さ感の提示手法を提案する。具体的には、ユーザーが仮想物体を指でつまむ動作に対し、その力の大きさに応じて物体の視覚的挙動を動的に変化させることで、異なる重さを持つ物体を操作しているかのような感覚を想起させることを目的とした。

2. 提案手法

本研究では新しい重さ感提示手法を提案するにあたり、現実の物体を把持するときに手指が受ける反力に着目した。先行研究により、重力に平行な方向に力を提示しなくても、対称な振動刺激を重力と垂直な方向に提示することで重さ感提示できることが確かめられている [5]。しかし、これは手に物理的な刺激を提示するデバイスを用いた手法であり、現実空間が視認できる MR では物体とのインタラクションに支障が出る可能性がある。一方、伴ら [6] は、指同士を接触させる感覚を利用することで、あたかも仮想物体をつまんだり触ったりしているような錯覚を生じさせることに成功している。

これらの先行研究から、MR で仮想物体をつまむ際に指と指の間に生じる反力を仮想物体から受ける反力だと錯覚させることで重さ感を提示できるという仮説を立てた。また、ユーザーが自然に指に力を入れるように、一定以上のピンチ力をかけることで物体が持ち上がるシステムを設計した。

2.1 デバイス

前節で述べた設計の意図を鑑みれば前腕や手首に装着できる筋電デバイスが望ましい。しかし本研究では、提案システムによる質量感提示効果の検証を主目的とし、デバイス実装を簡素な構成に留めた。そのため、力の入力には小型で安価なフォースセンサ (FSR402) を用いることとした。このセンサで力を正確に測定するにはユーザーがセンサ面になるべく垂直に力を加える必要がある。そこで本研究では親指と人差し指で物体をつまんで持ち上げる動作を対象とし、力センサを固定した指サックを人差し指に装着できるように設計した。圧力センサ、Arduino Nano、PC をつないで 100ms ごとに力センサの値をシリアル通信で PC へ

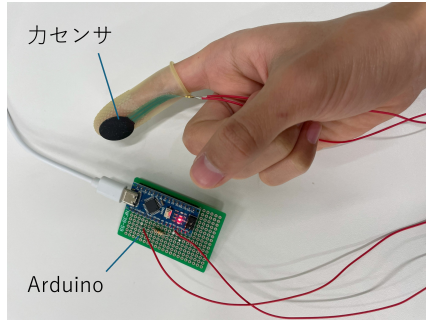


図 1: デバイスの概観

送信するよう実装している。

2.2 システム

現実世界で物体を持ち上げる際には、物体の質量が大きいほど大きなピンチ力が必要になる。本研究では必要なピンチ力を変化させることによって、多様な重さ感を生起させることを目指す。具体的なシステムは以下の通りである。

持ち上げる物体の挙動は古典力学に基づき設計した。指先が物体に及ぼす法線力を N 、指と物体の間の静止摩擦係数を μ_s 、物体の質量を m 、重力加速度を g 、手の加速度を α としたとき、物体に作用する力は図 2 のようになる。物体が手に追従して滑り落ちない条件は

$$2\mu_s N \geq mg + m\alpha \geq -2\mu_s N \quad (1)$$

で与えられる。上式を満たさないとき物体は手に対して相対加速度 α' で滑動する。これは指と物体の間の動摩擦係数を μ_d としたとき、

$$\alpha' = \begin{cases} -g - \alpha + \frac{2\mu_d N}{m} & (m\alpha + mg \geq 0) \\ -g - \alpha - \frac{2\mu_d N}{m} & (m\alpha + mg < 0) \end{cases} \quad (2)$$

となるように設計した。つまり、持ち上げ開始時には仮想物体の質量 m に応じた最小ピンチ力をかけなければ物体は持ち上がらず、持ち上げ中にピンチ力が十分でなかったり、大きな加速度を与えたりすると、仮想物体が手から滑り落ちるように設計されている。

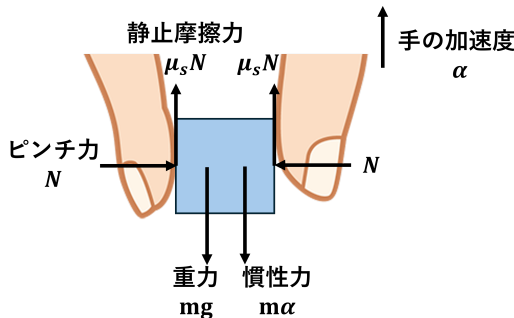


図 2: 持ち上げ時に物体にかかる力

3. 実験

前節で提案した重さ感提示手法の効果を検証するために、実験を実施した。検証内容は「提案手法によって重さ感を提示できるか」、「仮想質量を変化させることによって重さ感の違いを提示できるか」の二つである。本実験の参加者は 22 歳から 25 歳 (平均年齢 23.2 歳) で男性 9 名、女性 1 名の合計 10 名であった。

3.1 実験システム

今回の実験で使うデバイス、システムは前節で述べた通りである。また、本実験では持ち上げるオブジェクトとして上部に長さ 5 cm の円柱状グリップを取り付けた一辺 8 cm の立方体を用意した。グリップを設けた理由は、つまむという動作を自然に誘発し、つまむ位置の統制が行いやすくなるためである。

3.2 実験条件

本実験では、基準箱と比較箱という 2 種類の仮想箱を用いた。基準箱は手との当たり判定とつまむジェスチャーだけで持ち上がる箱である。一方、比較箱は統制条件として基準箱と同じ箱が 1 種類と、提案手法について仮想質量が異なる 3 種類の計 4 条件用意した。また、本実験で使用する提案手法の各パラメータを決定するにあたって松材の物性値 (比重 0.52, 静止摩擦係数 0.8, 動摩擦係数 0.6) を参考に [7] [8]。仮想質量あり条件で m が最も大きい条件は箱の材質が全て松材だとしたときの質量 226.2 g とし、他の条件はその 2/3, 1/3 の重さである 150.8 g, 75.4 g とした。

3.3 実験タスク

実験参加者が行ったタスクについて説明する。

- 図 3(a) の右の箱を棒の赤い部分を持ち、図 3(b) のように上部のバーに触れて色が変わるまで持ち上げ、色が変わったら箱を離す。
- 同様に左側の比較箱を持ち上げて離す。
- 右左右左の順で 2 回ずつ行い、基準箱の箱の重さを 100 としたときの比較箱の重さを回答する。

本実験では、手の持ち上げ量が一定以上に到達するとバーの色が変わることで持ち上げ高さの統制を行った。今回の実装では、箱の棒をつまんでから力を入れて持ち上げられるようになるまでに、手が棒の上を滑ることが予想された。箱の持ち上げ高さで統制すると手の仕事量が参加者ごとに変化してしまい、正しい比較ができなかったためこのような統制を行った。

実験タスクは 4 条件を各 3 回ずつ、計 12 試行実施された。条件の提示順は、ラテン方格法を用いて順序効果の影響が小さくなるように設計された。

また、実験参加者はあらかじめ各条件について一回ずつタスクの練習を行い、実装システムを把握していなくても持ち上げられることを確認した。

3.4 実験手順

実験参加者は簡単な事前アンケートに回答した後、実験概要についての説明を受け、Head Mounted Display(HMD)

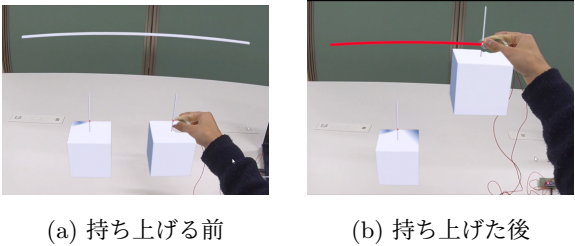


図 3: 実験参加者から見える映像

を装着した。その後、練習タスク、本タスクの順に各タスクを行った。最後に重さ感についてのアンケートに回答した。また、全試行で箱を持ち上げた際の、箱の座標、手の座標、力センサの値を記録した。実験実施に要した時間は、全体で 30 分程度であった。

3.5 実験結果

各条件における重さ評価値の分布を箱ひげ図として図 4 に示す。得られた実験データについて、Shapiro-Wilk 検定にて正規性を確認したところ、正規分布からの有意な逸脱は確認されなかった ($p < .05$)。そのため、各参加者について重さ評価値を z-score に変換した後、一元配置反復測定分散分析を実施した。分散分析の結果、主効果は有意 ($p < .001$) であった。この結果を受け、Shaffer の修正逐次棄却型ボンフェロニ手法を用いて多重比較を行った。その結果、統制条件とそれ以外の 3 条件の間に有意差が見られた ($p < .05$)。一方で仮想質量 75.4 g、150.8 g、226.2 g の 3 条件間では有意差が見られなかった ($p = 1.0$)。

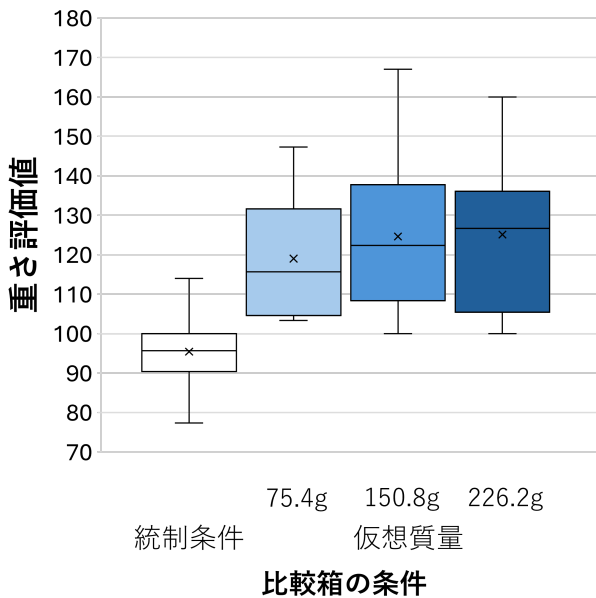


図 4: 各条件における重さ評価値の分布

3.6 考察

統計検定の結果、統制条件と比較してその他の 3 条件で重さ評価が有意に高くなったことから、提案手法によって重さ感の提示が可能であることが示唆された。実験後のア

ンケートでは参加者全員が「比較箱を重く感じる試行があった」と回答している。また、「現実の物体を持った時の重さ感と比べてどのような点が似ていたか」という質問には「力が足りない」と箱が持ち上がらず、棒が指の間を滑るような挙動をした点」という回答もあり、ピンチ力に応じた視覚フィードバックによって仮想物体の重さ感を生じさせられたことを示唆している。

一方で仮想質量 75.4 g、150.8 g、226.2 g の 3 条件間では有意差が見られなかったことから、異なる重さ感の提示はできないことが示唆された。以下ではその要因について考察する。まず、個人ごとに条件と重さ評価値の関係をみると、図 5 のように重さ感の違いを提示できなかった参加者と重さ感の違いを提示できた参加者に分けられる。重さ感の違いを提示できなかった参加者群は仮想質量が 75.4 g、150.8 g、226.2 g の 3 条件間で重さ評価値の変化がほとんど見られず、重さ感の違いを提示できた参加者群は、仮想質量が 75.4 g の条件より 226.2 g の条件を重く感じている。

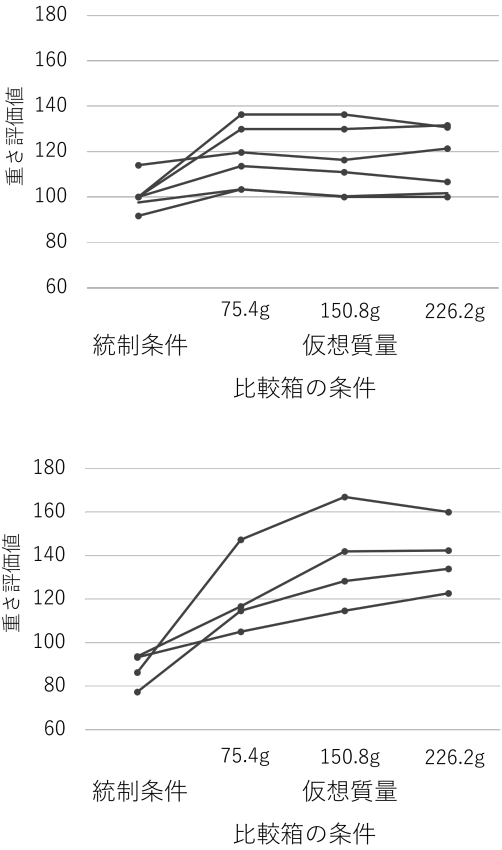


図 5: 実験参加者ごとの重さ評価値 上段: 重さ感の違いを提示できなかった参加者、下段: 重さ感の違いを提示できた参加者

重さ感の違いを提示できなかった参加者がいた原因として考えられるのが、仮想物体ピンチ時に必要以上の力を加えている可能性である。例えば、実験参加者が一番重い 226.2 g の物体を持ち上げられる力で 150.8 g や 75.4 g の物体も把

持してしまうと、条件間の違いが感じられなくなってしまう。そこで、仮想質量と実際にかけたピンチ力の対応を調べるため、各実験参加者ごとに仮想物体を持ち上げ始めてから基準高さまで到達するまでのピンチ力の平均を算出した。その結果、図 6 に示した通り、ほぼ全ての参加者が仮想物体の質量の増加に伴い、実際にかけるピンチ力を増加させていることが明らかになった。以上のことから、重さ感の違いを提示できなかった参加者は仮想質量の増加に伴い実際のピンチ力も増加したものの、それが仮想物体の重さ感の増加に結び付かなかったと考えられる。

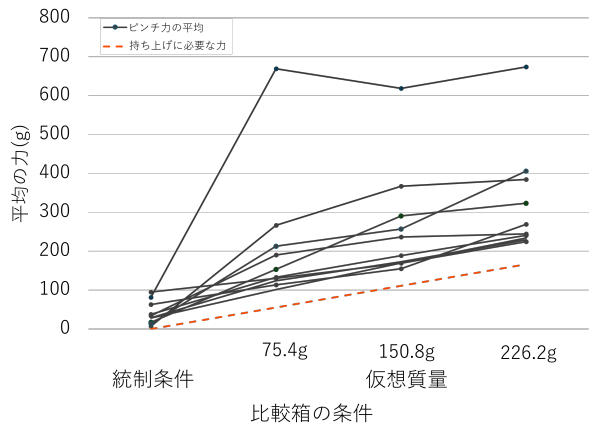


図 6: 実験参加者ごとの力の平均

重さ感の違いを提示できなかった参加者について実験後のアンケート結果を分析したところ、「試行間で何か違いを感じたか」という質問に対して「物体についているひもの滑りやすさが異なる」という回答があった。本実装では、仮想質量の増加に伴いピンチ力が増大するよう設計した。しかし、一部の参加者はこのピンチ力の増大を「物体の摩擦係数が低下した結果である」と解釈したため、重さ感の差異を知覚しなかった可能性が示唆される。現実環境では、指先に生じるせん断力の大きさを手掛かりとして、仮想質量の増加と摩擦係数の低下を識別できる。しかし、本手法ではこの触覚手掛かりが提示されないため、参加者の解釈が両要因に二分されたと推察される。以上より、ピンチ力の増加要因に関する解釈が「仮想質量の増加」と「摩擦係数の低下」に二分化した結果、仮想質量提示条件間で有意な差異が検出されなかった可能性がある。

4. おわりに

本研究ではピンチ力に応じた視覚的フィードバックによる重さ感提示手法の設計を行った。実験により、本手法の有効性を確かめるため実験を行ったところ、提案手法によって重さ感の提示が可能であることが示唆されたが、異なる重さ感の提示はできなかった。これは実験参加者がピンチ力の増加の原因を「摩擦係数の低下」と解釈したことが要因の一つと推察されるため、仮想物体のテクスチャを視覚的にリアルかつ一貫したものとなるよう設計し、摩擦係数

変化の想起を抑制することで、より純粋な質量変化として知覚させられると考えられる。

また、デバイス面でも改善の余地がある。実験後アンケートでは「力センサから延びる赤いケーブルが気になる」、「フレキシブル回路が手指に接触する」といった指摘があり、これらは MR の臨場感を損なう要因となり得る。筋電図 (EMG) 計測を導入することでケーブルレス化と機構の小型化が図れ、問題の解決が期待できる。また、本研究では物性値の基準に松材を用いたが、対象物のスケールや比重が大きくなると把持そのものが困難となるため、パラメータ設計については今後さらなる検討が必要である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP25K03163 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Renaud Ott, Daniel Thalmann, and Frederic Vexo. Haptic feedback in mixed-reality environment. *The Visual Computer*, Vol. 23, , 08 2007.

[2] 小林修也, 島村一輝, 伴祐樹, 割澤伸一. MR 環境下での Pseudo-haptics 利用による空間的不整合の視認が重さ知覚に与える影響の解明. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (AC2024), pp. 1A1-05. 日本バーチャルリアリティ学会, 2024.

[3] Nina Rohrbach, Joachim Hermsdörfer, Lisa-Marie Huber, Annika Thierfelder, and Gavin Buckingham. Fooling the size-weight illusion—using augmented reality to eliminate the effect of size on perceptions of heaviness and sensorimotor prediction. *Virtual Reality*, Vol. 25, , 12 2021.

[4] Kazuki Takeyama, Naoki Hashimoto, and Mie Sato. Examination of weight illusion by adding ar visual effects on the arm. In *International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2024*, Vol. 13164, pp. 591-594. SPIE, 2024.

[5] 金起鍊, 岡本正吾, 秋山靖博, 山田陽滋. 指先への振動刺激提示による重さ錯覚の発生条件と錯覚強度. 第 22 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2021), pp. 754-757. 計測自動制御学会, 2021.

[6] Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Air haptics: displaying feeling of contact with ar object using visuo-haptic interaction. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '15, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

[7] 公益社団法人日本木材加工技術協会. 木材の種類と特性 - マツ類 (アカマツ、クロマツ). アクセス日: 2025 年 1 月 18 日.

[8] 野々村美宗. 生体由来の物質の触感とトライボロジー. *オレオサイエンス*, Vol. 11, No. 8, pp. 277-282, 2011.