

MR 環境における指先追従型仮想軟体物を用いた重さ提示システム

2531051 小林雄志 成見研究室

1 はじめに

近年, HMD に搭載される Mixed Reality (MR) 機能や AR グラスの発展により, 現実空間に仮想物体を重ねて提示し, それらを操作できる技術が広がっている. MR では, 周囲の状況を視認しながら, 実物体と仮想物体を組み合わせたインタラクションを実現できる. 一方, 仮想物体には実体がなく, 操作時の重さや抵抗感を提示することは難しい.

Virtual Reality (VR) では, 現実の手の動きと仮想手の動きとの間に視覚的なずれを加えて重さを知覚させる手法が提案されている [1]. しかし, 現実の手が視認される MR では, 仮想手を現実の手からずらす表現を適用しにくい.

そこで本研究では, MR 環境で手指に球状の仮想軟体物を付加し, ユーザーの動作と仮想物体の重さに応じて形状, 色, 透過率を変化させることで, 仮想の手の位置や動きをずらさずに重さを視覚的に提示するシステムを提案する.

2 関連研究

Chen らは, 仮想手の指関節の変形と接触部の色変化により, VR 環境で重量感を提示した [2]. 本研究とは, 仮想手を提示する VR 環境を対象としている点で異なる.

Tian らは, 指先に仮想的な棒状の付属物を付加し, 接触時にその付属物を変形させることで, 視覚的な運動感覚フィードバックを生じさせ, 仮想キーボードの操作性を向上させる Kine-Appendage を提案した [3]. 本研究とは, VR 環境での仮想キーボード操作のみを対象としており, 重さ知覚を考慮していない点で異なる.

河邊らは, 指の動きに応じて仮想物体を伸長させ, 物体がちぎれるまでの距離を制御して粘り気を提示した [4]. 本研究とは, ディスプレイ上で粘り気を再現しており, 重さを対象としていない点で異なる.

3 提案システム

本システムでは, ハンドトラッキングで取得した手指の位置に球状の仮想軟体物を追従させる. ユーザーの操作と仮想物体の重さに応じて, 球体の形状, 色, 透過率を変化させ, 仮想の手の位置や動きを変えずに重さの違いを表現する.

手指に付加する形状には, どの方向から見ても変形を認識しやすく, 操作を妨げにくいと考えられる球体を採用した. 最終的には, 押す, 掴む, 持ち上げるといった3つの動作に対応し, ユーザーが自然に使えるシステムを目指す. また, 形状, 色, 透過率が重さ知覚や操作感に与える影響を調べ,

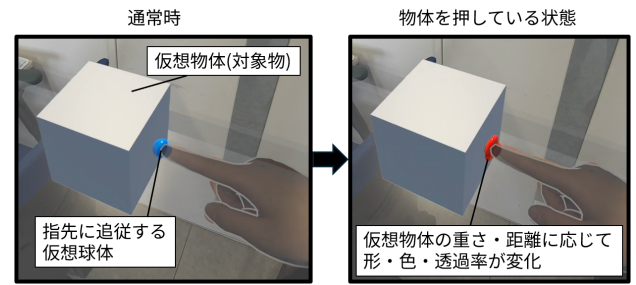


図1 押す操作の実装概要

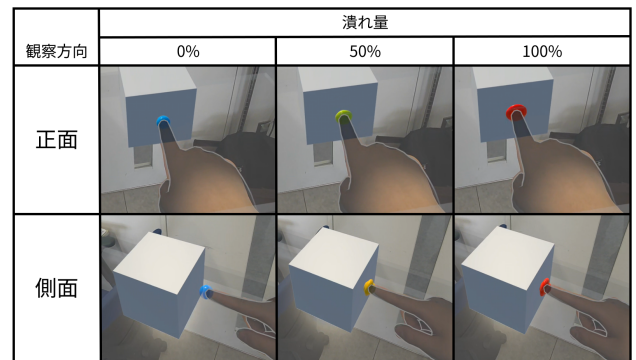


図2 潰れ量に応じた形状, 色, 透過率の変化例

各操作に適した提示方法を検討する.

4 進捗

4.1 押す操作の実装

現時点では, 押す動作に対応したシステムを実装している. 人差し指の先端に仮想球体を配置し, 仮想物体を押すと球体が指先と仮想物体の間で潰れる. 提示する重さが大きいほど, 潰れ量, 色, 透過率の変化の上限を大きく設定する. 図1に実装概要を示す.

球体は, 通常の球形と最も潰れた形状をブレンドシェイプで補間して変形させる. 本研究では, 両形状のブレンド割合を球体の「潰れ量」と呼び, 通常の球形を0%, 最も潰れた形状を100%とする. 図2に, 潰れ量が0, 50, 100%の場合の表示例を示す. 潰れ量が大きくなるにつれて球体を押す方向に潰れ, 色および透過率も変化する.

指先から仮想物体へ投射したレイにより距離を取得し, 指先が近づくにつれて潰れ量を0%から提示する重さに応じた上限値まで増加させる. 距離と潰れ量の関係は Unity の AnimationCurve で設定しており, 現在の距離に対応するカーブ上の値に基づいて, 球体の潰れ量を決定する. 色および透過率も同様に变化させる. 仮想物体への接近時は接触判定用コライダーを無効にし, レイから取得した距離に基づいて球体を変形させる. 潰れ量が重さに応じた上限値に達する

とコライダーを有効化して仮想物体を押し始め、指先が離れて潰れ量が0%に戻ると再びコライダーを無効化する。

本システムは Unity 6000.3.19f1, Meta XR All-in-One SDK (201.0.0) を用いて, Meta Quest 3 向けに実装した。

4.2 予備実験

球体の潰れ量が重さ知覚に与える影響を確認するため, 3 名を対象に予備実験を行った。色および透過率を一定とし, 潰れ量を 0, 25, 50, 75, 100% の 5 条件とした。各試行では, 比較対象となる仮想物体は変えず, 1 回目と 2 回目にそれぞれ球体の潰れ量条件を設定し, 参加者に各提示で 1 回ずつ順に押しもらった。いずれの提示でも, 仮想物体を初期位置から同じ目標位置まで押すように指示し, 2 回の提示後にどちらを重く感じたかを回答させた。押す距離は一定としたが, 押す速さは統制しなかった。

異なる 2 条件からなる全 10 組合せについて, 提示順を反転した 2 試行を行った。さらに, 同じ潰れ量を提示する 5 試行を加えた。以上の 25 試行を 1 ブロックとし, 1 名につき 2 ブロック, 計 50 試行を実施した。選択率の偶然水準との差には正確二項検定, 組合せおよび潰れ量差には Fisher-Freeman-Halton の正確検定, 提示順には正確 McNemar 検定を用いた。なお, 同一参加者による反復試行を含む 3 名の予備実験であるため, 結果は探索的なものとして解釈する。

4.3 実験結果と考察

異なる潰れ量を比較した 120 試行では, 114 試行で潰れ量が大きい条件が重いと選択され, 選択率 95.0% は偶然水準を有意に上回った ($p < .001$)。参加者ごとの選択率は 90.0, 100.0, 95.0% であり, 3 名全員が潰れ具合を重さ判断の手掛かりとして挙げた。この結果から, 潰れ量が重さ知覚に影響する可能性が示された。ただし, 重さではなく, 指先にかかる力や指の柔らかさの変化として感じたという回答も得られた。

図 3 に組合せごとの選択率を示す。すべての組合せで 83.3% 以上であり, 75–100% の組合せが 83.3% と最も低かった。潰れ量が大きい範囲では, 条件間の形状差を視覚的に判別しにくかった可能性がある。ただし, 組合せ間 ($p = .828$) および潰れ量差間 ($p = .212$) に有意な違いは確認されなかった。また, 全体の選択率が高く, 天井効果によって条件間の違いを捉えにくかった可能性もある。

同じ潰れ量を比較した 30 試行では, 21 試行で 2 つ目が重いと選択され, 選択率 70.0% は 50% を有意に上回った ($p = .043$)。この結果から, 提示順によって重さ知覚または

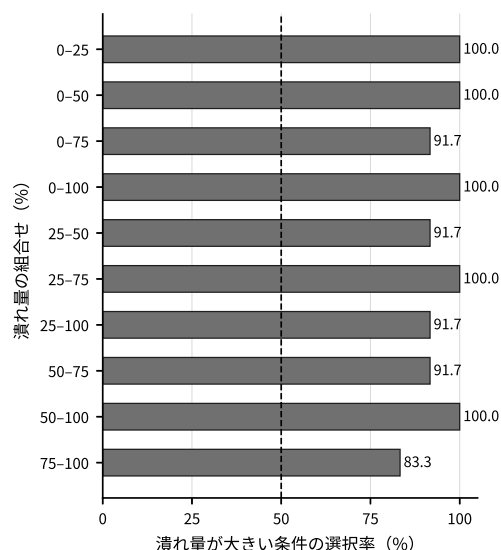


図 3 潰れ量の組合せ別にみた, 潰れ量が大きい条件の選択率

回答時の判断に偏りが生じた可能性がある。ただし, 参加者は 3 名と少ないため, 本結果は予備的な結果として捉える必要がある。また, 押す速さを計測していないため, 変形速度や観察時間が判断に影響した可能性もある。

5 おわりに

本研究では, MR 環境で手指に追従する球状の仮想軟体物の形状, 色, 透過率を変化させ, 仮想物体の重さを視覚的に表現するシステムを提案する。最終的には, 押す, 掴む, 持ち上げるという 3 つの動作に対応する予定である。現時点では押す操作を実装し, 3 名による予備実験を行った結果, 潰れ量が大きい条件が 95.0% の試行で重いと選択された。

今後は, 参加者数および試行数を増やし, 潰れ量が重さ知覚に与える影響を検証することに加え, 押す速さが知覚に与える影響について検討する。また, 色, 透過率についても潰れ量と同様に検証を行う。掴む操作および持ち上げる動作も実装を行い, 各操作に適した重さ表現を検討する。

参考文献

- [1] M. Rietzler, F. Geiselhart, J. Gugenheimer, and E. Rukzio. Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2018.
- [2] Weiya Chen, Mitsuru Ito, Riku Watanabe, Tomohiro Amemiya, and Yuki Ban. Self-hand joint deformation with contact-color cueing for pseudo-weight and pressure in VR: A deployable design with initial validation. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2026*, pp. 479–488, New York, NY, USA, 2026.
- [3] Yang Tian, Hualong Bai, Shengdong Zhao, Chi-Wing Fu, Chun Yu, Haozhao Qin, Qiong Wang, and Pheng-Ann Heng. Kine-Appendage: Enhancing freehand VR interaction through transformations of virtual appendages. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 7, pp. 3298–3313, July 2024.
- [4] Takahiro Kawabe, Tao Morisaki, and Yusuke Ujitoko. Pseudo-slimy: A novel phenomenon to evoke stickiness perception. *i-Perception*, Vol. 17, No. 3, p. 20416695261458511, 2026.