

動的に変化する複合現実型視覚刺激が 重さ知覚に与える影響

佐野 洋平^{*1*2} 橋口 哲志^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Psychophysical Influence on Sense of Weight by Visual Superimposition of Moving Objects

Yohei Sano^{*1*2}, Satoshi Hashiguchi^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Asako Kimura^{*1}

Abstract --- When humans sense the weight of real objects, their perception is known to be influenced by not only tactile information but also visual information. In a Mixed-Reality (MR) environment, the appearance of touchable objects can be changed by superimposing a computer-generated image (CGI) onto them (MR visual stimulation). In this paper, we studied the psychophysical influence on the sense of weight by using a real object that has a CGI superimposed on it. In the experiments, we show CGI representing the inertial force caused by the objects placed inside, while the subject swings the real object. The results of the experiments show that the subjects sensed weight differently when being shown the CGI animation.

Keywords: Mixed Reality, Sense of Weight, Visual Stimulation, Psychophysical Influence

1. はじめに

人間の五感を独立に扱うのではなく、複数の感覚提示技術を組み合わせることで、再現の難しい感覚をうまく補完し提示する研究や、複数の感覚が相互に作用することで起こる錯覚に関する研究が注目を集めている [1]. 例えば、Pseudo-Haptics は、視覚・触力覚間での感覚相互作用の顕著な現象で、身体動作とそれを反映した視覚刺激の間に齟齬が生じた場合、擬似的な触力覚が生起されるという錯覚現象である [2]. このように、各感覚モダリティ間に敢えて差異を作り出すことで、複数の知覚が互いに影響を及ぼし、独立の感覚では起こりえない錯覚現象が生じる場合がある。

我々の研究グループでは、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術を利用した視覚・触覚の相互作用・補完作用について研究を行ってきた [3-7]. 現実世界と仮想世界を実時間で組み合わせることができる MR 技術を利用することで、例えば現実世界で起こっている現象に CG 映像を重畳描画し、視覚と触力覚感覚の間に意図的に差異を作り出すことが可能となる。我々は、これまで、このような視覚刺激 (以下、MR 型視覚刺激) が触力覚にどのような影響を与えるのかについて、系統的に実験、分析を行

ってきた。その中で、実物体と重心位置の異なる MR 型視覚刺激を提示することで重心位置を錯覚する “Shape-COG Illusion” [5][6] や、実物体と異なる硬さの MR 型視覚刺激を提示することで硬さを錯覚する “Dent-Softness Illusion” [7] など、様々な錯覚現象の発見とそれらに関する多くの客観的知見を得た。

この内 Shape-COG Illusion に関する研究では、これまで対象とする実物体を剛体としていた。しかし、研究を行う過程で、実物体およびその内部が可動の場合や、MR 型視覚刺激により実物体内部に可動部を有する CG アニメーションを提示した場合に、どのように知覚されるのかという疑問が生まれた。

そこで本研究では、まず剛体の実物体に対し、物体内部の動的変化 (以下、内部ダイナミクス) を想起させる仮想物体を重畳描画することで、視覚、触力覚にどのような影響を及ぼすのか、予備実験を行った。この際、重心位置の変化、重さなどへの影響を確認した結果、重心位置と比べ、物体の重さ知覚に顕著な影響が見られた。このような実物体 (R) と仮想物体 (V) の異なる運動状態が、力覚を通して実物体の運動知覚に及ぼす影響を “R-V Dynamics Illusion” と命名した。本論文では、上記予備実験の内容について説明するとともに、本錯覚現象に影響する MR 型視覚刺激の要因を検証するため、視覚刺激として提示する物体内部の可動部の容量や運動状態を変更した際の影響を明らかにする。

*1 立命館大学大学院情報理工学研究所

*2 現在、トヨタ自動車株式会社

*1 Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

*2 Toyota Motor Corporation

2. 関連研究

ヒトは、ダイナミックタッチと呼ばれる筋感覚を含む運動性触覚により、物体の大きさ、形状、重さ、動きといった情報を、視覚だけでなく力覚的にも知覚することができる [8]。またその物体が剛体ではなく、変形する場合でも、その変形をおおよそ理解することができる。しかし、実物体と異なる運動状態を MR 型視覚刺激として重畳描画した場合、視覚・力覚間で内部ダイナミクスが一致するとは限らない。そこで、実際に体感する実物体の運動状態と視覚から想起する運動状態との差異に違和感をもち、錯覚現象が生じる可能性がある。

視覚・触力覚感覚の相互作用による錯覚現象としては、前述した Pseudo-Haptics [2] や大きさ重さ錯覚 (Size-Weight Illusion) [9] が知られている。Pseudo-Haptics は、視覚刺激のみを操作することで、物理的な触力覚提示装置がなくても、力触覚を提示することができる錯覚現象で、物体の硬さ、表面テクスチャ、粘性、凹凸等を提示することができる [2][10-13]。この現象は、視覚情報のみを操作することにより、力覚を知覚するという点で、本研究と密接に関係していると考えられる。

Size-Weight Illusion は、同一質量の物体がその容積の大小に応じて、異なる重さを感じられる現象である。この錯覚現象は視覚情報が無くても生じるが、視覚刺激があるときの方が顕著な効果を示すことがわかっている [14]。Rock ら [15] は、被験者が手に持ったキューブのサイズを拡大鏡で視覚的に変更することでも、大きく見えたキューブの重さを軽く感じることを示している。その他に、物体の色が、重量知覚に影響を与えるという現象も知られている [16-18]。本研究も、重さ知覚の錯覚を扱うが、実物体には手を加えず、物体内部の動的変化を実物体に視覚的に重畳描画するだけで、重さ知覚が変化するという現象は知られていない。

一方、視覚・触力覚感覚の相互作用や補完特性を利用することで、物体内部の触力覚的な変動を、簡便な装置でリアリティ高く提示する手法が提案されている [19-23]。例えば、南澤ら [19] は、物体内部の動的変化に着目し、仮想物体の質量や内部ダイナミクスを力覚提示装置により提示する手法について提案している。これに対して、本研究では、内部ダイナミクスを視覚情報でのみ変化させた場合に、ヒトの知覚にどのような変化が起こるのかを確認する。

MR 型視覚刺激による力触覚への影響を検討した研究は我々の先行研究 [3-7] 以外にも既にいくつか行われている。例えば、中原ら [24] は MR 技術と HMD を用い、実物体に角ばった仮想物体や丸

みを帯びた仮想物体を重畳描画することで物体の知覚の改変を行うことができると報告している。また、鳴海ら [25] は実物体に重畳描画する CG 画像の色が重さ知覚に影響することを明らかにしている。しかし、MR 型視覚刺激が触覚へ及ぼす影響に関する研究のほとんどは、物体のテクスチャや外観など静的な視覚情報を対象としている。

我々は、把持物体の動きに応じて MR 型視覚刺激を動的に変化させた場合、即ち、実物体と重畳描画する CG 映像間で異なる運動状態を提示することで、ヒトの力触覚知覚にどのような影響を与えるか明らかにすることを目指している。実物体が剛体でなく、動的に変化する物体である場合や、物体内部が液体ではなく、固形物である場合など、様々な条件が考えられるが、全ての条件を網羅することは難しく、条件を整理し、基礎的な実験を系統的に行い、客観的知見を積み上げていく必要がある。

まずは視覚による影響から確認するために、本論文では力触覚部分の条件を単純な剛体とし、視覚 (MR 型視覚刺激) のみで物体内部の運動状態を変化させるという条件から着手した。即ち、本論文では、物体内部の運動状態を視覚でのみ提示することで、ヒトの力触覚知覚に影響を及ぼすか確認することを目的とする。

3. 実験目的と準備

3.1 実験目的

R-V Dynamics Illusion の発生と傾向の確認を目的として、動的に変化する MR 型視覚刺激が触力覚に与える影響について実験を行う。具体的には、実物体を把手付の剛体、MR 型視覚刺激を実物体と同形状の容器の中に液体が入った CG 映像とする。

まず予備実験では、実物体に対して、物体内の液体の揺れを想起させるような MR 型視覚刺激を重畳描画し、揺れがある場合とない場合で知覚される重さが異なるのかを検証する。更に、実験 1 では、提示する仮想物体内部の可動物の容量を変更した際の知覚への影響を、実験 2 では運動状態を構成する要素を変更した際にどのような傾向がみられるか確認する。

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いる MR システムの構成を図 1 に、実験風景を図 2 に示す。実験で使用するシステムは、ビデオスルー型 HMD (Canon, VH-2002) および MR Platform System である。体験者の頭部及び実物体の位置姿勢情報は磁気センサ (POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK) から取得する。また体験者が

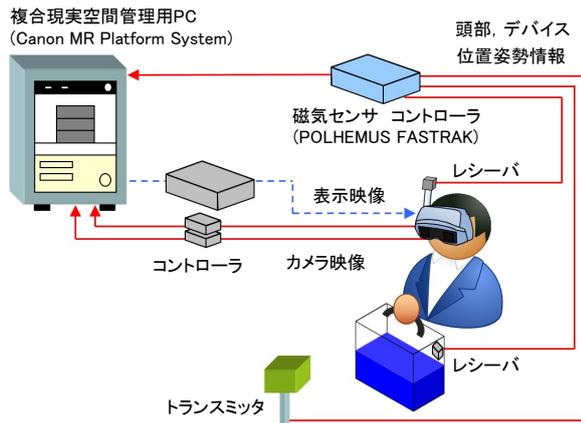


図 1 システム構成

Fig.1 System Configuration

MR 空間を観察する際、HMD のカメラキャプチャ画像に対して手領域の抽出を行い、その領域をマスキングすることで、手領域に CG が重畳描画されないようにする。

実験中の筋電位を計測するために、体験者は前腕に電極を装着する。筋電位の計測には、表面筋電計 (ATR-Promotions, TS-EMG01) を使用する。

【使用する実物体】

体験者が把持する実物体として、把手を取り付けた幅 165×奥行 80×高さ 90 mm のアクリルケースを用いる。また、ケースに錘を封入することで、このアクリルケースに高さ 45mm まで水を封入した際の重さ (750g) と同じ重量になるよう調整している (図 3)。

【MR 型視覚刺激】

MR 型視覚刺激として提示する仮想の容器の寸法は、実物体同様、幅 165×奥行 80×高さ 90 mm とした。実験で用いる仮想容器内の液体量は、液面の位置が容器の高さの半分 45mm となる場合を基準として、液面の位置が 27mm (60%), 36mm (80%), 45mm (100%), 54mm (120%), 63mm (140%) となる 5 種類を用意した (図 4)。この際、液体部分は水色、液体の入っていない部分は白色に着色されている (図 5)。

実験では、体験者に容器を左右に振らせ、その際内部の液体が左右に揺れる様子を提示する。そこで、液体の揺れを模した簡易的モデルを図 6 のように設定した。このモデルでは、体験者は容器を左右にしか振らない、しぶきや波のような詳細な表現は行わず、液面を直線と近似するという前提のもと、液体の揺れを簡易表現している。具体的には、時刻 t における液面の角加速度を $a_w(t)$ 、液面の角速度を $\omega_w(t)$ とし、液体面の傾き $\theta_w(t)$ を以下の式 (1)~(3) により求めている。

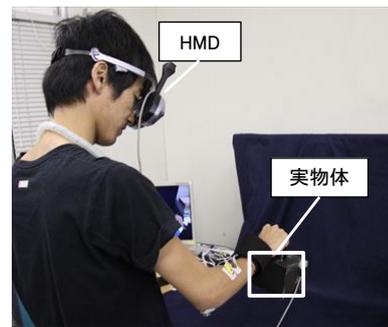


図 2 実験風景

Fig.2 Experimental Scene



図 3 実験で使した実物体

Fig.3 Real Object Used in Experiments

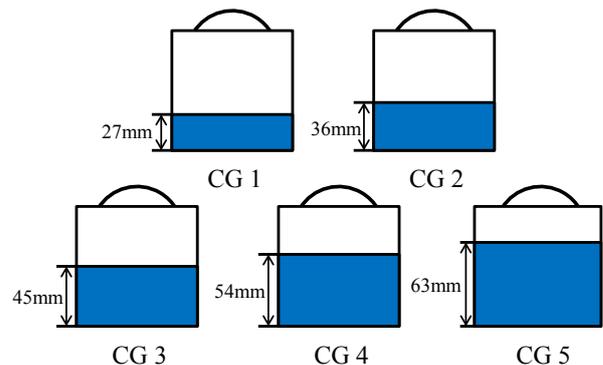


図 4 実験で使用する視覚刺激

Fig.4 Virtual Stimulation Used in Experiments

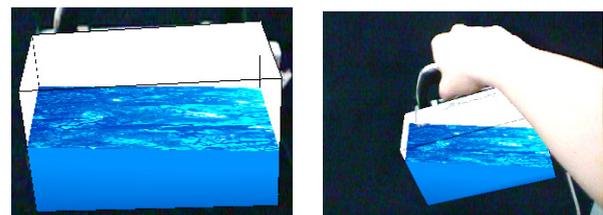


図 5 実験で使した MR 型視覚刺激

Fig.5 MR Visual Stimulation Used in Experiments

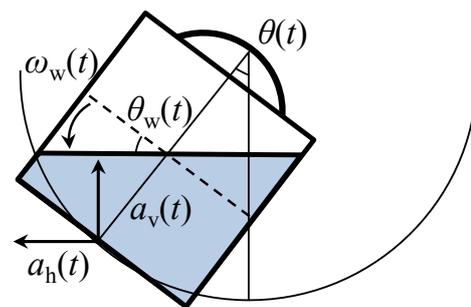


図 6 液体の動きの簡易モデル

Fig.6 Simplified Model of Fluid Movement

表 1 実験 1 で使用する MR 型視覚刺激の種類
Table 1 Variety of MR Visual Stimulation
Used in Experiment 1

提示パターン	動きの有無	液面位置
1	液体の 揺れあり	27mm (CG1)
2		36mm (CG2)
3		45mm (CG3)
4		54mm (CG4)
5		63mm (CG5)
6	液体の 揺れなし	27mm (CG1)
7		36mm (CG2)
8		45mm (CG3)
9		54mm (CG4)
10		63mm (CG5)

表 2 実験 2 で使用する MR 型視覚刺激の種類
Table 2 Variety of MR Visual Stimulation
Used in Experiment 2

提示パターン	加減値	標準との比較
A1 (揺れ小)	0.490	50%
A2	0.735	75%
A3 (標準)	0.980	100%
A4	1.225	125%
A5 (揺れ大)	1.470	150%

$$a_w(t) = -(C - a_v(t)) \cos \theta(t) + a_h(t) \sin \theta(t) \quad (1)$$

$$\omega_w(t) = \int a_w(t) dt \quad (2)$$

$$\theta_w(t) = \int \omega_w(t) dt \quad (3)$$

ここで、実物体の縦方向加速度 $a_v(t)$ 、実物体の横方向加速度 $a_h(t)$ および把持物体の傾き $\theta(t)$ は磁気センサより算出する。また水らしい動きを基準に、加減値 C を設定した。

具体的には、事前に 5 人の被験者に、この液体のアニメーションを体験させた。 C の値を変えて、水らしく見えると回答された C の値を記録したところ、平均すると $C = 0.98$ (deg/s²) の場合に水のように感じるという回答を得た。また、 C が大きくなると粘性のある液体に、 C が小さくなると粘性の少ない液体に感じるとの回答を得た。そこで $C = 0.98$ (deg/s²) を標準の加減値とし、予備実験、実験 1 ではこの値を適用する。

実験 1 で使用する MR 型視覚刺激のパターンを表 1 に示す。実験 1 では、CG1 ~ CG5 の液面位置それ

ぞれに対して、液体の揺れがある場合とない場合の CG アニメーション (計 10 種類) を重畳描画する。

また、実験 2 では、液面角加速度が異なる場合について比較を行うため、標準の加減値 C を 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 倍した A1 ~ A5 の 5 種類の MR 型視覚刺激を利用する (表 2)。

【筋電位測定】

MR 型視覚刺激によって、物理的な力覚にも影響を及ぼしているならば、各条件で観察される筋電位にも差が見られるはずである。そこで実験では、主観評価に加えて、筋電位測定による客観評価も行う。

実験では、体験者に容器を左右に振る動作を行わせるが、この動作が回内・回外運動であることから、回外運動時に作用する回外筋を対象筋として計測する。計測のための電極にはディスプレイ電極を用いる。電極間距離 25mm で貼付し、アース電極は肘頭とした。表面筋電計から導出されたアナログ信号は、サンプリング周波数 500Hz で PC に取り込む。

表面筋電図により筋電活動を観察する手法は様々であるが、一般的には筋電位の振幅情報を用いて定量化されることが多く、周波数情報を用いて筋疲労を観察する方法も使用される [26]。本研究では、把持物体の振り動作時における回外筋の筋活動量を評価するために、振幅情報から算出される筋肉の活動度合を指標化した %MVC (Maximal Voluntary Contraction) を利用する。 %MVC は、最大自発筋収縮時の筋電位に対する計測筋電位 (EMG) の割合を算出する。計算式は式 (4) となる。

$$\%MVC = \frac{\text{計測した筋電位(EMG)}}{\text{最大自発筋収縮時の筋電位(MVC)}} \times 100 \quad (4)$$

回外筋の最大自発筋収縮時の筋電位 (MVC) は、別途自発筋収縮が最大値を計測する [27]。 %MVC は、把持する実物体の重さが物理的に重くなると増加する。筋電図の解析は、数値解析ソフト GNU Octave を用いて行う。解析は筋電計より得られた波形を全波整流化した後、被験者ごとに計測した MVC により正規化を行い、 %MVC を算出する。

4. 予備実験

4.1 実験目的と手順

まず、実物体に、物体内の液体の揺れを想起させるような MR 型視覚刺激を重畳描画し、揺れがある場合とない場合で知覚される触力覚が異なるのかを確認する。また、比較のため、MR 型視覚刺激を提示しない、実物体のみの場合 (把持物体が剛体の場合、内部に液体が封入されていて液体が見える場合、液体が見えない場合) についても同様の実験を行った。

【実験条件】

MR 型視覚刺激は、3.2 節で述べた液面位置が 45mm の CG3 を用い、被験者の手の動きに合わせて液体が揺れる場合 R3 (表 1 パターン 3)、揺れない場合 R2 (表 1 パターン 8) を提示する。また、比較のために、以下の 3 つの提示パターンについても実験を行う。

- ・ R1 : 実物体 (剛体) + CG の重畳描画なし
 - ・ L1 : 実物体 (液体) + CG なし+液体視認不可
 - ・ L2 : 実物体 (液体) + CG なし+液体視認可
- なお、液体の視認不可については把持物体の中身が見えないよう黒紙で覆った。

被験者には以上の計 5 種類の条件を提示する (表 3)。被験者は 20 代の男性 7 名である。振る動作を統制するため、振るテンポや姿勢を教示した上で、教示した通りできるようになるまで事前に十分練習させた。

【実験手順】

- (1) 被験者に HMD と筋電位計測用の電極を装着
- (2) 5 種類の提示パターンより 1 種類をランダムに選出し、被験者に提示
- (3) 被験者は、決められた姿勢 (肘を 90 度に屈曲させた状態で実物体を把持する) で実物体を把持し、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて 3 秒間、物体を左右に振る動作を行う
- (4) (3) を行った後 3 秒間静止
- (5) (3)(4) を 3 回繰り返す
- (6) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (7) 残りのパターンについて、(3)~(5) を繰り返す
- (8) 最後に、被験者の希望するパターンを再度体験させ、重心位置の揺れの大きさと重さについて、それぞれを比較し、コメントするよう求めた

4.2 結果と考察

実験後のコメントから、以下のことがわかった。

- ・ MR 型視覚刺激を提示した R2 と R3 については、全被験者が、揺れない R2 を重く、揺れがある R3 を軽く感じたというコメントした。重心位置の揺れに関しては、液体の動きを MR 提示したことで、物体の重心位置がより大きく変化しているように感じるという被験者が多かったものの、重心位置の変化よりも重さの方がより顕著な差を感じるというコメントも多かった
- ・ 一方、MR 型視覚刺激を提示しない R1, L1 でも同様に全被験者が (揺れない) 剛体の R1 を重く、(揺れのある) 液体の L1 を軽く感じていた。重心位置の変化に関しては、剛体 R1 よりも液体 L1 の方が、明らかに重心位置が移動しているように

表 3 予備実験で使用する提示パターン
Table 3 Variety of Pattern Presentation Used in Preliminary Experiment

提示パターン	封入物	視覚刺激
R1 (Rigid 1)	剛体	CG なし
R2	剛体	CG3 揺れなし
R3	剛体	CG3 揺れあり
L1 (Liquid 1)	液体	CG なし 液体揺れ視認不可
L2	液体	CG なし 液体揺れ視認可能

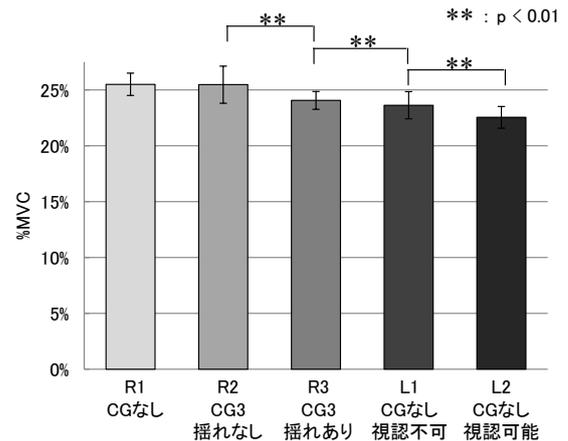


図 7 予備実験結果

Fig.7 Result of Preliminary Experiment

感じるというコメントが多かった

- ・ 液体の動きを疑似的に MR 提示した R3 よりも、実物体に液体を封入した場合 (L1, L2) の方が重心位置の変化を大きく感じたというコメントが数人から得られた
 - ・ また、液体の揺れが見える L2 と、見えない L1 では、重心位置の移動、重さともに見える L2 の方が若干揺れを大きく、重さを軽く感じるが、違いは小さいというコメントが多かった
- また、筋電位解析では、振り動作の開始から終了までの 3 秒間を解析区間として %MVC を算出した後、解析区間内での平均 %MVC を求めた。解析区間における回外筋の平均 %MVC を図 7 に示す (R1 : 25.50%, R2 : 25.48%, R3 : 24.07%, L1 : 23.63%, L2 : 22.55%)。また、t 検定の結果、試行間で回外筋の平均 %MVC に有意差が見られた (p < 0.01)。結果より、以下のことがわかる。
- ・ 剛体を封入した実物体 (R1, R2, R3) と液体を封入した実物体 (L1, L2) を比較すると、液体を封入した実物体の方が低い筋活動量を示す
 - ・ 封入物は同じ液体にも関わらず、L1 と L2 の比較では視覚情報の提示により、回外筋の筋活動量が減少している

・封入物は同じ剛体にも関わらず、R2 と R3 の比較では、MR 型視覚刺激で液体の揺れを提示することで、振り動作時の回外筋の筋活動量が減少している

主観・客観評価の結果をまとめると、

- (i) 実物 (R1, L2) の場合、内部が剛体よりも液体の場合の方が重心位置がより大きく変化しているように感じ、重さも軽く感じている。内部が見えない L1 の場合でも、物理的な内部の液体の動きを力覚として知覚できるので、R1 寄りの結果となっている
- (ii) 一方、MR 型視覚刺激として、液体の揺れの有無を提示した場合 (R2, R3) には、物理的な内部の液体の動きは存在しないため、重心位置の移動は感じるものの、それほど明確には知覚されなかった。一方、重さ知覚の違いに関しては非常に顕著な差があった。また、筋活動量でも R2, R3 間では有意な差が表れた

そこで、重さ知覚に注目してみると、関口ら[23]は、重量の識別には、(1) 物体保持時に受ける重量感覚、(2) 動かした際に受ける慣性力、(3) 内容物の衝突時に受ける衝撃力の3つの手がかりがあると述べている。これを予備実験に当てはめて考えると、(1) の物体保持時に受ける重量感覚は、5 つの実験条件間でほぼ変わらない。(3) についても、液体を封入している L1, L2 では、液体が物理的に物体の内壁に衝突するが、R3 の場合 MR 型視覚刺激だけで衝撃を知覚させることは難しい。一方、今回の実験条件では被験者自身が物体を動かすため、運動を伴った体性感覚の変化と視覚的変化の相互作用が起こり易い状況になると考えられる。この相互作用により (2) の慣性力を実際より大きく錯覚し、重量知覚に影響を及ぼした可能性は高い。

以上のことから、運動を伴った体性感覚の変化と動的に変化する MR 型視覚刺激が組み合わせることで、ヒトの重さ知覚に大きく影響を及ぼすと考えられる。

そこで、以降の実験 1、実験 2 では、視覚刺激として提示する物体内部のパラメータを変えることで、重さ知覚がどのように影響を受けるか明らかにする。

5. 実験 1: 動的に変化する視覚刺激の影響

5.1 実験目的

次に、提示する MR 型視覚刺激の可動部 (液体部分) の容量を変化させた際の重さ知覚への影響を調べる。

5.2 実験条件

実験 1, 2 では、主観評価実験をサーストンの一対比較法に基づいて行うため、試行回数が非常に多くなり、筋電計測を正確に行うことが難しい。そこ

で、主観評価と客観評価を別々に実施した。

主観評価で用いる MR 型視覚刺激は液体部分の容量が異なる CG1 ~ CG5 の 5 種類 (図 4) で、それぞれ被験者の手の動きに合わせて液体が揺れる場合、揺れない場合の計 10 パターン (表 1) を提示する。

客観評価では、上記のパターンから CG1, 3, 5 を含む、パターン 1, 3, 5, 6, 8, 10 の計 6 パターンを提示する。

5.3 実験手順 1(主観評価)

- (1) 被験者に HMD を装着
- (2) 10 種類の提示パターン (表 1) から 2 種類をランダムに選出
- (3) (2) で選出した 2 種類のパターンのうち 1 つを被験者に提示
- (4) 予備実験同様、被験者は決められた姿勢で実物体を把持し、メトロノームのテンポに合わせて物体を左右に振る動作を行う
- (5) (2) で選出した残りの CG についても同様に (3)(4) を繰り返す
- (6) 1 回目と 2 回目の試行を比較し、どちらがより重く感じるか回答させる
- (7) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (8) 残りの組み合わせについても、(2)~(7) を繰り返す

実験手順はサーストンの一対比較法に基づいており、どちらが重く感じたかを二者択一で選択する。被験者が 3 つ以上の選択肢で迷うことなく、簡便に心理尺度を構成する方法を採用した。MR 型視覚刺激により重さ知覚に影響を受けるならば、心理尺度に偏りが見られるはずである。

試行回数は被験者 1 名あたり $10C_2 = 45$ 回、被験者は予備実験の被験者と一部重複する 10 名 (20 代の男性 9 名、女性 1 名) である。

5.4 実験手順 2(客観評価)

- (1) 被験者に HMD と筋電位計測用の電極を装着
- (2) 6 種類の提示パターン (表 1 パターン 1, 3, 5, 6, 8, 10) から 1 種類をランダムに選出
- (3) 予備実験同様、被験者は決められた姿勢で実物体を把持し、メトロノームのテンポに合わせて物体を左右に振る動作を行う
- (4) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (5) 残りの 5 パターンについても、(2)~(4) を繰り返す

被験者は、主観評価に参加した 10 名のうち男性 5 名である。

5.5 結果と考察

主観評価実験の結果を図8に示す。図8中の2本の数直線は提示パターンごとに得られた重さの心理尺度を示している。数値が小さくなるにつれて、被験者は把持物体をより重く感じたことを示す。線分上の丸は、液体の揺れを表現した際の各条件（提示パターン1～5）を、三角形は液体の揺れを表現しない際の各条件（提示パターン6～10）を示している。また各マーカの大きさは、液体の容量が多いほど大きく、少ないほど小さく表示している。

客観評価実験では、予備実験と同様、振り動作の開始から終了までの3秒間を解析区間として%MVCを算出した後、解析区間内での平均%MVCを求めた。仮想物体の液体の容量および液体の揺れの有無を変更した際の各平均%MVCの結果を図9に示す（CG1揺れあり：19.57%，CG1揺れなし：21.05%，CG3揺れあり：21.29%，CG3揺れなし：22.30%，CG5揺れあり：20.90%，CG5揺れなし：21.31%）。

主観評価実験の結果から、以下のことがわかる。

- (i) 液体部分の容量を変化させた場合にも、予備実験同様、MR型視覚刺激の液体部分が、手の動きに応じて揺れる場合の方が、把持物体をより軽く感じている
- (ii) 把持している実物体の重量は同じであっても、重量描画する可動部分の容量が異なると、容量の多いものほど重く感じている

また、客観評価実験の結果から、以下のことがわかる。

- (iii) 液体部分の容量に関わらず、手の動きに応じて視覚的に液体部分が揺れることで、回外筋の筋活動量が減少している
 - (iv) 液面位置が27mm、63mmの場合よりも、液面位置45mmの場合に高い筋活動量を示している
- (i)(iii)の結果から、液体部分が揺れる／揺れない場合には、主観評価・筋活動量両方で重さ知覚に影響を及ぼしていることがわかる。液体部分の揺れの有無のみ異なる提示パターン間で、主観評価でも、客観評価でも符号検定により有意水準5%の有意差が見られた。よって、動的な視覚提示のみで、重さ知覚に影響を与えていることがわかる。

しかし、(ii)(iv)の結果から、液体部分の容量の違いについては、主観的には容量が大きいほど把持物体を重く感じてしているが、筋活動量にはあらわれていないことがわかる。

6. 実験2:運動状態の変化がもたらす影響

6.1 実験目的

実験2では、提示するMR型視覚刺激の可動部の運動状態を変更した際の重さ知覚への影響を調べる。

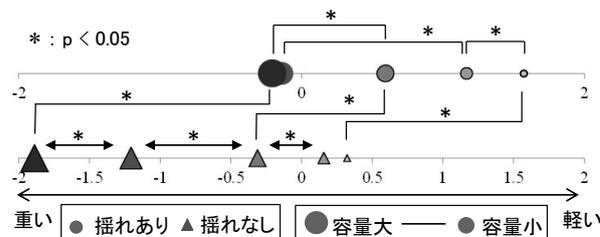


図8 実験1：主観評価結果
Fig.8 Result of Experiment 1

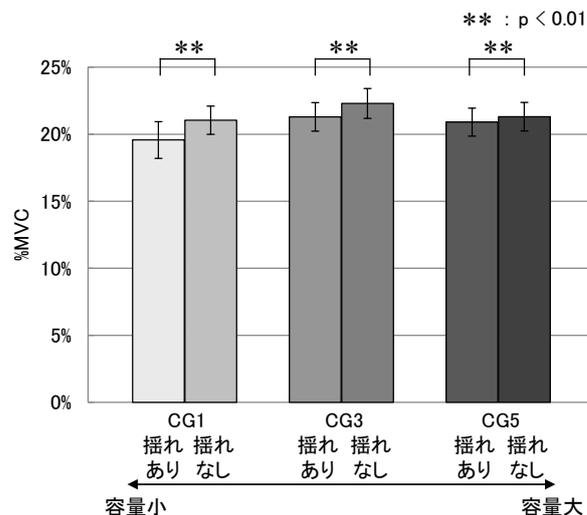


図9 実験1：CG1, 3, 5における平均%MVC
Fig.9 Result of Experiment 1
(The Average %MVC of CG1, 3 and 5)

6.2 実験条件

実験1と同様、実験2でも、主観評価と客観評価を別々に実施する。両実験で用いるMR型視覚刺激は、液体の揺れの角加速度が異なるA1（揺れ小）～A5（揺れ大）の5種類のCGアニメーション（表2）である。

6.3 実験手順1(主観評価)

実験手順は、実験1の手順1と同じで、(2)が「5種類の提示パターン（表2）から2種類をランダムに選出」に変わる。

実験手順はサーストンの一対比較法に基づいており、液体の揺れの角加速度の変化により重さ知覚に影響を受けるならば、心理尺度に偏りが見られるはずである。

試行回数は被験者1名あたり $5C_2 = 10$ 回、被験者は実験1と同じ10名である。

6.4 実験手順2(客観評価)

こちらも、実験手順は、実験1の手順2と同じで、(2)が「5種類の提示パターン（表2）から1種類をランダムに選出」に変わる。被験者は実験1の客観評価と同じ男性5名である。

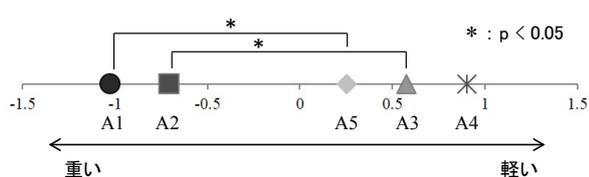


図 10 実験 2 : 主観評価結果
Fig.10 Result of Experiment 2

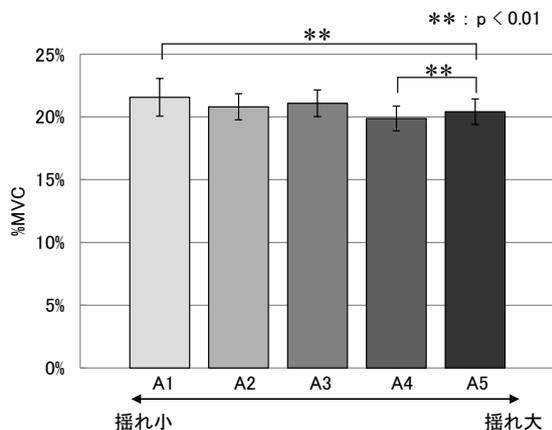


図 11 実験 2: Animation A1~A5 における平均%MVC
Fig.11 Result of Experiment 2
(The Average %MVC of Animation A1~A5)

6.5 結果と考察

主観評価実験の結果を図 10 に、客観評価実験の結果を提示パターンごとに平均した結果を図 11 に示す (A1: 21.56%, A2: 20.81%, A3: 21.09%, A4: 19.87%, A5: 20.42%)。主観評価実験の結果から、以下のことがわかる。

- (i) 液体の揺れの角加速度が遅くなるほど、把持物体を重く感じ、速くなるほど把持物体を軽く感じる傾向が見られる (図 10 の A1 と A3, A4, A5 間, A2 と A3, A4 間で符号検定により有意水準 5% の有意差あり, A5 と A3, A5 と A4 の間には有意差なし)
- (ii) A5 は液体の揺れの角加速度が速いにも関わらず、標準の液面角加速度である A3 を提示した場合より重く感じる傾向がみられた

また、客観評価実験の結果から、以下のことがわかる。

- (iii) 液体の揺れの角加速度が速くなるほど、回外筋の筋活動量が減少している傾向がみられるが、明確ではない
- (iv) A4 と A5 を比較した際、A5 の方が高い筋活動量を示している

(i) から、可動部の運動状態を変更することでも、主観的な重さ知覚に影響を及ぼすことがわかるが、(iii) から、筋活動量には十分には表れていない。

(ii) の結果は (i) の結果に反するが、実験終了時

に被験者から「水の揺れに違和感をおぼえた」「揺れが大きすぎて逆に揺れていないように感じる」などのコメントが得られたことから、知覚統合過程において視覚の信頼度が低下していることが考えられる。そのため、視覚が力覚に及ぼす影響が小さくなった可能性がある。(iv) の筋活動量の結果でも、これと同様の傾向が得られている。

7. 考察

以上の実験結果を分析・整理した結果、以下のような知見が得られた。

- (a) 予備実験と実験 1 より、実物体に、物体内の液体の揺れを想起させるような MR 型視覚刺激を重畳描画すると、揺れがある場合とない場合で知覚される力触覚が異なる。即ち、MR 型視覚刺激による内部ダイナミクスの提示が力覚に影響を及ぼすことが示された
- (b) 実験 1 より、本錯覚現象に影響する MR 型視覚刺激の要因を検証するため、MR 型視覚刺激として提示する液体部分の「容量」を変化させた際に、知覚される重さが異なることが示された
- (c) 実験 2 より、MR 型視覚刺激として提示する可動部の「運動状態」を変更した際、主観的に知覚される重さが異なることが示された

8. むすび

本研究では、実物体 (剛体) を把持し、手の振りに応じて物体内部の液体が揺れる CG 画像を重畳描画することで、重さ知覚にどのような影響を及ぼすか確認する実験を行った。その結果、提示する CG アニメーションの運動状態を変化させることで、重さ知覚に錯覚現象が生じることを確認し、実物体 (R) と仮想物体 (V) の運動状態が異なる際に見られるこのような錯覚現象を、“R-V Dynamics Illusion” と命名した。

この錯覚現象は、視覚提示を行うだけで筋力の消耗が抑えられることから、軽作業の負荷軽減につながる可能性がある。また、このような視覚・力覚間の相互作用を利用することで、現状の限られた触力覚ディスプレイの能力を最大限に活用することも期待できる。

本論文では、最初のステップとして、実物体が剛体の場合から着手したが、R-V Dynamics Illusion に影響する要因として、実物体が剛体でなく、動的に変化する物体である場合や、物体内部が液体ではなく、固形物である場合、実物体を振らなくても内部が動く場合など、様々な条件が考えられるため、引き続き条件を変えながら系統的に実験を行っていく予定である。また、今回実験を行った実物体が剛

体、物体内部が液体の場合についても、引き続き実物体の質量や重心位置を変化させた際の影響、R-V Dynamics Illusion が起こり得る条件、実物体との比較、絶対閾、弁別閾とそのメカニズム、慣れの影響などについて、実験を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、科研費・基盤研究 B「複合現実型視覚刺激が及ぼす触印象に関する研究」、科研費・若手研究 B「複合現実空間における痛覚・温冷覚提示に関する研究」による。

参考文献

- [1] 「クロスモーダル/マルチモーダル特集号」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, 2013.
- [2] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet: "Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?," Proc. IEEE Virtual Reality, pp. 83 - 90, 2000.
- [3] 家崎明子, 柚田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "複合現実型視覚刺激による触印象への影響", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
- [4] 鍵本麻美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "複合現実型視覚刺激と聴覚刺激が触印象に与える影響 - 産業応用システムでの利用を想定した評価 -", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 325 - 333, 2009.
- [5] 木村朝子, 柚田明弘, 面迫宏樹, 柴田史久, 田村秀行: "Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [6] 面迫宏樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象 (第 2 報)", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 2, pp. 117 - 120, 2013.
- [7] 平野有一, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "Dent-Softness Illusion: 複合現実型視覚刺激による硬さ知覚への影響", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 271 - 278, 2011.
- [8] H. Y. Solomon, M. T. Turvey: "Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 14, pp. 404 - 427, 1988.
- [9] A. Charpentier: "Experimental study of some aspects of weight perception," *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [10] F. Biocca, J. Kim, and Y. Choi: "Visual touch in virtual environments: An exploratory study of presence, multimodal interfaces, and cross-modal sensory illusions," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 247 - 265, 2001.
- [11] A. Lecuyer: "Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39 - 53, 2009.
- [12] A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, and L. Etienne: "Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures," Proc. SIGCHI Conf. on Human factors in computing systems, pp. 239 - 246, 2004.
- [13] Y. Ban, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect," IEEE Haptics Symposium (HAPTICS2012), pp. 211 - 216, 2012.
- [14] R. R. Ellis, S. J. Lederman: "The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion," *Attention, perception & psychophysics*, Vol. 53, No. 3, pp. 315 - 324, 1993.
- [15] I. Rock, C. S. Harris: "Vision and touch," *Scientific American*, Vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.
- [16] K.R. Alexander and M.S. Shansky: "Influence of hue, value, and chroma on the perceived heaviness of colors," *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 19, No. 1, pp. 72 - 74, 1976.
- [17] J. De Camp: "The influence of color on apparent weight. A preliminary study," *Journal of experimental psychology*, Vol. 2, No. 5, p. 347, 1917.
- [18] P. Walker, B.J. Francis, and L. Walker: "The brightness-weight illusion: Darker objects look heavier but feel lighter," *Experimental psychology*, Vol. 57, No. 6, p. 462, 2010.
- [19] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暉: "バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15 - 23, 2008.
- [20] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎, "知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 47 - 58, 2006.
- [21] H. Y. Yao and V. Hayward: "An Experiment on Length Perception with a Virtual Rolling Stone," Proc. EuroHaptics Int. Conf. 2006, pp. 275 - 278, 2006.
- [22] 稲葉豪, 藤田欣也: "指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 95 - 102, 2007.
- [23] 関口裕一郎, 広田光一, 池井寧: "振ってみるデバイス: 対象指向慣性力提示装置の提案と試作", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 4, pp. 643 - 651, 2010.
- [24] 中原守勇, 北原格, 大田友一: "複合現実感における視覚と触覚の融合効果を利用した物体形状提示に関する実験的検討", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 25 - 36, 2008.
- [25] 鳴海拓志, 伴祐樹, 藤井達也, 櫻井翔, 井村純, 谷川智洋, 廣瀬通孝: "拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 333 - 342, 2012.
- [26] T. Sadoyama, H. Miyano: "Frequency analysis of surface EMG to evaluation of muscle fatigue," *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 47, No. 3, pp. 239 - 246, 1981.
- [27] 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵: "表面筋電図", 東京電機大学出版局, 2006.

(2013年12月16日受付)

[著者紹介]

佐野 洋平 (正会員)



2012年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。2014年立命館大学大学院情報理工学研究科博士前期課程修了。同年4月、トヨタ自動車(株)入社。複合現実型視覚刺激が触力覚印象に与える影響に関する研究に従事。

橋口 哲志 (正会員)



2005年職業能力開発総合大学校福祉工学科卒業。2007年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士前期課程修了。2013年九州大学大学院芸術工学府博士後期課程修了。現在、立命館大学情報理工学部メディア情報学科特任助教。触覚ディスプレイ、バーチャルリアリティ、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。本学会論文賞受賞。

柴田 史久 (正会員)



1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て、2003年4月より立命館大学理工学部助教授。同大学情報理工学部准教授を経て、現在、同教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。本学会複合現実感研究委員会幹事。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会等の会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。

木村 朝子 (正会員)



1996年大阪大学基礎工学部卒。1998年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て、2009年4月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。現在、同教授。博士(工学)。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプテックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM、IEEE各会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。