



空中疑似触覚を用いた VR 環境における 仮想オブジェクトの剛性評価

Stiffness Evaluation of Virtual Objects Using Mid-Air Pseudo-Haptics and Hand Tracking in VR

中江楓一郎¹⁾, 菅野正嗣²⁾

Fuichiro NAKAE, and Masashi SUGANO

1) 大阪公立大学大学院 情報学研究科 (〒 599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1, sp25478f@st.omu.ac.jp)

2) 大阪公立大学大学院 情報学研究科 (〒 599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1, sugano@omu.ac.jp)

概要: 近年, Virtual Reality (VR) は幅広い分野で普及しており, 没入感や臨場感がユーザ体験の向上において重要視されている. しかし, 力触覚は視覚や聴覚に比べて表現が難しく, 特殊なデバイスが必要であるため, その活用は限定的である. そこで本研究では, 空中疑似触覚を用いて VR 環境内で仮想オブジェクトの剛性を評価し, その手法の有効性を検証した. 検証の結果, 両パラメータが剛性知覚に有意な影響を与えることが示され, 特に CD 比の影響が大きいことが明らかとなった. これにより, VR 環境下において特殊なデバイスを用いずに剛性提示が可能であることが示唆された.

キーワード: 疑似触覚, ハンドトラッキング, 力覚・体性感覚

1. はじめに

近年, Virtual Reality (VR) は教育, リハビリテーション, エンターテインメントといった幅広い分野で普及しており, その没入感や臨場感がユーザ体験の向上において重要視されている. 従来, VR の没入感は主に視覚や聴覚を活用して提示されてきたが, 力触覚は視覚や聴覚に比べて表現が難しく, 特殊な力触覚デバイスが必要であるため, 力触覚を活用した体験は普及していない. この課題を解決する方法の一つとして疑似触覚 (Pseudo-Haptics) が注目されている [1].

疑似触覚とは, 身体動作を反映するポインタの位置や速度を適度に変化させることで, 疑似的な力触覚をユーザに知覚させる技術である. 本来の移動量 (Control) に対する視覚的に提示される移動量 (Display) の比を CD 比と呼ぶ. また, 力触覚提示デバイスを用いずともユーザに力触覚を提示できる利点があり, これを空中疑似触覚という.

空中疑似触覚では, ハンドトラッキングなどの手の動きを検知する技術を用いて, 疑似的な力触覚をユーザに提示させる技術である. しかし, 空中疑似触覚が物体の硬さや柔軟さを表現できることが示されているが, VR 環境における効果の有効性は十分に検証されていない.

本研究では, VR 環境における仮想オブジェクトの剛性評価を行うことで, コントロールを含む力触覚提示デバイスを用いない疑似触覚 (空中疑似触覚) の効果を客観的に検証する.

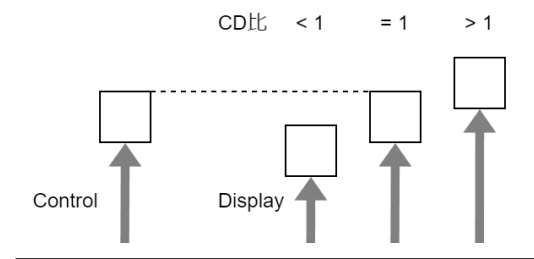


図 1: CD 比の原理

2. 関連研究

2.1 疑似触覚

疑似触覚効果の重要な構成要素は, 視覚情報と身体動作の不一致である. この不一致は, CD 比によって引き起こすことができる. CD 比とは, ユーザの物理的な移動 (Control) と視覚的に提示される移動 (Display) との間の比率を指す. 図 1 の正方形がユーザの手の移動 (Control) に追従するポインタとする. CD 比=1 の場合, ユーザの手の移動とポインタの移動が一致する. 一方, CD 比<1 の場合, ポインタの移動量が実際の手の移動より小さくなり, CD 比>1 の場合, ポインタの移動量が実際の手の移動より大きくなる. この比率を調節し, 視覚的なフィードバックを変えることで力触覚を提示できる.

2.2 空中疑似触覚

Kawabe (2020)[2] は, 疑似触覚を利用し, ユーザが実際に物体に触れずに空中で手を動かすだけで, 仮想オブジェクトの剛性を変化させることが可能かを調査した.

実験では, 被験者が Leap Motion Controller を用いて,

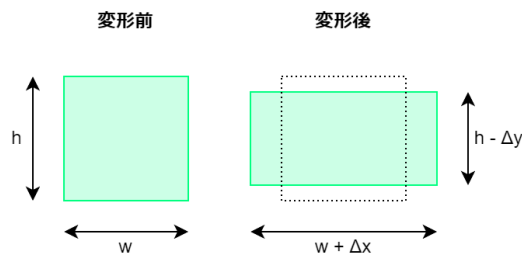


図 2: ポアソン効果の変形

画面上の仮想オブジェクトを両手で引き伸ばすような動作を行った。その際に仮想オブジェクトの CD 比を制御した。CD 比が大きいほど物体が柔らかく、CD 比が小さいほど硬く感じられるかどうかを検証した。また、材料の変形を表すポアソン比も制御し、垂直方向の変形量が剛性知覚に与える影響を検証した。

ポアソン効果とは、ゴムのような弾性材料が水平方向に引き伸ばされた際に、同時に垂直方向へ圧縮される物理現象である(図 2)。ポアソン効果は、ポアソン比 ν を用いて定量化でき、次の式で表される。

$$\nu = \frac{\Delta y/h}{\Delta x/w}$$

ここで、 w と h は仮想オブジェクトの幅と高さ、 Δx と Δy はそれぞれ水平方向と垂直方向の変形量を表す。実世界のポアソン効果は、ポアソン比は通常 0 (例: コルク) から 0.5 (例: 天然ゴム) の範囲に収まる。

実験の結果、CD 比とポアソン比を制御することで、空中での疑似触覚による剛性が変化することが示された。CD 比が大きいほど剛性評価は低くなり、ポアソン比も同様であった。これらの結果は、空中疑似触覚が物理的なデバイスを使用せずに剛性を操作できることを示唆している。

3. アプリケーションの開発

本アプリケーションの開発には、開発環境として 3D ゲームエンジンである Unity を採用し、開発言語として C# を使用した。また、Meta XR All-in-One SDK を使用し、Unity 上で Meta Quest 3S およびハンドトラッキングの利用を実現した。

仮想オブジェクト(クッション)は Blender を用いて作成した(図 3)。本実験では、対象となる仮想オブジェクトと仮想手の両方に 0.10, 0.25, 0.4, 0.55 の 4 種類の CD 比を設定した。その両方に CD 比を設定することで、仮想オブジェクトと仮想手の間の違和感を緩和した。また、仮想オブジェクトには、0, 0.25, 0.50 の 3 種類のポアソン比を適用した。

4. 実験

4.1 被験者

本実験には、12 名が参加した。平均年齢は 23.9 歳、標準偏差は 7.38 である。実験は、机の前に座った状態で実施し、部屋は HMD のハンドトラッキングが正常に動作する明るさであった。



図 3: 本実験で使用した仮想オブジェクト



図 4: ハンドジェスチャーによる評価

4.2 実験方法

基本的な操作に慣れるためのチュートリアルを行った後に実験を行った。4 種類の CD 比と 3 種類のポアソン比を組み合わせた 12 条件の仮想オブジェクトを提示した。これら 12 条件を 1 周あたり 3 回 (12 条件 × 3 回) 操作を行った。この 36 回の操作を 3 試行繰り返し、合計 108 回の操作を行った。パターン提示は、疑似乱数を用いてすべてのパターンを均等に提示した。各操作後に、剛性評価を行った。腕の疲れ、VR 酔い、HMD による顔の痛みを考慮して、試行間には任意の休憩時間を設けた。

4.3 剛性評価

剛性評価はハンドジェスチャーによる評価を採用した(図 4)。コントローラを用いて何らかの方法で評価をする場合、ハンドトラッキングを用いて仮想オブジェクトを操作した後、コントローラに持ち替える必要がある。また、キーボードを用いる場合、HMD を装着しているためキーがどこにあるか把握できない。これらの理由から、ハンドジェスチャーによる評価が最適だと判断した。評価はボタンを押すことで確定し、誤りがあった際は口頭で修正を申告できるようにした。

5. 結果

各条件の評価点は、個々の参加者内で平均され、さらに参加者間で平均されている。また、ポアソン比ごとの評価値を示すグラフを(図 5)に示した。まず、正規性を検証するために全 12 条件について Kolmogorov-Smirnov 検定を行った。その結果、評価データが正規分布と大きく逸脱していないことが確認され、分散分析の適用が妥当であると判断した。

次に、CD 比とポアソン比を被験者内要因とする 2 元配置分散分析を実施した。まず、CD 比の主効果は有意な差

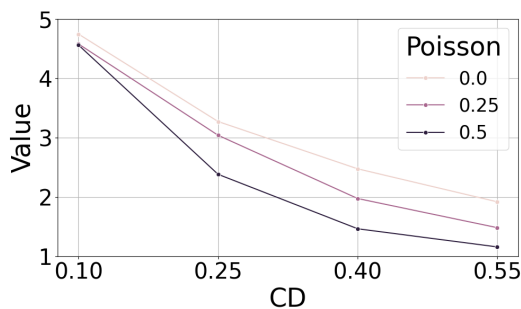


図 5: ポアソン比ごとの評価値を表すグラフ

がみられた [$F(3, 120) = 465.63, p < 0.001, \eta^2 = 0.92$]. 同様に、ポアソン比にも有意な差がみられた [$F(2, 132) = 47.54, p < 0.001, \eta^2 = 0.42$]. また、CD 比とポアソン比の相互作用効果も有意な差が見られた [$F(6, 132) = 3.67, p = 0.002, \eta^2 = 0.14$]. CD 比とポアソン比に関して、どちらも値が小さいほど被験者の主観的評価が「硬い」方向にシフトする傾向が強い結果となった。

6. 考察

本研究では、VR 空間における空中疑似触覚を用いた仮想オブジェクトの剛性評価を行った。その有効性を調査するため、CD 比とポアソン比が剛性評価に与える影響を調べた。その結果、CD 比が評価を変化させる強い要因であることが示された。CD 比が大きい場合、被験者は仮想オブジェクトをより柔らかく感じ、逆に CD 比が小さい場合は、仮想オブジェクトがより硬く知覚されることが明らかになった。ポアソン効果に関しても同様に、ポアソン比が評価を変化させる要因であることが示された。この結果は、先行研究 [2] で示された結果と一致している。

さらに、CD 比とポアソン比の間に有意な相互作用効果が見られ、先行研究 [2] とは異なる結果となった。図 5 からわかるとおり、CD 比が小さいほどポアソン比の影響が小さくなっている。これは、CD 比による剛性知覚への影響が強いため、ポアソン比による影響が小さくなると考えられる。影響が小さくなる原因は、疑似触覚とポアソン効果が異なるタイミングで被験者に影響を与えるからである。疑似触覚による剛性知覚は引き伸ばす動作を行った直後に CD 比によるズレによって感じられる。対して、ポアソン効果による剛性知覚は引き伸ばす動作をしたことによる仮想オブジェクトの変形によって感じられる。CD 比が小さい場合、仮想オブジェクトの水平方向への変形は小さくなり垂直方向への圧縮も小さくなるので、視覚的な変形が少なく、ポアソン比の違いが知覚されにくい。一方で、ポアソン比が中程度以上の場合には、視覚的な変形が十分に発生し、そ

の違いが明確に知覚されたことで、剛性評価に影響を与えたと考えられる。

また、各被験者ごとのグラフと図 4 を比較すると、ポアソン比ごとのグラフが交差している特徴が見られた。データ数が少ないことに加え、本実験ではアンケート等の主観的評価を行っていなかったため、詳細な原因は明らかにできなかった。今後の研究では、各被験者に対して、どのような変形がより柔らかく感じられたかや、仮想手の操作中に違和感を感じたかといった主観的評価をアンケートで収集し、個人差やグラフの交差現象の背景をより詳細に解明することが求められる。

7. むすび

本研究では、先行研究 [2] で検証されていなかった VR 環境における空中疑似触覚の有用性を検証した。検証の結果、両パラメータが剛性知覚に有意な影響を与えることが示され、特に CD 比の影響が大きいことが明らかとなった。この結果は、VR 環境下において特殊なデバイスを用いずとも剛性提示が可能であることが示唆された。

今後は、VR と AR 環境における剛性知覚の違いを検討し、仮想オブジェクトの形状やテクスチャの違いが評価にどのような影響を与えるのかを明らかにする必要がある。特に、AR 環境は VR 環境に比べてオブジェクトがより柔らかく知覚される傾向が報告されており [3]、本研究の手法がこの違いにどのような影響を与えるのかを検証することが求められる。また、本研究ではオブジェクトの変形に上限を設けたが、この制限が剛性評価に与える影響についても分析が必要である。そして、アンケートなどを用いて被験者の主観的意見を収集し、個人差や評価結果のばらつきの背景を解明することも重要な課題である。

参考文献

- [1] Anatole Lécuyer: Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback, Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53, 2009.
- [2] Takahiro Kawabe: Mid-Air Action Contributes to Pseudo-Haptic Stiffness Effects, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 13, No. 1, pp. 18–24, 2020.
- [3] Yoren Gaffary, Benoit Le Gouis, Maud Marchal, Ferran Argelaguet, Bruno Arnaldi, Anatole Lécuyer: AR Feels “Softer” than VR: Haptic Perception of Stiffness in Augmented versus Virtual Reality, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No. 6, pp. 2372–2377, 2017.