

仮想物体のプレゼンス向上のための 磁力を用いた重量感提示手法の提案

長谷川 駿¹ 吉野 孝²

概要: 近年, xR デバイスが普及し, 視覚的に高い臨場感を体感できるようになった. しかし, 視覚情報に対応する力覚情報を提示できない場合に「ユーザに対して違和感を与えてしまうことによる臨場感の低下」や「仮想コンテンツに対して, 正しい力・行動の選択ができない」といった問題が起こる可能性が十分に考えられる. そこで, 本研究では, 磁力を用いて, 重量感を提示することで, 仮想物体のプレゼンスを向上させる手法を検討する. 提案手法を実装したプロトタイプシステムを開発し, 重量感提示が仮想物体のプレゼンスに与える影響を検証した. 検証の結果, 振動提示に比べて, 重量感提示が仮想物体のプレゼンスを向上させることが確認できた.

Proposal of A Presenting a Sense of Weight Method with Magnetic Force in Order to Improve Presence of Virtual Objects

1. はじめに

近年, xR 機器の普及により, 誰でも簡単に高い臨場感が体験できるようになってきている. また, VRChat^{*1}やポケモン GO^{*2}のようなエンタメコンテンツが日常的に利用されるようになってきており, 徐々に仮想情報とのインタラクションが日常化してきている.

これまで, 人の活動は現実の場所に制限されていたが, 自身の存在を遠隔地へと拡張することができれば, 自身のいる場所にとらわれず活動を行うことが可能になる. そこで, 情報技術の発展により, テレプレゼンスやテレイグジスタンスと呼ばれる研究分野では, 自身の存在を遠隔地へと拡張する試みが行われている. 近年では, ICT 化が進み, Twitter や Facebook といった SNS, LINE や Discord といったオンライン通話アプリなどが普及し, どこにいても, 誰とでもコミュニケーションができるようになってきている. 最近では, コロナウイルスによるパンデミックの

影響で, 感染拡大の対策として, ビジネス, 教育や医療の現場でオンライン技術を活用した取り組みが積極的に行われている [1]. このように, エンタメコンテンツや遠隔地の情報などの仮想情報とのやり取りを行う機会は増加してきている. そのため, 高い臨場感・没入感を提供可能な xR 機器に対して今まで以上に需要が高まってきている^{*3}. しかし, xR 機器の普及により, 視覚的に高い臨場感を体感できるようになった一方で, 視覚情報に対応する力覚情報を提示できない場合に, 「ユーザに対して違和感を与えてしまうことによる臨場感の低下」や「仮想コンテンツに対して, 正しい力・行動の選択ができない」といった問題が起こる可能性が十分に考えられる. そのため, 仮想情報に対するインタラクションの方法として, 今までにも様々なアプローチが検討されてきた. そこで, 本研究では, 力覚情報の中でも特に「重さ」に焦点を当て, ユーザに行動の制限を与えず, 装置から離れた位置に十分な重量感提示を行うことができる力覚提示方法として, 磁力を採用した. 磁力による重量感提示を行うことで, 仮想情報のプレゼンスを向上させる手法を検討する.

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama, Japan

² 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama, Japan

^{*1} VR 空間内でユーザ同士が交流可能なコンテンツ

^{*2} 現実世界の情報を活用した AR ゲームアプリ

^{*3} <https://www.superdataresearch.com/blog/superdata-xr-update>

2. 関連研究

2.1 力触覚提示に関する研究

力触覚提示装置は「正確な力」を再現する装置と直感的な「知覚としての力」を再現する装置の2種類に分けることができる。

前者の力触覚提示装置では、接地した装置からの外力によって、大きな力を再現可能で、正確な力触覚をユーザに提示している。SPIDAR[2]は外部に設置されたモータによって、指に装着したワイヤを巻き取ることにより、力触覚提示を行っている。一方で、身体に装着することで、ユーザに力触覚提示を可能にする装置も数多く提案されている。CyberGrasp[3]は装着型の外骨格デバイスで、手と指先に取り付けられたワイヤの牽引力により力触覚提示を行っている。また、身体に装着しない保持型の力触覚デバイスも数多く提案されている。ElaStick[4]はVRコントローラの先に、モータで剛体に取り付けられた4つのワイヤの巻き取り比率を制御することで、重さや質量の動き、様々な弾性を再現している。Aero-plane[5]は棒状に拡張したVRコントローラの両端に2基のプロペラを取り付け、プロペラの回転制御を行うことで、仮想物体の平面上の移動や重量を再現している。後者の力触覚提示装置では、大型で高価という従来の力覚提示装置の課題を解決するため、近年では擬似触覚を用いて、「知覚としての力」を提示する手法も数多く提案されている。視覚刺激による錯覚を提示することによって、ユーザに力触覚を生起させるPseudo-Hapticsという現象が報告されている。暦本ら[6]は人の知覚の非線形性を利用し、振動子を保持した際に偏加速度を提示することで牽引力を提示する手法を提案している。Majaedら[7]はモノを持ち上げる動作に対して、現実の動きとVR空間内の動きに違いを作ることによって、ユーザに重量の変化を知覚させる手法を提案している。これらの力覚提示装置は「接地型」「非接地型」に分けることができる。「接地型」は、質の高い力覚を提示することは可能であるが、装置のサイズ自体が大きくなってしまい、ユーザの移動や行動に制限を与えてしまうという問題がある。一方、「非接地型」はユーザは装着したまま移動できるため、ウェアラブルデバイスとして利用することも可能である。しかし、非接地型では、作用・反作用の法則により、目的とは違う場所に力が生じる可能性が高く、十分に強い力を生成することが難しいという問題がある[8]。そこで本研究では、接地型ではあるが、装置から離れた場所に十分な力を生成することができ、ユーザの行動に制限を与えない力覚提示手法として、磁力を採用している。

2.2 仮想物体のプレゼンス強化に関する研究

青木ら[9]は、仮想アバタが現実空間内にある実物体をあ

たかも移動させているかのように再現することで、仮想アバタの存在感を向上させる手法を提案している。森ら[10]は、磁力によって、仮想アバタの「蹴る」といった動作に合わせて、現実空間上の実物体を磁力を用いて移動させることで、あたかも仮想アバタが現実世界に干渉しているかのようなARシステムを開発している。鶴重ら[11]は身体や実物体に直接永久磁石を貼り付け、環境に埋め込まれた電磁石を駆動し任意の波形振動を提示することで、触覚提示を行い、仮想物体の接触感を再現している。木村ら[12]は電磁石により永久磁石との間に発生する斥力を制御することで、3Dディスプレイで表示される空中映像に対して力触覚提示を行うことで、3Dアバタとのインタラクションを実現している。

本研究では、重さに焦点を当て、磁力の引力を用いて仮想物体へ重量感提示を行うことで、仮想物体のプレゼンスを向上させる手法を検討する。

3. 磁力制御による重量感提示手法

3.1 システム概要

本システムでは、永久磁石を取り付けたリニアアクチュエータを制御することで、距離による磁力の強さの制御を実現した。また、本システムでは、ユーザが手に持っているコップに直接作用するようなARコンテンツを作成した。このとき、ユーザが持つコップの底に永久磁石を取り付け、ARコンテンツに合わせて、リニアアクチュエータの同期制御を行うことで、「コップの底に取り付けている永久磁石」と「アクチュエータ側に取り付けている永久磁石」によって発生する磁力の引力により、ARコンテンツに対して重量感提示を行うことが可能である。本システムでは、ARオブジェクトに対して、重量感提示を行うことで、「実際にそこに存在している」というような感覚を向上させる。

3.2 システム構成

本システムのシステム構成を図1に示す。Unityで実行されるARコンテンツに合わせて、Arduino Uno ヘシリアル通信を行い、リニアアクチュエータの制御を行う。このとき、ユーザが持つコップの底に永久磁石を貼り付け、下方からアクチュエータに取り付けられた永久磁石を近づけることでコップに対して重量感提示を行っている。また、ARコンテンツ自体はVuforiaで作成し、コップにARマーカを連結し、コップの位置と回転の値を取得して、仮想オブジェクトを重畳している。

3.3 システムに使用する機材

- 本システムに使用した機材について述べる。
- アクチュエータに取り付けた永久磁石

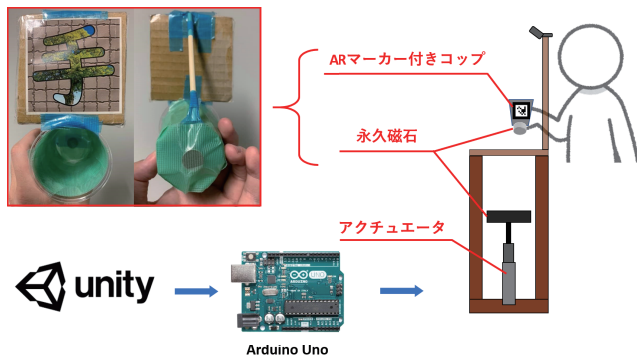


図 1 システム構成

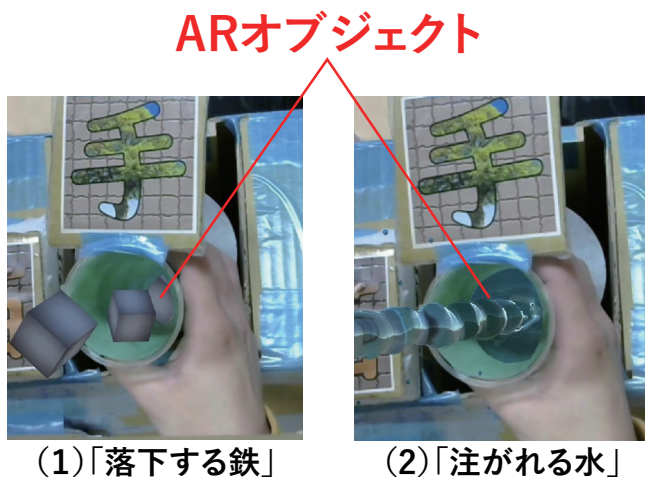


図 2 作成した AR コンテンツ

$\Phi 120 \times 20\text{mm}$, 表面磁束密度が 620 ガウスのフェライト磁石を使用した。

- コップに取り付けた永久磁石
 $\Phi 15 \times 5\text{mm}$, 表面磁束密度が 3500 ガウスのネオジウム磁石を使用した。
- リニアアクチュエータ
本システムでは, Actuonix L16 を使用している. このリニアアクチュエータの最大ストロークは 140mm で, また Arduino の Servo ライブラリを用いて, Servo 値範囲: [40-140] でストローク範囲: [0-140mm] の制御可能である。

3.4 AR コンテンツの種類

本システムで作成した AR コンテンツを図 2 に示す. AR コンテンツの種類として, 「離散的に重量が増加 (図 2(1): 落下する鉄)」「連続的に重量が増加 (図 2(2): 注がれる水)」する 2 つのパターンを作成した. 今回作成した AR コンテンツは, あたかも現実のコップの中に入っているような視覚表現を実現している.

- (1) 離散的に重量が増加するパターン
コップの中に鉄片が落ちてくるような一定間隔で重さが増加するようなコンテンツになっている. 3 つの鉄

片が落下し, コップの中に積みあがっていくような表現を実現している.

- (2) 連続的に重量が変化するパターン
コップの中に水が注がれるような一定速度で重さが増加するようなコンテンツになっている. 水が注がれ, コップの中に溜まっていくような表現を実現している.

3.5 位置トラッキング機能

本システムでは, AR コンテンツが現実のコップに対して作用するようにするため, コップに AR マーカを取り付け, コップの位置と回転の値を取得している. 取得したパラメータを, コップを模した透明な仮想オブジェクトに適用し, 現実のコップに重畳している. これにより, AR コンテンツがコップの中に対して, 直接作用するような表現を実現している.

3.6 リニアアクチュエータ制御機能

本システムでは, 永久磁石が取り付けられたリニアアクチュエータを制御することで, 磁力制御を行っている. また, 本システムで使用しているリニアアクチュエータは Arduino の Servo ライブラリで制御可能で, Servo 値範囲: [80-120] で制御している. また, 2 種類の AR コンテンツに合わせて, リニアアクチュエータの制御パターンを 2 つ作成した.

- (1) 離散的に変化するパターン
落下する鉄片の AR コンテンツ (図 2(1)) に合わせて, Servo 値 [80-120] の範囲で, 段階的にリニアアクチュエータを一定間隔で可動するように調整を行った.
- (2) 連続的に変化するパターン
注がれる水の AR コンテンツ (図 2(2)) に合わせて, Servo 値 [80-120] の範囲で, リニアアクチュエータを一定速度で可動させるように調整を行った.

4. 性能評価実験と考察

4.1 実験の概要

プロトタイプシステムにおける「リニアアクチュエータの制御パラメータである Servo 値」と「再現可能な磁力・重量」の関係性を調査するために, 各 Servo 値における「磁力」と「再現重量」の測定を行った. 本実験に用いた測定システムの構成を図 4 に示す. 磁力計測 (図 4 左) では, システムの上部 (図 4 破線) に磁気センサを取り付け, リニアアクチュエータの Servo 値を変動させ, 下方から永久磁石を近づけていくことによって, 距離による磁力変化を測定している. 同様に, 再現重量測定 (図 4 右) でもシステムの上部 (図 4 破線) に重量センサに永久磁石が取り付けられたコップを連結し, リニアアクチュエータの Servo 値

を変動させ、下方から永久磁石を近づけていくことによって、コップに発生する重量を測定している。

4.2 測定に使用したセンサ

(1) 磁気センサ

本実験の磁力測定には「A1324LUA-T」を使用した。この磁気センサは電源 5 V で可動し、出力基準電圧：2.5V である。また感度は 5mV/G であり、S 極と N 極を識別可能である。

(2) 重量センサ

本実験の再現重量測定には「SC133 20kg」を使用した。この重量センサはロードセルで、物を乗せたときのひずみによって、発生する電圧を重量に変換し、測定している。また、今回使用した重量センサ自体の計測誤差範囲は ± 1g である。

4.3 測定条件

本測定では、ユーザが実際にコップを支える位置に各センサを配置している。また、各 Servo 値において 30 秒間計測を行い、平均値を算出した。このとき、再現重量測定では Servo 値：60 を基準に Servo 値を変動させ、変動した重量を測定している。

4.4 測定結果

本実験の測定結果を図 3 に示す。左図が Servo 値と磁力の関係（図 3(1)）、右図が Servo 値と再現重量の関係（図 3(2)）を示している。Servo 値を増加させていくにつれて、磁力・再現重量ともに 2 次関数的に増加していることが分かった。また、測定した再現重量において、Servo 値：80 の時に約 10g の重さが重量センサに発生し始め、Servo 値：120 の時に約 310g の重さが重量センサに発生していることが分かった。このことから、本システムで使用する Servo 値範囲を【80-120】でリニアアクチュエータが可動するように調整を行った。

5. 重量感提示による仮想物体の存在感への影響の検証

5.1 実験の概要

重量感提示が仮想物体のプレゼンスに与える影響の検証を行った。また、重量感提示による効果を検証するため、比較実験を実施し、比較対象として、「視覚映像+重量感提示」「視覚映像+振動提示」「視覚映像のみ」の 3 つを用意した。実験協力者には、「離散的に重量が増加するパターン」「連続的に重量が増加するパターン」の 2 種類の AR コンテンツ（図 2）を体験してもらった。実験協力者は和歌山大学の 21 歳～25 歳までの学生 11 名である。このとき、「男性・右利き」という制限条件を設けた。実験時の様子

を図 5 に示す。

実験協力者はシステム上部でコップを保持し、AR コンテンツを体験してもらった（図 5(1)）。このとき、実験協力者は耳栓をして、その上からヘッドホン装着してもらい、ホワイトノイズを再生することで、聴覚情報を除去した*4（図 5(2)）。また、実験協力者とシステムの間にはスクリーンを設置し、システム内部を遮蔽することで、モニターを通して、AR コンテンツ映像だけを見てもらうようにした（図 5(3)）。本実験では、比較条件で力触覚提示条件の場合では、実験協力者に各 AR コンテンツを体験してもらいながら、「感じた力」や「知覚したコップの中の量」を利き腕ではない方の手で再現してもらった（図 5(4)）。

5.2 実験手順

(1) AR コンテンツの体験

AR コンテンツを 2 種類において、「視覚映像+重量感提示」「視覚映像+振動提示」「視覚映像のみ」の 3 つの比較条件を体験する。このとき、条件ごとに 3 回繰り返し体験してもらい、最初の 1 回は練習とした。また、力触覚提示条件の場合に利き手ではない方の手で「感じた力」「知覚したコップの中の量」を再現してもらった。

(2) アンケートに回答

実験協力者に各コンテンツ、条件ごとにアンケートを実施し、このアンケートには 5 段階のリッカート尺度による評価と記述式を用いた。評価項目は以下の通りである。

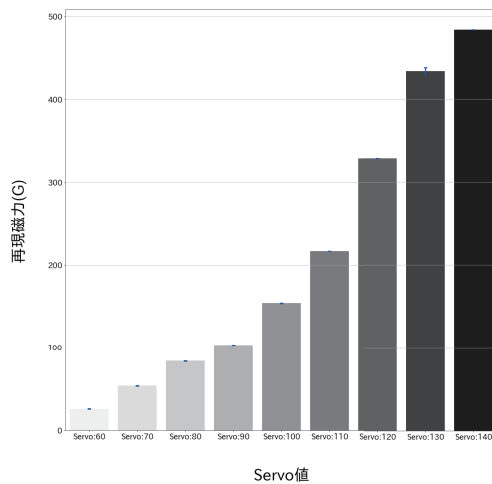
- コップの中の AR オブジェクトの存在感
- コップに作用する AR コンテンツの臨場感
- 知覚した AR コンテンツの重量感

また最後に、体験してもらった 3 つの条件に対して、AR コンテンツの「存在感」「臨場感」に関する順位付けアンケートを実施した。順位付けアンケートは 3 つの条件の順位付けと自由記述を用いた。合計点は実験協力者による順位付けを 1 位：3 点、2 位：2 点、3 位：1 点として換算した合計である。実験協力者は 11 名のため、合計点数の最高得点は 33 点、最低得点は 11 点である。合計得点を比較して点数の高い条件から順位をつけている。本実験では、存在感、臨場感について、以下のように定義している。

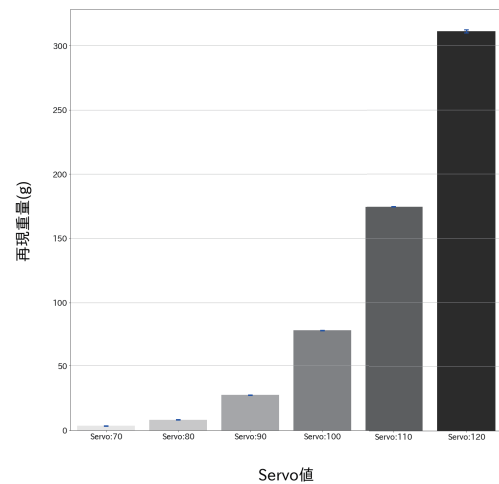
存在感：主にモノが対象で、実際に仮想物体がそこにあるかのように感じる事。

臨場感：主に行為が対象で、実際にある事象が起こっているように感じる事。

*4 リニアアクチュエータの可動音が実験結果に影響を及ぼす可能性があるため、本実験では聴覚情報を取り除いた。



(1) Servo 値と磁力の関係



(2) Servo 値と再現重量の関係

図 3 測定結果

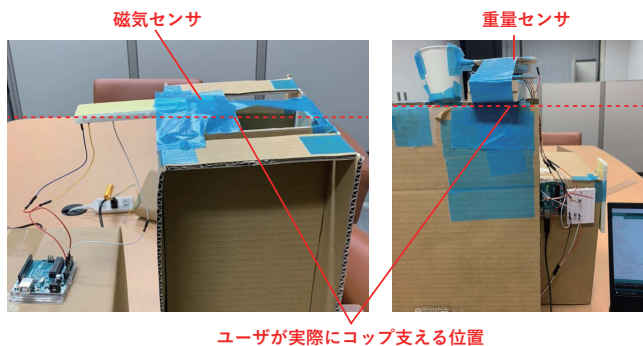


図 4 測定システム構成

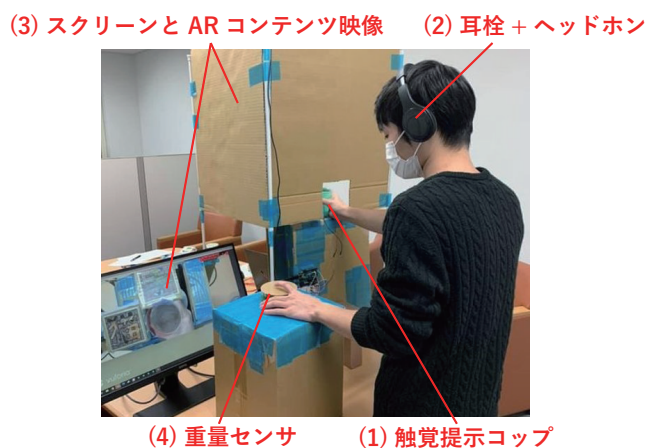


図 5 実験風景

5.3 実験仮説

本実験では、「重量感提示が仮想物体の存在感を向上させる」、特に「振動条件よりも仮想物体の存在感が向上する」「振動条件よりも知覚重量が増加する」という仮説を立てて、検証を行った。

6. 実験結果と考察

6.1 存在感への影響の検証

重量が連続的に増加するパターンでは、「実際に液体が溜まっているように感じた」「注がれた液体が実物のように感じた」という質問項目を用意した (表 1(1)). 結果は、重量感提示条件が他の条件に比べてスコアが高く、前者の質問項目では有意差がみられた ($p=0.01<0.05$). 自由記述により、重量感提示条件で「本当にコップの中に水が入っているように感じた」という意見がみられた。

重量が離散的に増加するパターンでは、「実際に固形物が積みあがっていくように感じた」「落ちてきた固形物が実物のように感じた」という質問項目を用意した (表 1(2)). 結果は、重量感提示条件は視覚のみと比べるとスコアは高くなっていたが、振動条件と比べるとスコアにあまり差がなく、有意差もみられなかった ($p=0.0578>0.05$). 自由記述により、重量感提示条件において、「落ちてくるオブジェクトの数に合わせて、重さが増加し、積みあがっていく感じがした」という意見がみられた。

表 2(3)(4) に AR コンテンツの存在感に関する順位付けアンケート結果を示す。「重量が連続的に増加するパターン」「重量が離散的に増加するパターン」ともに、1 位が「重量感提示条件」であった。合計点数が 32 点で、11 人中 10 人が 1 番存在感を感じる条件だと回答した。自由記述により、「重量条件ではコップを揺らした時の感覚と水の動き、質量感に現実味があった」という意見が得られた。

以上の結果から、「重量感提示条件」が他の条件よりも仮想物体の存在感を向上させることが分かった。

6.2 臨場感への影響の検証

重量が連続的に増加するパターンでは、「実際に液体がコップの中に注がれているように感じた」という質問項目を

表 1 存在感・臨場感に関するアンケート結果

| | コンテンツの種類 | 質問項目 | 比較条件 | 評価の分布 | | | | | 中央値 | 最頻値 | 有意確率* |
|-----|---------------------|-----------------------|------|-------|---|---|---|-----|-----|----------|----------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| (1) | 重量が連続的に増加するパターン | 実際に液体が溜まっているように感じた | 視覚のみ | 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.0046** |
| | | | 振動条件 | 1 | 5 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.01** |
| | | | 重量提示 | 0 | 0 | 1 | 5 | 5 | 4 | 4,5 | |
| | | 注がれた液体が実物のように感じた | 視覚のみ | 6 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.06 |
| | | | 振動条件 | 2 | 5 | 0 | 3 | 1 | 2 | 2 | 0.107 |
| | | | 重量提示 | 0 | 2 | 3 | 5 | 1 | 3 | 4 | |
| | 実際に液体が注がれているように感じた. | 視覚のみ | 5 | 4 | 0 | 1 | 1 | 1.5 | 1 | 0.0045** | |
| | | 振動条件 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 | 0.012** | |
| | | 重量提示 | 0 | 0 | 0 | 8 | 3 | 4 | 4 | | |
| (2) | 重量が離散的に増加するパターン | 実際に固形物が積み上がっていくように感じた | 視覚のみ | 4 | 5 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0.0066** |
| | | | 振動条件 | 0 | 2 | 3 | 6 | 0 | 3.5 | 4 | 0.0578 |
| | | | 重量提示 | 0 | 0 | 3 | 6 | 2 | 4 | 4 | |
| | | 落ちてきた固形物が実物のように感じた | 視覚のみ | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.0066** |
| | | | 振動条件 | 0 | 4 | 3 | 4 | 0 | 3 | 2,4 | 0.739 |
| | | | 重量提示 | 1 | 2 | 3 | 5 | 0 | 3.5 | 4 | |
| | | 実際に固形物が落ちてくるように感じた | 視覚のみ | 4 | 6 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0.0047** |
| | | | 振動条件 | 0 | 2 | 2 | 6 | 1 | 4 | 4 | 0.669 |
| | | | 重量提示 | 0 | 1 | 4 | 3 | 3 | 3.5 | 3 | |

・評価項目： 1: 強く同意しない, 2: 同意しない, 3: どちらともいえない, 4: 同意する, 5: 強く同意する
 ・*: 有意確率に, ウィルコクソンの符号順位検定を使用し, 検定は重量感提示条件と各条件の間で行った.
 ・**: 有意差あり p<0.05

表 2 存在感・臨場感に関する順位付けアンケート結果

| | コンテンツの種類 | 質問項目 | 比較条件 | 合計点* |
|-----|-----------------|-----------------|------|------|
| (3) | 重量が連続的に増加するパターン | コップの中の液体の存在感 | 視覚のみ | 13 点 |
| | | | 振動条件 | 21 点 |
| | | | 重量提示 | 32 点 |
| | | 液体が注がれているときの臨場感 | 視覚のみ | 12 点 |
| | | | 振動条件 | 23 点 |
| | | | 重量提示 | 31 点 |
| (4) | 重量が離散的に増加するパターン | コップの中の固形物の存在感 | 視覚のみ | 13 点 |
| | | | 振動条件 | 21 点 |
| | | | 重量提示 | 32 点 |
| | | 固形物が落ちてくるときの臨場感 | 視覚のみ | 12 点 |
| | | | 振動条件 | 25 点 |
| | | | 重量提示 | 29 点 |

順位は実験協力者の順位付けの結果である。3つの表示方法を1位から3位まで順位付けしている。
 *: 合計点は実験協力者による順位付けを1位:3点, 2位:2点, 3位:1点として換算した合計得点である。

用意した(表1(1)). 結果は, 重量感提示条件が振動条件に比べてスコアが高く, 有意差がみられた (p=0.012<0.05). 自由記述により, 重量感提示条件で「液体が注がれると共に重量が変化し, コップの中身が増えていく感じがした」という意見がみられた.

重量が離散的に増加するパターンでは, 「実際に固形物がコップの中に落ちてくるように感じた」という質問項目を用意した(表1(2)). 結果は, 重量感提示条件は視覚のみと比べるとスコアは高くなっていったが, 振動条件と比べるとスコアにあまり差がなく, 有意差もみられなかった (p=0.669 >0.05). 自由記述により, 重量感提示条件にお

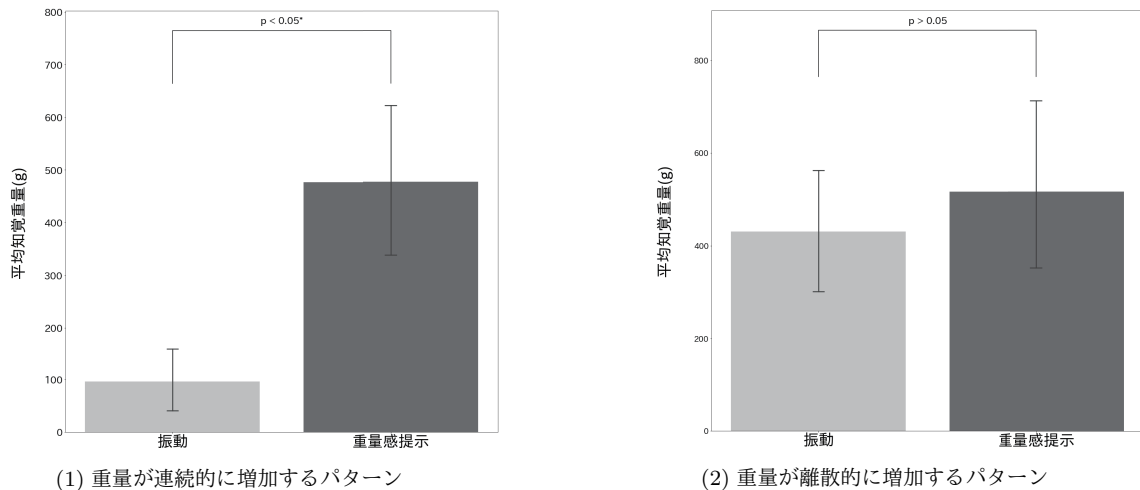
いて, 「コップの中に固形物が落ちてくる感覚は感じなかった」という意見がみられた.

表2(3)(4)にARコンテンツの臨場感に関する順位付けアンケート結果を示す. 「重量が連続的に増加するパターン」「重量が離散的に増加するパターン」とともに, 1位が「重量感提示条件」であった. 「重量が連続的に増加するパターン」では「重量感提示条件」の合計点数が31点で, 11人中9人が1番臨場感を感じる条件だと回答した. 自由記述により, 「重量感提示条件の方が圧倒的に臨場感を感じた。」という意見が得られた. また「重量が離散的に増加するパターン」では, 「重量感提示条件」の合計得点が29点

表 3 知覚重量に関するアンケート結果

| | 質問項目 | コンテンツの種類 | 比較条件 | 評価の分布 | | | | | 中央値 | 最頻値 | 有意確率* |
|-----|--------------------------|-----------------|------|-------|---|---|---|---|-----|-----|------------------------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| (5) | コップの中にどれくらいの量が入っていると感じたか | 重量が連続的に増加するパターン | 振動条件 | 2 | 6 | 0 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0.3 (11人中7人が増加) |
| | | | 重量提示 | 0 | 5 | 2 | 3 | 1 | 2.5 | 2 | |
| | | 重量が離散的に増加するパターン | 振動条件 | 2 | 6 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0.018** (11人中8人が増加) |
| | | | 重量提示 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2,4 | |

- ・前提条件：コップが満杯の場合を 215ml (215g) とする。
- ・評価項目： 1：強く同意しない， 2：同意しない， 3：どちらともいえない， 4：同意する， 5：強く同意する
- ・*：有意確率には，ウィルコクソンの符号順位和検定を使用。
- ・**：有意差あり $p < 0.05$



- ・*：有意差あり $p < 0.05$
- ・有意確率には，ウィルコクソンの符号順位和検定を使用。

図 6 重量センサから得られた知覚重量の結果

で，11人中7人がもっとも臨場感を感じる条件だと回答した。自由記述により，重量感提示条件において，「固形物が落ちてくる感覚は感じなかった」というコメントがみられた。

以上の結果から，「重量が連続的に増加するパターン」「重量が離散的に増加するパターン」の2種類のARコンテンツの間で実験協力者の臨場感の感じ方に少し違いがあることが分かった。このような結果になった要因として，「重量が離散的に増加するパターン」において，「落ちてくる衝撃のようなものが感じられた」「今コップの中に入ったという感覚があった」という被験者のコメントがみられたことから，重量感提示だけでは，仮想物体の接触感を再現することが困難である可能性が考えられる。

6.3 知覚重量の増加の検証

知覚重量に関するアンケート結果を表3に示す。「重量が連続的に増加するパターン」では，回答した重量が「振動条件」に比べ，「重量感提示条件」が増加していた実験協力者は11人中7人で有意差はみられなかった ($p=0.3 > 0.05$)。「重量が離散的に増加するパターン」では，回答した重量が「振動条件」に比べ，「重量感提示条件」の方が増加

していた実験協力者は11人中8人で有意差がみられた ($p=0.018 < 0.05$)。

重量センサから得られたログを分析した結果を図3に示す。ログデータの結果は，1名のデータが取得できなかったため，10名のデータを用いて分析を行った。「重量が連続的に増加するパターン」では，再現重量が「振動条件」に比べ，「重量感提示条件」の方が増加していた実験協力者は10人中9人で有意差がみられた ($p=0.0093 < 0.05$)。「重量が離散的に増加するパターン」では，再現重量が「振動条件」に比べ，「重量感提示条件」で増加していた実験協力者は10人中5人で有意差はみられなかった ($p=0.72 > 0.05$)。

実験の結果，「重量が連続的に増加するパターン」では，ほとんどの実験協力者の知覚重量は「振動条件」に比べて，「重量感提示条件」において増加傾向にあった。しかし，「重量が離散的に増加するパターン」では，アンケート結果に関しては，ほとんどの実験協力者が「振動条件」に比べて，「重量感提示条件」において増加と回答したが，重量センサから得られたログを分析した結果では，「振動条件」と「重量感提示条件」の間に有意差がみられず，知覚重量が増加した実験協力者の数も減少していたことが分かった。この結果の要因として，6.2節でも述べた通り，「重量が離散的

に増加するパターン」において、振動提示条件では、ユーザが AR コンテンツに接触感を強く感じている可能性が高く、この結果が知覚重量に影響していると考えられる。

7. おわりに

本研究では、AR コンテンツに対して、磁力による重量感提示を行うプロトタイプシステムを開発した。AR コンテンツは重量が「離散的に増加するパターン」と「連続的に増加するパターン」の 2 種類を作成した。実験では、2 種類の AR コンテンツにおいて、「視覚映像+重量感提示」「視覚映像+振動提示」「視覚映像のみ」の 3 条件で比較実験を行い、重量感提示が仮想物体のプレゼンスに与える影響を検証し、以下を明らかにした。

- (1) 「存在感」の検証の結果、重量感提示条件が他の条件に比べて、AR コンテンツの存在感を向上させていることが分かった。
- (2) 「臨場感」の検証の結果、重量感提示条件が他の条件に比べて、AR コンテンツの臨場感を向上させていることが分かった。しかし、重量が「連続的に増加するパターン」に比べて、「離散的に増加するパターン」の方が順位付けのアンケート結果の重量感提示条件と振動提示条件のスコアが近くなっていることが分かった。現状では、「重量が離散的に増加するパターン」において、「落ちてくる衝撃のようなものが感じられた」「今コップの中に入ったという感覚があった」という被験者のコメントがみられたことから、重量感提示だけでは、仮想物体の接触感を再現することが困難であり、臨場感に影響を与えていた可能性が高いと考えている。
- (3) 「知覚重量」の検証の結果、重量感提示条件が振動条件に比べて、ほとんどの実験協力者の知覚重量が増加していることが分かった。しかし、重量センサから得られたログを分析した結果、重量が「連続的に増加するパターン」では知覚重量が増加していることが確認できたが、「離散的に増加するパターン」では知覚重量の増加を確認することができなかった。現状では、接触感の感じ方の違いが知覚重量に影響を与えている可能性が高いと考えている。

実験の結果、重量感提示が振動提示よりも仮想物体の存在感を向上させることが分かった。

現状では、人とモノ（仮想物体）とのインタラクションを想定したシステム開発を行ったが、仮想物体には、遠隔地の空間情報・人の点群情報なども含まれるため、今後は、人と人（遠隔地にいる人）とのインタラクションを想定し、対話相手のテレプレゼンスの向上させるシステムの開発を目指す。

参考文献

- [1] 総務省：令和元年版情報通信白書，<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/pdf/02honpen.pdf> (2020).
- [2] 佐藤誠，平田幸広，河原田人弘：空間インタフェース装置 SPIDAR の提案，電子情報通信学会論文誌，D-II J74-D-II(7)，pp.887-894 (1991).
- [3] Georgios Nikolakis, Dimitrios Tzovaras, Serafeim Moustakidis, Michael G Strintzis : CyberGrasp and PHANTOM Integration: Enhanced Haptic Access for Visually Impaired Users, In 9th Conference Speech and Computer, pp.1-7 (2004).
- [4] Neung Ryu, Woojin Lee, Jin Kim, Andrea Bianchi : ElasticStick: A Handheld Variable Stiffness Display for Rendering Dynamic Haptic Response of Flexible Object, UIST'20:Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.1035-1045 (2020).
- [5] Seungwoo je, Myung Jim Kim, Woojin Lee, Byungjoo Lee, Xing-Dong Yang, Pedro Lopes, Andrea Bianchi : Aero-plane: A Handheld Force-Feedback Device that Renders Weight Motion Illusion on a Virtual 2D Plane, UIST'19:Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.763-775 (2019).
- [6] Jun Rekimoto : Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation, UIST'13:Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.427-432 (2013).
- [7] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, Cesare Parise : Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio, CHI'19:Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Paper No.20, pp.1-13 (2019).
- [8] 梶本裕之：触覚・力覚ディスプレイ，日本知能情報フレンジ学会誌，Vol.19，No.4，pp.326-332 (2007).
- [9] 青木孝文，三武裕玄，浅野一行，栗山貴嗣，遠山喬，長谷川晶一，佐藤誠：実世界で存在感を持つバーチャルリーチャーの実現，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.11，No.2，pp.313-321 (2006).
- [10] 森友己，高井昌彰，飯田勝吉：実世界へ干渉可能な仮想キャラクタとのインタラクションを実現する AR システム，情報処理学会第 82 回全国大会講演論文集，Vol.2020，No.1，pp.563-564 (2020).
- [11] 鶴重誠，ロシヤン・ペイリス，南澤孝太：永久磁石の貼り付けによる振動触覚提示システムの検討，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，3A-04，pp.1-2 (2019).
- [12] 木村真治，壺井雅史，堀越力：モバイル向け力覚提示 3D ディスプレイシステムの開発，情報処理学会，Vol.55，No.4，pp.1325-1333 (2014).