

# R-V Dynamics Illusion: 実物体と仮想物体の異なる運動状態が重さ知覚に与える影響

橋口 哲志<sup>\*1</sup> 片岡 佑太<sup>\*1\*2</sup> 柴田 史久<sup>\*1</sup> 木村 朝子<sup>\*1</sup>

R-V Dynamics Illusion: Psychophysical Influence on Sense of Weight by Difference Between Dynamics of Real Object and Virtual Object

Satoshi Hashiguchi<sup>\*1</sup>, Yuta Kataoka<sup>\*1</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, and Asako Kimura<sup>\*1</sup>

**Abstract** --- In Mixed-Reality space, it appeared that the sense of weight can be affected by a MR visual stimulation with a movable portion. We named this psychophysical influence caused by the difference between dynamics of the real object (R) and the virtual object (V) movement, the “R-V Dynamics Illusion”. There are many combinations of experiments that can be conducted. Previously, we conducted experiments of the case where the real object is rigid and the virtual object is dynamically changeable. In this paper, we conducted experiments of the case where the real object is liquid and both the real and the virtual objects are dynamically changeable. The results of the experiments showed that the subjects sensed weight differently when virtual object with a movable portion is superimposed onto a real liquid object.

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

## 1 はじめに

近年、五感覚への提示装置の小型化が進み、これらの感覚をウェアラブルに、また各要素技術を組み合わせ、マルチモーダルに利用することが可能となった。アート・エンタテインメント分野でも、各感覚の組み合わせが試行されており、感覚間に生じる相互作用効果による新しい表現が期待されている。

各感覚に差異が生じないように、現実世界と同様な刺激を提示することで体験のリアリティを向上させることができるのは当然のことであるが、一方、敢えて感覚間に差異を生じさせることで、双方の感覚を補間したり、提示していない感覚が知覚されるといったことも知られている。

その顕著な例として、Pseudo-Haptics [1]がある。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を生じさせることで、疑似的に触力覚を生起するものである。これは、視覚と触力覚の各感覚モダリティを相互に作用させることで、単独では再現の難しい力覚提示を疑似的に行うことができる好例である。

これに対して我々は、複合現実感 (Mixed Reality; MR) の技術を用いて、仮想空間で生成した視覚刺激 (以下、MR 型視覚刺激) と現実世界で感

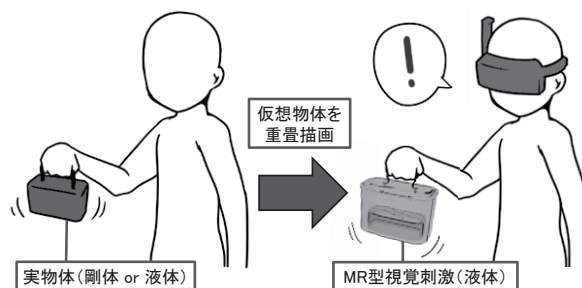


図1 R-V Dynamics Illusion の概念図

**Fig.1** Conceptual Diagram of R-V Dynamics Illusion

じる触力覚に敢えて差異を生じさせることで、視覚と触力覚の相互・補間作用を分析してきた [2-4]。これらの研究の一課題として、実物体内部が剛体 (物体内部に錘を固定) の把持物体を振ったとき、手の振りに応じて液体が揺れるような CG アニメーションを付与した (図 1) 結果、実物体の力覚的特性 (質量・内部の運動状態) は変化していないにもかかわらず、「液体が入っているように感じる」といった力覚の変化が知覚されることを発見した。このように実物体 (R) と仮想物体 (V) の異なる運動状態が引き起こす錯覚を R-V Dynamics Illusion と命名し、これまでその発生メカニズムの解明に取り組んできた。

これまでの取り組みでは、実物体内部が剛体の場合に、CG アニメーションの有無や液体容量・液面の速度といった視覚条件のみを変更すると、「液体が揺れると軽く感じる」「液体容量が多くなると重く感

\*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

じる」「液面の速度が遅くなると重く感じる」ことを明らかにした [5]。しかし、実物体と仮想物体の運動状態の組み合わせは多様であり、同現象の発生条件を明確にするためには、相互の運動状態をより広範囲に、系統的に検証する必要がある。

そこで、本研究では次なるステップとして、実物体の条件に「液体を入れた物体」を加え、実物体と仮想物体の運動状態の組み合わせが R-V Dynamics Illusion に与える影響を分析する。さらに、これまでの取り組みと同じ主観実験に加え、筋活動量と把持物体の加速度を同時に計測することで運動学的解析を行い、錯覚現象のメカニズムを分析する。

## 2 関連研究

R-V Dynamics Illusion は、例えば実物体内部を剛体とした場合、MR 型視覚刺激を振り動作に応じて変化させることで触力覚が生成される現象である。この現象では、仮想物体の容量や仮想の液面の粘度を変更することによって、特別な力覚提示装置を用いることなく、異なる重さを表現することが可能となる。しかし、視覚刺激による疑似力覚表現では、液体の力覚的変動等力量の小さい表現は可能であるが、物体内部の衝突等力量の大きい表現は難しい。

一方、把持物体の力覚的変動を再現する装置 [6-10] を用いることにより、視覚刺激だけでは表現しきれない力量の大きな表現が可能となる。例えば、南澤ら [6] は、物体内部の動的変化に着目し、仮想物体の質量や内部の運動を力覚提示装置により提示する手法を提案している。関口ら [7] は、容器と内容物のモデルを正確に提示することに焦点を置いたハンドヘルド型の対象指向慣性力提示装置を提案している。また、黒田ら [8] は、物理的刺激を用いた疑似力覚提示デバイスについて、対象物体や操作を限定しない力覚提示を、如何に簡易な装置で実現するか検討している。このように、中重量物体を対象に内容物の衝突や力覚的変動が再現されている。

これまで、R-V Dynamics Illusion に関する取り組みでは、MR 型視覚刺激を用いて外観のみ変化させてきたが、把持物体に内蔵できる力覚提示装置や装着型デバイスを併用することで、疑似力覚の表現力が高まる可能もある。つまり、R-V Dynamics Illusion で生成される疑似力覚と力覚提示装置を組み合わせることができれば、物体内の触力覚的運動をリアリティのある表現として提示が可能となる。

しかし、そのためには、まず実物体側の力覚特性が R-V Dynamics Illusion に与える影響を分析する必要がある。本研究では、実物体内部の条件を剛体から液体に変更した場合について、この錯覚現象の効果を分析する。その第一段階として、実物体が剛体の場合

と液体（水）の場合を比較する。

R-V Dynamics Illusion と同様の、視覚と触力覚の齟齬によって生じる著名な疑似錯覚現象として、Pseudo-haptics [1] がある。この錯覚現象では、物体の硬さ [11]、表面テクスチャ [12]、粘性 [13]、凹凸 [14] 等の細かい表現が可能である。同現象に関する研究では、視覚刺激の条件を変更するだけでなく、逆に触力覚刺激を変更した場合の実験も系統的に行われている。その結果、視覚刺激が変化した場合に限らず、触力覚刺激が変化した場合でも Pseudo-haptics が発生することが確認されている。このことから、R-V Dynamics Illusion でも同様に、触力覚刺激を変更した場合でも錯覚現象が発生する可能性が考えられる。

また、重さ知覚に影響を与える錯覚現象として Size-Weight Illusion [15] がある。Size-Weight Illusion は、同質量の物体では外観が大きいものほど軽く、小さいものほど重く知覚するというものである。この現象の発生理由として、大きい物体に対して重たいと予想し運動指令が出されるが、実際に振り始めると予想したほど力が必要でないことから、物体を軽く知覚する、すなわち、フィードフォワード制御による予測値と運動指令に差異があることで錯覚が生じると示唆されている [16]。また、重量感を筋活動で評価した研究 [17] や Size-Weight Illusion のメカニズムの解明に筋電位測定による評価を用いた研究が広く行われている [18][19]。そこで、本研究でも筋活動の観測を通して、R-V Dynamics Illusion の発生メカニズムを考察する。

## 3 実験目的と準備

### 3.1 実験目的

人間は視覚情報がなくても、実物体を振ることで内部に何が入っているかをある程度判別することができる。例えば、実物体内部に液体が入っている場合、液体自体の触力覚を手で知覚する。このため、液体の入った実物体に、何も入っていない仮想物体を重畳描画しても液体の入った物体と認識され、剛体とは認識されない。それならば、実物体内部に液体が入った状態に、液体の CG を重畳描画しても、従来研究で見られたような R-V Dynamics Illusion が発生しない、または発生しにくい可能性がある。

本論文ではこの仮説を検証すべく、実物体内部が剛体・液体のように力覚的性質が異なる物体の場合に、R-V Dynamics Illusion にどのような影響を与えるのかを調べる。具体的には、以下のことを確認・分析する。

- (1) 実物体内部が剛体ではなく、液体のように力覚的に変動する場合でも、R-V Dynamics Illusion が起こるのかを主観実験により検証
- (2) 物体を振る動作を行った時の筋電位や物体の加速度を計測し、錯覚現象のメカニズムを分析

### 3.2 実験準備

#### 【実験環境】

図2は実験で用いるMRシステムの構成を示している。本実験では、ビデオシースルー型 Head Mounted Display (以下、HMD) および Canon MR Platform System (Canon, VH-2002) を用いている。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) を使って取得する。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の領域の抽出を行い、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。本システムは、30fpsで動作しており、予備実験において時間的遅れ・ずれは感じないという意見を聴取している。

#### 【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90mmのアクリルケースを用いる。剛体条件では、ケース内の中心に錘を固定し、重心位置が物体の中心から動かないように、そしてケースの総質量が750gとなるように調節する(図3)。液体条件では、剛体条件と同様に総質量を750gにするために、高さ45mm(ケースの半分)の水位まで水を入れる。液体条件の重心位置は、剛体と異なり振り動作によって変動する。このように、剛体と液体で取って慣性モーメントの違いをつくり出し、触感から内容物が液体であることを予測できるようにすることで、「実物体内部に液体が入っていることでR-V Dynamics Illusionの効果が小さくなるかどうか」を検証する。

#### 【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、実物体と同様、幅165×奥行80×高さ90mm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である45mmとした。また、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4)。

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。この液体の揺れを模した動きの簡易的モデルを図5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 $\theta_w(t)$ を式(1)~(3)により求めている。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

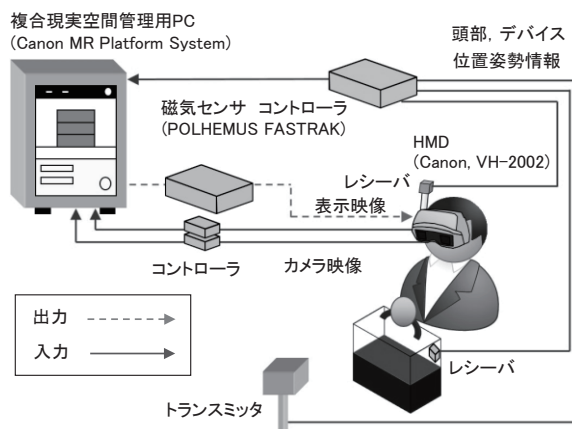


図2 システム構成  
Fig.2 System Configuration

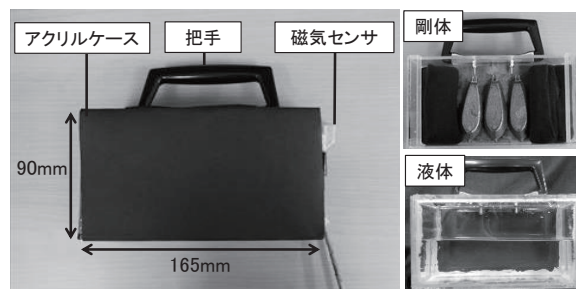


図3 実験で使った実物体  
Fig.3 Real Object Used in Experiments

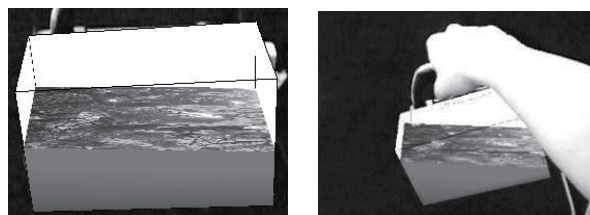


図4 実験で使ったMR型視覚刺激  
Fig.4 MR Visual Stimulation Used in Experiments

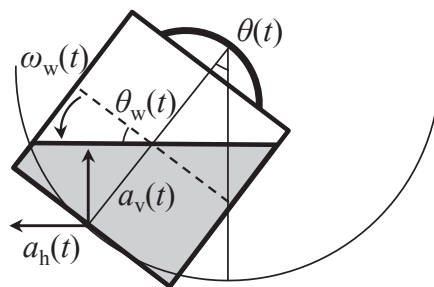


図5 液体の動きの簡易モデル  
Fig.5 Simplified Model of Fluid Movement

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

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

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

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  $C = 0.98$  ( $\text{deg/s}^2$ ) の場合に水のように感じるという回答を得た。そこで、実験では、加減値をこの  $C = 0.98$  ( $\text{deg/s}^2$ ) に設定する。

この簡易モデルでは、しぶきや波は表現されていないことから、実際の液体とは細かな挙動は異なる。しかし、先行研究 [5] において、このモデルで物体内部に水が入っているように知覚されることを確認している。

また、把持物体を振る角度を統一するために、磁気センサによる物体の角度情報を用いて、水平を 0 度として、左右に 30 度以上傾けるとビープ音を通知した。音が鳴ると、すぐに逆方向に振るよう指示しており、ビープ音が提示される時間はごく短時間である。

#### 4 実験 1: 主観実験

##### 4.1 実験目的

実物体内に液体を入れることで MR 型視覚刺激に類似した運動状態の場合について、R-V Dynamics Illusion の効果を検証する。これまで取り組みと同様に、実物体内部が「剛体」と「液体」の場合について、主観実験をもとに、実物体と仮想物体の運動状態の差異が重さ知覚に与える影響を明らかにする。

##### 4.2 実験条件

サーストンの一対比較法に基づいて、主観実験を行う。主観実験と筋電位計測は別々に実施した。主観実験で用いる実物体は、図 3 の剛体と液体の 2 通りである。仮想物体の条件は、揺れの有無の 2 通りである。これらに加え、仮想物体による視覚刺激の影響がない基準刺激として、剛体・液体の各条件において CG を描画しない試行を加えた。また、実物の水の動きを視認しながら試行する条件も行った。これらの条件を組み合わせ、P1~P7 の計 7 パターンで実験を行った (表 1)。

##### 4.3 実験手順

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  $nC_2 = 21$  回、被験者は 11 名 (20 代の男性 10 名、女性 1 名) である。実験時は、図 6 のように姿勢や振る動作を統制するように教示した。姿勢は、起立した状態で肘を 90 度に屈曲させた状態で実物体を把持させている。振り動作は、剛体と液体で実験条件を統制できるように、予備実験で「振りやす

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

パターン	実物体	状態
P1	剛体	CG なし
P2		CG あり (揺れ無)
P3		CG あり (揺れ有)
P4	液体 (水)	CG なし
P5		CG あり (揺れ無)
P6		CG あり (揺れ有)
P7		CG なし (液体視認)

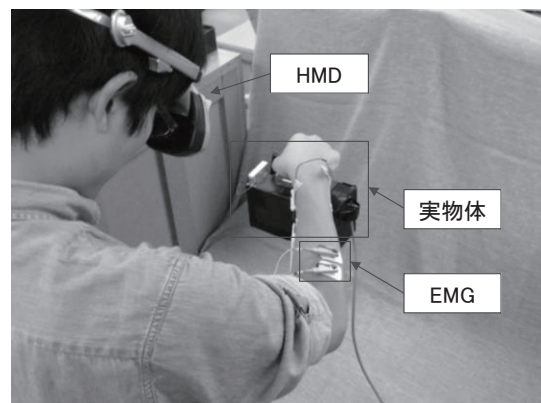


図 6 実験風景

Fig.6 Experimental Scene

い」「疲れにくい」振り速度 (100BPM) を選定した。また、この速度は実物体が液体の場合、しぶきの影響を感じない程度の速度でもある。被験者には、100BPM のメトロノームに合わせ、左右 30 度程度で一定に振るよう教示した。

被験者は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。試行は、100 往復/分の速さで 3 秒間 (5 往復) とした。以下が実験手順となる。

- (1) 被験者に HMD を装着させる
- (2) 7 種類の提示パターン (表 1) から 2 種類をランダムに選出する
- (3) (2) で選出した 2 種類のパターンのうち 1 つを被験者に提示する (提示順序もランダムに提示)
- (4) 被験者は決められた姿勢 (肘を 90 度に屈曲させた状態) で実物体を把持し、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて、物体を左右に振る動作を行う (3 秒間)
- (5) (2) で選出したもう一方の 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 1 分程度の休憩を取る (被験者の疲労度に応じて休憩時間は延長)
- (8) 残りの組み合わせも、(2)~(7) を繰り返す

#### 4.4 主観実験の結果と考察

主観実験の結果を図7に示す。図中の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。また、この結果について、符号検定により有意差を確認した。

主観実験の結果から以下のことがわかる。

- (i) CGなしの条件において、実物体内部が剛体よりも液体の方が把持物体を軽く知覚
- (ii) 実物体内部が剛体の場合と同様に液体の条件でも、CGによって液面の揺れを提示すると把持物体を軽く知覚
- (iii) CGなし条件での重さ知覚に対して、MR型視覚刺激による効果が加算的に作用
- (iv) 色による影響も考えられるが、揺れの有無による影響の方が顕著に知覚

(i) は、P4 (液体, CGなし) が P1 (剛体, CGなし) より軽く知覚されたことからわかる。P1 と P4 は CG が描画されておらず、視覚刺激による影響を排除し、真っ黒なケースを振らせている。P1 と P4 は質量が同じであるが、P4 のように容器内の液体が揺れることによって、触力覚の違いを判別できることがわかった。また、P7 (液体, CGなし (液体視認)) と P4 を比較すると、P7 の方が軽く知覚された。よって、実物の液体の動きを視認することで、触力覚のみより軽く知覚されることがわかった。

(ii) は、剛体の条件において、P1, P2 (剛体, 揺れ無), P3 (剛体, 揺れ有) の順に軽く知覚され、液体の条件でも同様に P4, P5 (液体, 揺れ無), P6 (液体, 揺れ有) の順に軽く知覚されたことからわかる。剛体の条件は先行研究 [5] と同様の結果であり、液体の条件でも同様に R-V Dynamics Illusion の発生を確認した。

(iii) は、P3 (剛体, 揺れ有) よりも P6 (液体, 揺れ有) の方が軽く知覚されたことからわかる。液体の

条件では、R-V Dynamics Illusion の効果が減少すると予想していたが、その効果は減少しなかった。また、(i)(ii) より、CGなし条件間では剛体よりも液体の方が軽く知覚されており、触力覚のみで判断した重さ知覚に対して、R-V Dynamics Illusion による効果が加算的に作用していることが考えられる。

(iv) では、P1 (剛体, CGなし) の実物体は真っ黒なケースであり、P2 (剛体, 揺れ無) の仮想物体は、液体の入っていない部分が白色に着色されている。Banらの研究 [20]から黒色よりも白色の方が軽く感じる傾向が示唆されている。それ故に、本実験の結果は色情報による重さ知覚への影響を含んだ結果となる。

### 5 実験2: 筋活動計測による解析

#### 5.1 実験目的と条件

実験1では、実物体内部が剛体・液体の条件において、MR型視覚刺激の運動状態が主観的な重さ知覚に影響を与えた。よって、各条件での筋活動にも差異が見られる可能性がある。そこで、同錯覚現象に関して、筋電位測定による運動学的解析から考察を行う。実験条件は、主観実験と同様、表1のパターンを用いる。全7パターンについて、筋電位を計測する。

#### 5.2 筋電位と加速度の測定法

実物体を左右に振る動作は、回外・回内運動であることから、回外・回内運動時に作用する回外筋・回内筋を対象筋として計測する。図8のように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、アース電極は尺骨茎状突起とした。表面筋電計 (ATR-Promotions, TS-EMG01) 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

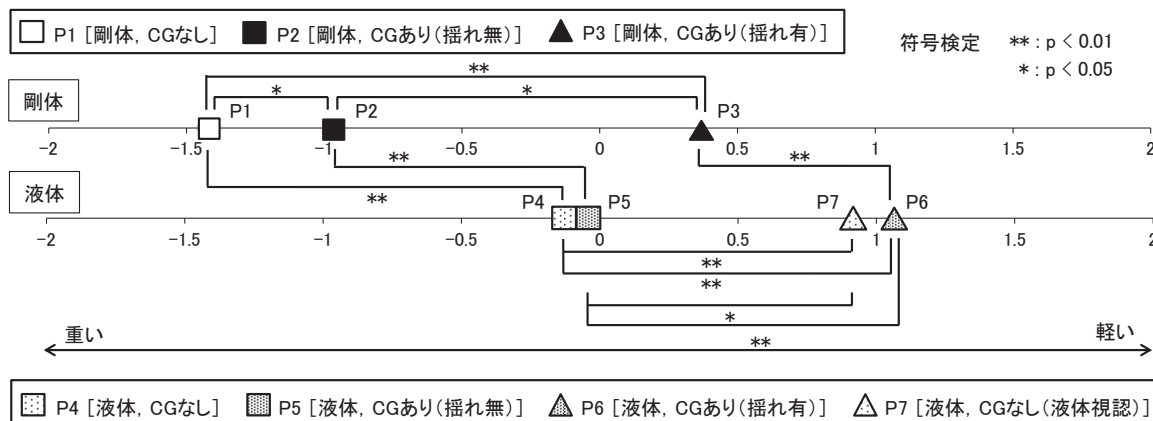


図7 主観実験の結果  
Fig.7 Result of Subjective Experiment

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 [21]. 本研究では、把持物体の振り動作時における回外・回内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して計測した筋電位 (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・回内筋の最大自発筋収縮時の筋電位 (MVC) は、別途、自発筋収縮の最大値を計測する [22]. 筋電位の解析は、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. %MVC は、実物体の重さが物理的に重くなると増加する.

また、筋電位計測と同時に加速度計測も行った. 図 8 のように把持物体の側部に加速度計 (表面筋電計と同様, ATR-Promotions, TS-EMG01) を取り付けた. 図中の Z 軸方向の加速度を評価に使用し、サンプリング周波数 500Hz で PC に取り込んだ.

### 5.3 実験手順

被験者には計 7 パターン (表 1) の条件を提示する. 被験者は実験 1 に参加した 11 名の中から、各条件で同錯覚現象が生じている 20 代の男性 5 名を選んだ. 主観実験と同様の振り動作に統制するため、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事前十分練習させた. 被験者には、実験 2 でも実験 1 と同様に錯覚が生じていることを確認した. 試行は疲労度が筋活動量に影響し

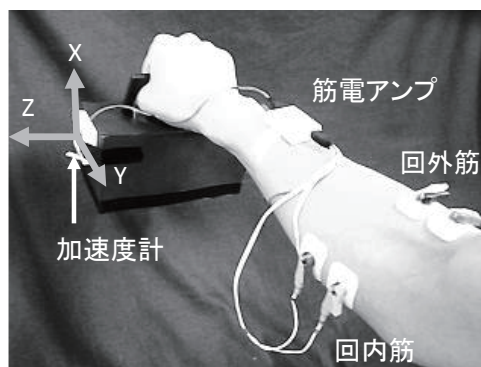


図 8 筋電計と加速度計

Fig.8 Electromyograph and Acceleration Meter

ないよう、100 往復/分の速さで 3 秒間 (5 往復) とした. 実験手順は以下ようになる.

- (1) 被験者に HMD と筋電位計測の電極を装着する
- (2) 7 種類の提示パターンから 1 種類をランダムに選出し、被験者に提示する
- (3) 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 (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 秒間静止する
- (5) (3)(4) を 3 回繰り返す
- (6) 筋疲労の影響を排除するため 1 分程度の休憩を取る (被験者の疲労度に応じて休憩時間を延長)
- (7) 残りのパターンについて、(2) ~ (6) を繰り返す

### 5.4 結果と考察

#### 【%MVC の平均値での比較】

図 9 は、被験者 5 名分の %MVC を各条件 (7 条件) ごとで平均した結果を示している. エラーバーは、その %MVC の標準偏差である.

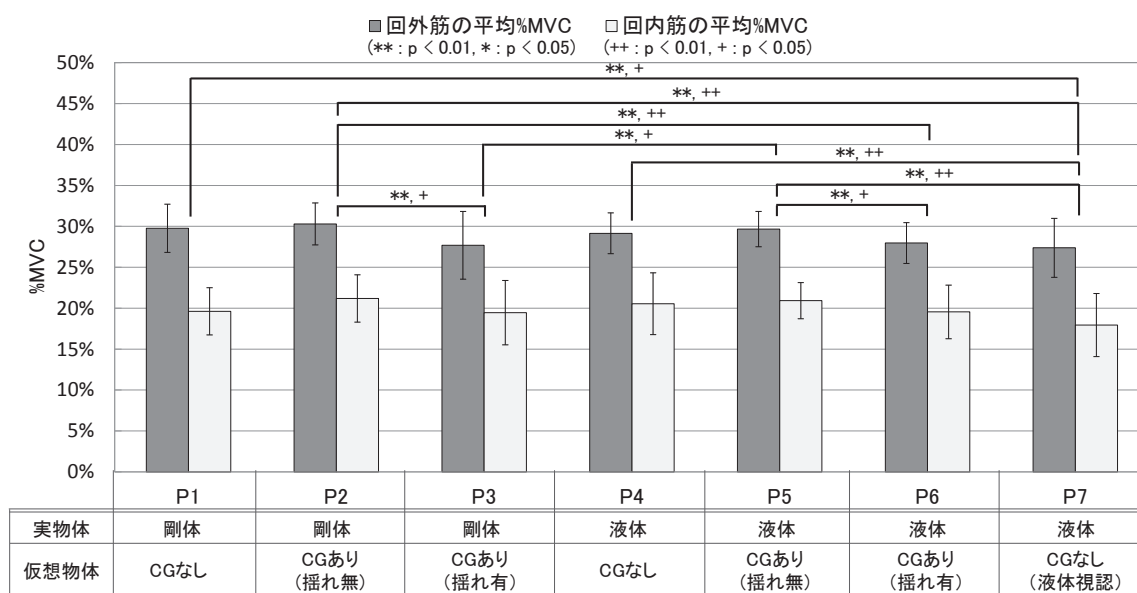


図 9 客観実験の結果

Fig.9 Result of Objective Experiment

一要因分散分析の結果, 各条件下に有意な差が見られた (回外筋:  $[F(6, 700)=14.9, p < 0.01]$ , 回内筋:  $[F(6, 700)=11.1, p < 0.01]$ ). そこで, Bonferroni 法による多重比較を行い, 有意差を確認した. 図中の有意差は, 回外筋・回内筋ともに有意差が確認できたものである. この結果から, 以下のことがわかる.

- (i) 各視覚条件による筋活動量は, 回外筋・回内筋ともに同じ傾向となった
- (ii) 実際の水を視認しながら振った場合に, 最も筋活動量が少なく, 剛体・液体の CG なしの条件とは有意な差があった
- (iii) 実物体内部が剛体または液体でも, MR 型視覚刺激によって液体の揺れを提示すると筋活動量が減少した

(i) は, 各条件の回外筋と回内筋の%MVC の平均値からわかる. 回外筋よりも回内筋の方が筋活動量は少ないが, 各筋での視覚条件による筋活動量は同じ傾向であった. よって, 以下の筋活動量とは, 回外筋・回内筋の両者を含んだ結果とする.

(ii) は, P1 (剛体, CG なし) と P4 (液体, CG なし) と比較して, P7 (液体, CG なし (液体視認)) の筋活動量が最も少ない. 一方, P1 (剛体, CG なし) と P4 (液体, CG なし), P2 (剛体, 揺れ無) と P5 (液体, 揺れ無), P3 (剛体, 揺れ有) と P6 (液体, 揺れ有) のような, 視覚条件 (仮想物体) が同じで実物体が異なる (剛体と液体) 組み合わせでは, いずれも主観的には重さ知覚に差異があるにも関わらず, 平均%MVC の結果 (筋活動量) に有意差はみられなかった. このことから, 実物体が剛体であるか液体であるかという違いは平均%MVC にはほとんど表れない (平均値として現れるほど筋活動量に差はない) 一方で, 視覚条件が揺れ無か, 揺れ有かの違いは平均%MVC にかかなり影響していることがわかる.

(iii) は, P6 (液体, 揺れ有) が P5 (液体, 揺れ無) より筋活動量が減少し, P3 (剛体, 揺れ有) も P2 (剛体, 揺れ無) より筋活動量が減少したことからわかる. よって, 剛体・液体の両条件において, MR 型視覚刺激による液体の揺れの有無が筋活動量に影響を与えていることがわかった.

(ii)(iii) の結果より, 実物体内部の剛体・液体の違いのみでは筋活動量への影響は少なく, 液面の揺れを提示した場合に筋活動量への影響が大きいことがわかる. 実験時には, 振り動作を一定としているため, 振り動作の力みや握る力などが筋活動量に影響を与えている可能性も高い.

重さ知覚では, 力の入れ方が影響を与えることが報告されており [19], 本実験でも力の入れ方が重さ知覚に影響した可能性が考えられる. 主観実験においても, MR 型視覚刺激によって液面の揺れを提示

した場合や実際の水を視認しながら把持物体を振った場合の方が, 実物体をより軽く知覚している. よって, 視覚刺激による液面の揺れを提示することで力の入れ方が変化し, 重さ知覚に影響を与えたのではないかと考えられる. そこで, 次は振り動作中の力の入れ方に注目する.

#### 【筋電波形と加速度での比較】

%MVC の平均値による結果では, 視覚刺激によって力の入れ方が変化することを示唆した. この結果を踏まえて, 振り動作中の力の入れ方が, 視覚刺激によってどのように変化するかを観察する. 筋電位計測と同時に加速度も計測すると, 運動状態を観察することができる. よって, 振り動作中の運動状態と各視覚刺激による筋電位の変動を観察することで, R-V Dynamics Illusion が発生するメカニズムを分析する. ここでは, 被験者 5 名が同じ傾向にあった部分に着目し, 代表的な傾向となった 1 名の結果を図 10 に示す. 図は, 振り動作 1 往復時の回外筋・回内筋の各%MVC と加速度を示す. この結果から以下のことがわかる.

- (i) 初動負荷時に回外筋は, 筋活動量が最大となる
- (ii) 初動負荷時の最大筋活動量は, P1 (剛体, CG なし) よりも, P7 (液体, CG なし (液体視認)) の方が小さい
- (iii) MR 型視覚刺激による揺れの有無で比較すると, 揺れ有の方が初動負荷時の最大筋活動量が小さい
  - (i) のように, 運動を始める初動負荷時において, 最も筋活動量が増加している. この傾向はどの条件でも同様であった.

(ii) では, P1 (剛体, CG なし) よりも, P7 (液体, CG なし (液体視認)) で, 初動負荷時の最大筋活動量が小さくなった. このことから, 水が入っている様子を視認できる状態では, 「水は下に留まろうとするから, 自分の力で持ち上げるのは実質ケース部分だけ」といった予測が生まれ, ケースを軽い力で動かし始めたと考えられる. 今回, 数値的な有意差は得られなかったが, 初動負荷以外の部分にはそれほど大きな違いが見られなかったことから, %MVC の平均値の結果に, この初動負荷時の最大筋活動量の差異が影響を与えている可能性もある.

(iii) のように, P2 (剛体, 揺れ無) と P3 (剛体, 揺れ有) の初動負荷時の最大筋活動量を比較すると, P3 の方が小さい. このことから, MR 型視覚刺激による液体の揺れの有無が, 初動負荷時の最大筋活動量に影響を与えていると考えられる.

(i) ~ (iii) の結果から, R-V Dynamics Illusion の効果が, 初動負荷時に生じた最大筋活動量に影響を与えていることがわかる. 初動負荷時に筋活動量が最大になることは, 本来の自然な体験からもわかる.

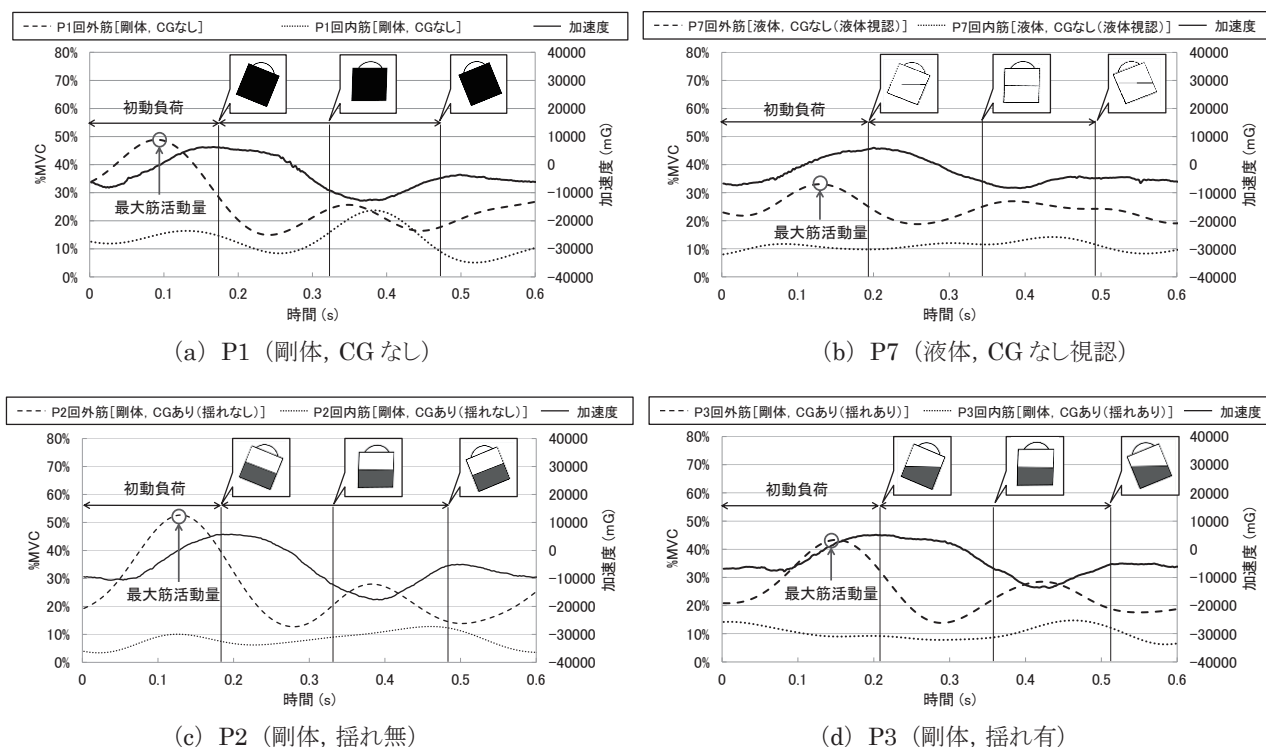


図 10 筋電活動量と加速度  
Fig.10 Result of %MVC and Acceleration

例えば、重たい物体を持ち上げる場合、一番力を使うのは地面から物体が離れるまでの初動時である。よって、本実験で初動負荷時に筋活動量の最大値が生じたのは、本来の現象と同様であることとなる。また、Hamiltonら [23]や Taimaら [24]は、重さによって初動負荷時の筋活動量に差異が生じることが確認している。よって、本研究で生じた初動負荷時の差異も、重さ知覚に影響を与えている可能性がある。

## 6 考察

本稿では、実物体内部が剛体・液体の両条件において、主観実験により R-V Dynamics Illusion の発生を確認し、筋活動量の観察により運動学的分析を行った。本論文の実験結果から、R-V Dynamics Illusion の発生メカニズムに関して考察する。まず、実験 1、実験 2 の結果をまとめると以下ようになる。

- (a) 実験 1 より、実物体内部が剛体・液体の両条件において R-V Dynamics Illusion が発生していることがわかった
- (b) 実験 2 の結果、MR 型視覚刺激で液体の揺れを提示すると筋活動量が減少することがわかった
- (c) 実験 2 の結果、実物体が剛体であるか液体であるかという違いは平均%MVC にはほとんど表れないことがわかった
- (d) 実験 2 の結果、R-V Dynamics Illusion の効果が、初動負荷時に生じた筋活動量の最大値に影響を与える（少ない筋活動量で動作を開始している）

ことがわかった

本研究では実物体内部に液体を入れる条件を加え、実物体内部が「剛体」と「液体」の場合について、R-V Dynamics Illusion が発生するか実験した。

実物体内部が液体の場合には、MR 型視覚刺激が実際の触力覚刺激と似ているので、R-V Dynamics Illusion の効果は減少するのではないかと考えていた。しかし、主観実験の結果から、P5（液体、揺れ無）と P6（液体、揺れ有）の間でも、P2（剛体、揺れ無）と P3（剛体、揺れ有）と同様、CG の揺れがない場合とある場合の間で、有意に重さの違いを知覚することがわかった。このことは、実物体の運動状態によって、R-V Dynamics Illusion の効果が減少しないことを示唆している。

%MVC の平均値の結果でも同様に、視覚条件が異なる部分には有意差がみられた。しかし、視覚刺激が同じで実物体のみ異なる場合には有意差がみられなかった。つまり、MR 型視覚刺激による効果は平均筋活動量に影響を与えたが、実物体が剛体か液体かは平均筋活動量にあまり影響がなかった。一方で、MR 型視覚刺激が筋活動量に与える効果が、初動負荷時に生じた最大筋活動量に影響を与えていることがわかった。つまり、運動の初期段階で筋活動の影響が主に表れていることになる。

この結果から、MR 型視覚刺激が身体運動でのフィードフォワード制御に影響を与えている可能性が考えられる。身体運動におけるフィードフォワード



制御とは、運動指令に対して行動結果を予測し、実際の行動結果と比較することで正確な運動を行うことができるというものである。このフィードフォワードの制御過程で、視覚刺激が行動結果に影響を与える場合があることが知られている [25]。

今回の実験の場合、物体の見え目（仮想物体）が液体の場合、被験者は中に液体が入っているとの予想のもと、腕にそれほど力を入れずに運動を開始している (d)。これがフィードフォワード制御における予測にあたりと考えられる。P6（液体、揺れ有）、P7（液体、CGなし（液体視認））のように、この予測が実際の触力覚刺激と合致すれば、予測通り物体は軽い力で動かしたことになる、物体は軽いと知覚されると考えられる。ここで、もし把持している実物体内部の物体が手の動きに対して想定外の動きをすれば、予想と実行結果とのギャップから、重さを知覚する可能性もある。しかし、今回のように手の動きに応じて CG の水が動く場合、体験者にとっては制御可能な、安定した状態と感じられ、そのまま軽く知覚されたと考えられる。

一方、見え目が液体で、中身は剛体の場合（P3（剛体、揺れ有））、平均筋活動量が変わるほどの力は振り動作に必要ない (c)。そのため、被験者の事前予想をほとんど覆すことなく、視覚刺激から想起した予想のもとに、軽いと知覚されたと考えられる。ただし、実際の水のような左右に揺れる触感はないので、P6、P7 と比べると少し重く知覚されたとと思われる。

物体の見え目（仮想物体）が剛体の場合、被験者は、中に動かないものが入っているという予想のもと、腕に力を入れて運動を開始する (d)。P1（剛体、CGなし）、P2（剛体、揺れ無）のように、この予測が実際の触力覚刺激と合致すれば、予測通り物体は強い力で動かしたことになる、物体は重いと知覚されると考えられる。

見え目は剛体で、中身が液体の場合（P4（液体、CGなし）、P5（液体、揺れ無））、強い力を入れて運動を開始すると、左右の慣性モーメントを強く感じ、P1、P2 と比べて軽く感じると考えられる。しかし、外観から中の動きを予想できないので、予想外の慣性モーメントの変化に P6、P7 と比べると重く感じるのではないかと考えられる。

## 7 むすび

本論文では、実物体内部が剛体・液体のように力覚的性質が異なる物体の場合に、R-V Dynamics Illusion にどのような影響を与えるのかを、主観評価実験、客観評価実験により明らかにした。実験の結果、当初の予想に反して、実物体内部が剛体・液体の両条件において、R-V Dynamics Illusion の発生を確認し、

筋活動量にも同様に影響を与えることがわかった。

また、筋活動をもとにした運動学的分析によって、MR 型視覚刺激による影響が、主に運動の初期段階における最大筋活動量に影響を与えることを確認した。それ故に、MR 型視覚刺激による効果がフィードフォワード制御の過程で影響を与え、その効果が運動初期での情報（重さ等）に付与され、重さ知覚に影響を与えている可能性を示唆した。

本論文では、実物体内部に液体を入れて、R-V Dynamics Illusion の効果を検証したが、今後は実物体の質量を変更した場合についても実験を行う予定である。さらに、R-V Dynamics Illusion の継続的効果を確認し、発生メカニズム解明に取り組む。

## 謝辞

本研究の一部は、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」、基盤 B「複合現実型視覚刺激による R-V Dynamics Illusion の研究」による。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 佐野洋平, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "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", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 255 - 264, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川正一, 藤田欣也: "物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 379 - 390, 2011.
- [9] T. Amemiya and T. Maeda: "Asymmetric Oscillation Distorts the Perceived Heaviness of Handheld Objects," IEEE Transactions on Haptics, Vol. 1, No. 1, pp. 9 - 18, 2008.

- [10] H. Yao and V. Hayward: "An experiment on length perception with a virtual rolling stone," *Proc. EuroHaptics 2006*, pp. 325 - 330, 2006.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Y. Ban, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect," *IEEE Haptics Symposium*, pp. 211 - 216, 2012.
- [15] A. Charpentier: "Experimental study of some aspects of weight perception," *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [16] Y. Koike, J. H. Kim, and D. Shin: "Role of stiffness in weight perception," *Japanese Psychological Research*, Vol. 48, No. 3, pp. 174 - 187, 2006.
- [17] 満田隆, 田中伸治: "前腕圧迫による重量感提示時の上肢筋活動", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 4, pp. 449 - 456, 2014.
- [18] 金載休, 洪性寛, 佐藤誠, 小池康晴: "SPIDAR を用いた size-weight illusion の検証", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 7, No. 3, pp. 347 - 354, 2002.
- [19] M. Hara, T. Higuchi, T. Yamagishi, N. Ashitaka, J. Huang and T. Yabuta: "Analysis of Human Weight Perception for Sudden Weight Changes during Lifting Task Using a Force Display Device," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1808 - 1813, 2007.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] A. Hamilton, D. W. Joyce, R. Flanagan, C. D. Frith, and D. M. Wolpert: "Kinematic cues in perceptual weight judgement and their origins in box lifting.," *Psychological Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 13 - 21, 2007.
- [24] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space," *Proc. IEEE Haptics Symposium*, pp. 175 - 180, 2014.
- [25] J. R. Flanagan and M. A. Beltzner: "Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion," *Nature Neuroscience*, Vol. 3, No. 7, pp. 737 - 741, 2000.

(2016年3月8日受付)

## [著者紹介]

### 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, パ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。

### 片岡 佑太 (非会員)



2014年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒。2016年, 同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印象に与える影響に関する研究に従事。本学会学術奨励賞受賞。

### 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, ハプティ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。