

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の分析

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

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

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

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

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、視覚・触力覚間の相互作用による顕著な錯覚現象としては、Pseudo-Haptic [2]が知られている。この錯覚現象は、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 [2-5]。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。

これまでに我々は、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術によって、視覚・触力覚に差異を作り出し、相互作用・補完作用について系統的に実験、分析を行ってきた [6-9]。その中で、実物体と重心位置の異なる MR 視覚刺激を提示することで重心位置を錯覚する “Shape-COG Illusion” [8][9] を発見した。この錯覚現象では、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する場合や、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を、予備実験を通して確認した。その結果、物体の重さ知覚に変化が見られることが分かったため、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。

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、ビデオシースルー型 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 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、その領域をマスクングすることで、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

*1 立命館大学情報理工学部

*1 College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2 立命館大学大学院情報理工学研究科

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

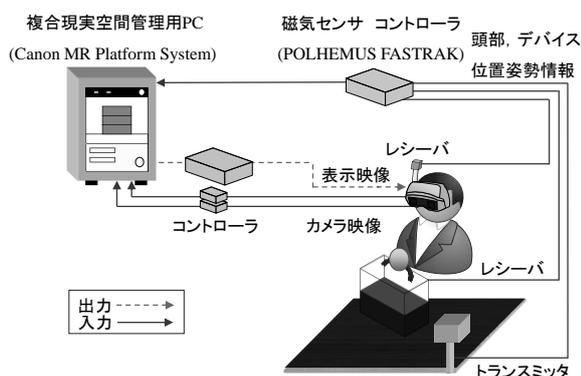


図1 システム構成

Fig.1 System Configuration

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 mm×奥行 80 mm×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．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．

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

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

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

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

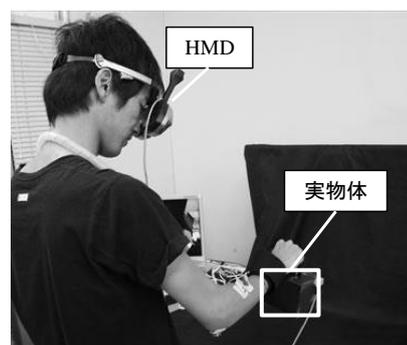


図2 実験風景

Fig.2 Experimental Scene

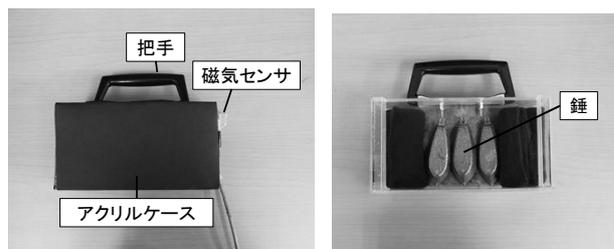


図3 実験で使用した実物体

Fig.3 Real Object Used in Experiment

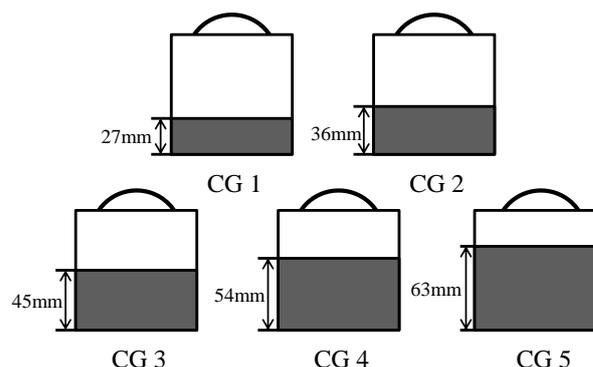


図4 実験で使用する視覚刺激

Fig.4 Virtual Stimulation Used in Experiment

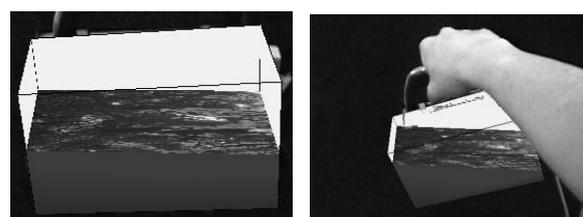


図5 実験でを使用した MR 型視覚刺激

Fig.5 MR Visual Stimulation Used in Experiment

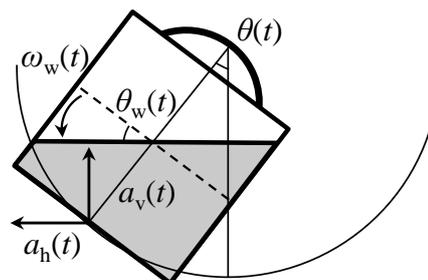


図6 液体の動きの簡易モデル

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%

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/s^2) 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いう回答を得た。そこで $C = 0.98$ (deg/s^2) 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 型視覚刺激が力覚に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 [10][11]。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。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。

3. 予備実験

3.1 実験目的と手順

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力触覚が異なるのか確認する。

【実験条件】

MR 視覚刺激は、2 章で述べた液面位置が 45mm の CG3 を用い、体験者の手の動きに合わせて液体が揺れる場合 (表 1 パターン 3)、揺れない場合 (表 1 パターン 8) を提示する。

【実験手順】

- (1) 被験者に HMD と筋電位計測用の電極を装着
- (2) 液体が揺れるパターン 3 と、揺れないパターン 8 のうち、どちらか 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) もう一方のパターンについても、(3) ~ (5) を繰り返す
- (8) 最後にそれぞれの力触覚に違いがあったか回答させる

被験者は 20 代の男性 5 名である。

3.2 結果と考察

実験終了時に行った、手の動きに応じて液体が揺れる場合と揺れない場合で力触覚に違いがあったか

という問いに対して、全被験者が、揺れがない方が重く、揺れがある方を軽く感じたという回答をした。

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。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 ($p < 0.01$)。これにより、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ことがわかる。

以上のことから、動的に変化する MR 型視覚刺激が、ヒトの重さ知覚に影響を及ぼしていると考えられる。

4. 実験 1: 動的に変化する視覚刺激の影響

4.1 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。

4.2 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 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、それぞれ体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。

4.3 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 (2) ~ (7) を繰り返す

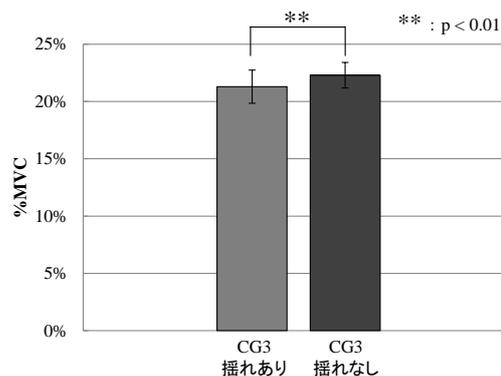


図 7 予備実験結果

Fig.7 Result of Preliminary Experiment

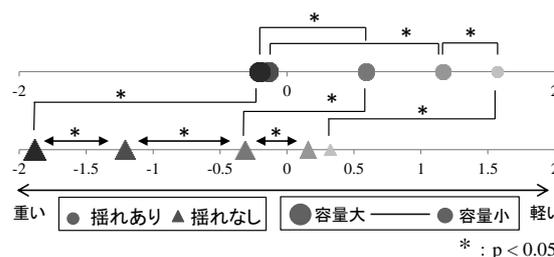


図 8 実験 1: 主観評価結果

Fig.8 Result of Experiment 1

実験手順はサーストンの一対比較法に基づいており、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 ${}_{10}C_2 = 45$ 回、被験者は 10 名 (20 代の男性 9 名、女性 1 名) である。

4.4 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) 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 20 代の男性 5 名である。

4.5 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。

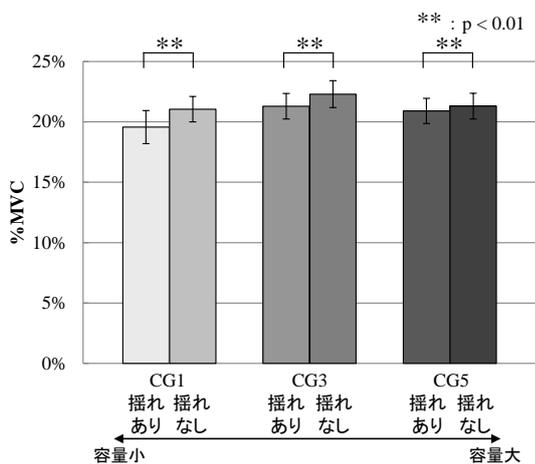


図9 実験1：CG1, 3, 5における平均%MVC
Fig.9 Result of Experiment 1
 (The Average %MVC of CG1, 3 and 5)

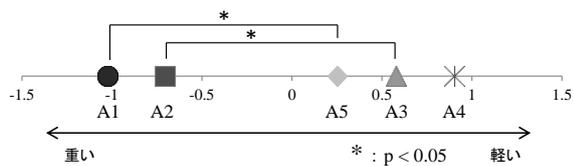


図10 実験2：主観評価結果
Fig.10 Result of Experiment 2

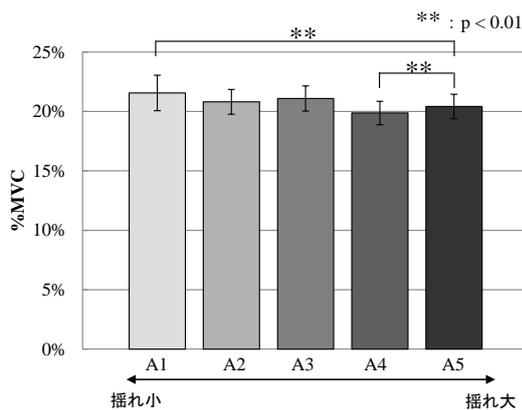


図11 実験2：Animation A1~5における平均%MVC
Fig.11 Result of Experiment 2
 (The Average %MVC of Animation A1 - A5)

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。

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、重畳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

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の場合に最も高い筋活動量を示す

(i)(iii)の結果から、可動部の容量を変化させた場合、重さ知覚に影響を及ぼしていることがわかった。また、(ii)(iv)の結果から、主観的には、揺れの有無にかかわらず、液体部分の容量が大きいほど、把持物体を重く知覚しているが、この傾向は必ずしも筋活動量には表れていないことがわかる。液体部分の容量が同じで、揺れの有無のみ異なる提示パターン間で、主観評価でt検定により有意水準1%、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、視覚的な内部ダイナミクスの提示のみで、重さ知覚に影響を与えていることがわかる。

5. 実験2:運動状態の変化がもたらす影響

5.1 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。

5.2 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。

5.3 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する、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)

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。

5.5 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。

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 で、A1 と A3, A4, A5 間や A2 と A3, A4 間で符号検定により有意水準 5%の有意差が見られる)
- (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ている

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遅くなるほど、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。

6. まとめと今後の展望

以上の実験結果を分析・整理した結果、以下のようない知見が得られた。

- (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」を変更した際に、知覚される重さが異なることが示された

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た。

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、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ため、引き続き条件を変えながら、R-V Dynamics Illusion が起こり得る条件、絶対閾、弁別閾とそのメカニズム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」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] 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.
- [4] 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.
- [5] A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, and L. Etienne: "Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures," Proc. SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pp. 239 - 246, 2004.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. Sadoyama, and 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.