

複合現実型視覚刺激が内容量推定に与える影響

片岡 佑太^{*1} 奥川 夏輝^{*1} 橋口 哲志^{*2} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Psychophysical Influence on Volume Estimation by Mixed Reality Visual Stimulation

Yuta Kataoka^{*1}, Natsuki Okugawa^{*1}, Satoshi Hashiguchi^{*2}, Fumihisa Shibata,^{*1} and Asako Kimura^{*1}

Abstract - Mixed Reality (MR) is the technology that combines real and virtual world in real time. In MR space, the appearance of real object can be changed by superimposing the computer-generated image. We have been investigating the multi/cross-modal mechanism between sense of vision and touch in MR space. Up to now, we have confirmed that a real object (rigid) with a virtual liquid object can affect weight perception depending on liquid volume. When superimposing a virtual liquid object on a real object that contains water, it is expected that volume estimation can be changed depending on virtual liquid volume. In this paper, we focus on how people estimate volume, and verify the influence of virtual liquid volume in the MR environment. The results of the experiments, we revealed that volume estimation was affected by virtual liquid volume.

Keywords : Mixed Reality, Multi-modal, Volume Estimation, Psychophysical Influence

1. はじめに

ヒトは視覚・触覚・聴覚など、様々な感覚モダリティを通して、外界の情報を知覚している。このとき、各感覚器が独立して外界の情報を知覚しているわけではなく、複数の感覚器が相互に作用しており、ときには単独の感覚器だけでは起こり得ない知覚となることがある。このような、複数感覚を組み合わせることで得られる知覚を考察する、マルチモーダル・クロスモーダルに関する研究が盛んに取り組まれている^[1]。この一事例として、視覚と触覚の間に差異を発生させることで、触力覚への変化を狙った Pseudo-Haptics と呼ばれる錯覚現象が知られている^[2]。この現象は、身体動作とそれを反映した視覚情報との間に差異を発生させることで、触力覚提示装置を用いずとも、疑似的な触力覚が生起する錯覚現象である。

一方、現実世界と仮想世界を実時間で融合することが可能な複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術は、このような組み合わせの影響を検討することに適した技術である。MR 空間では、現実世界に存在する物体はそのまま利用し、付与させたい情報だけを電子的に生成・融合することが可能である。例えば、自動車のモックアップに対して、様々な内外装の CG 映像を重畳描画することで、CG による視覚的な材質の印象と、実際の触感を融合することができる^[3]。この MR 技術を利用することによって、視覚と触覚が異なるという、現実世界では起こり得ない状況を再現することが可能となる。ヒトの触力覚は、視覚の影響を受けることが知られており、意図的に情報が

異なる状況を作り出すことで、知覚される触力覚に特有の変化を起こすことが可能となる。種々のインタフェース設計の上では、このような変化によって発生する効果や適用範囲を明確にしておくことが肝要である。

我々の研究グループでも、MR 空間において視覚と触覚の間に差異を発生させることで、触力覚に様々な変化が生じることを系統的に分析してきた^{[4][5]}。その過程で、錘を固定して入れた剛体の容器に対して、水を模した CG 映像を重畳描画し、その映像を見ながら実物体を振ることを試みた。その結果、CG 映像の水を揺らすと、揺らさない時に比べて実物体を軽く知覚することや、CG 映像の水の内容量に応じて重さ知覚が変化する現象を発見した^[6]。しかし、ここで用いた実物体は剛体であり、水の触感や音も無いことから、重さ知覚への影響は検証できたものの、水の内容量をどの様に知覚しているか検証することはできなかった。

さらに我々は、実物体に水を入れた条件であっても剛体条件と同様に、揺れのある CG 映像を重畳描画することで、実物体を軽く知覚することを確認した^[7]。しかし、実物体と CG 映像の内容量が同一の条件で、揺れによる重さ知覚への影響を確認しており、内容量推定への影響や、実物体と CG 映像の内容量が一致しない状況での影響は確認できていない。特に、ヒトは対象物体を操作することによって様々な性質を知覚できるため、実際の水の触感や音があることで、CG 映像による影響を受けにくいことが考えられる。一方で、物体の性質を正確に知覚できなければ、CG 映像による影響を受けやすい可能性も否定できない。そこで本研究では「内容量推定」に着目し、水を入れた実物体に対して、様々な内容量の CG 映像を重畳描画することにより、内容量の推定へ与える影響を確認する基礎実験を行う。

*1: 立命館大学大学院 情報理工学研究所

*2: 龍谷大学 理工学部

*1: Graduate School of Information Science & Engineering, Ritsumeikan Univ.

*2: Faculty of Science and Technology, Ryukoku Univ.

2. 関連研究

対象物体に関する長さ、重さや形状といった特性は、物体への接触、把持行動などによって知覚することが可能である^{[8][9]}。この筋感覚が伴う探索行動は、総称してダイナミックタッチと呼ばれ、受容器の集成的な賦活によって、物体の特性を明確に知覚できることがある^[10]。例えば、重さに関する知覚では、能動的に物体を動かすことで、物体間の差異を判断できる弁別閾の感度が高くなることが報告されている^[11]。また、本研究で対象としている内容量の知覚でも、容器内部に入れた物体の水量や個数を、把持することによって推定可能であり、ダイナミックタッチは内容量推定という観点においても有効であることが窺える^{[12][13]}。

ヒトは外界から得られた情報を、特殊感覚や体性感覚を通して、独立ではなく相補的に働かせて処理している。この相互作用に関する研究事例に、マウス操作とポインタの動きなど、感覚間に差異を作り出すことで、疑似的な抵抗感や摩擦感が生じる Pseudo-Haptics がある^[14]。例えば、把持物体の見かけ上の移動量を変えると、重さ知覚が変化することや^[15]、触っている物体の視覚的な材質を変えると、粗さ知覚が変化することなど^[16]、多様な感覚が視覚により補完して提示できることが報告されている。さらに粗さ知覚では、聴覚情報を提示することによっても相互作用が発生し、知覚が変化することも分かっている^[17]。加えて、Size-Weight Illusion と呼ばれる、同一質量の物体でも形状が大きい物体ほど、重さが軽く知覚される錯覚も著名である^[18]。このように、視覚や聴覚情報によって、通常とは異なる触力覚を作り出すことが可能である。

特に、視覚情報が与える影響は内容量に関しても同様で、Raghubir らは、形状が異なる複数の容器に対して、対象が細長い形状であるほど、容器内部に入れられた内容量が多く知覚されると報告している^[12]。そして、この現象は視覚的に物体を認識している状況下でのみ発生し、容器の質量によっても、錯覚の傾向が異なることが報告されている^{[19][20]}。つまり、触覚単独でも内容量を推定することは可能であるが、視覚的な情報によって、その影響が変化することが分かる。ただしこれらの研究は、質量や形状が異なる実物体間で発生する内容量推定の差異に着目しており、質量や形状が一定の条件下で、視覚的に内容量を変化するだけで、推定される内容量が変わるかは確認されていない。

上述したように、視覚や聴覚情報が様々な知覚へ影響を与える一方で、その影響を受けない事例も存在する。例えば、実物体の把持力に応じてCGを変形することで、硬さ知覚を変化させる研究では、把持する実物体自体が硬ければ、触覚情報が優位となり、視覚の影響を受けることなく、実物体そのものの性質を知覚することが示唆されている^[21]。さらに硬さ知覚は、聴覚刺激の影響を受けず、触覚刺激の性質が優先されて知覚することも報告

されており^[22]、実物体の状態や対象となる知覚によっては、視覚や聴覚の影響を受けにくいことが分かる。

以上より、実物体を振ると水による慣性や音が発生するため、その情報から実物体の内容量が判断され、視覚情報の影響を受けにくいことが考えられる。一方で、実物体の性質をどの程度、正確に知覚できるか分からないため、視覚情報が内容量の推定に影響を与える可能性もある。そこで本研究では、水を入れた単一の実物体に対し、視覚的な内容量の操作による推定への影響を確認する。また、実物体を振ることによって生じる水の音が、推定へ与える影響も確認する。

3. 実験目的と準備

3.1 実験目的

本研究では、水を入れた実物体に対して、水を模したCG映像を重畳描画し、その液量を様々に変化させることで、内容量推定に与える影響を分析する。まず実験1では、内容量が視認できない状態で実物体を振らせ、どれほど正しく内容量を推定できるか、その正確度を確認する。実験2では、実物体と同一内容量のCGを重畳描画した際、被験者が推定する内容量の正確度に、どのような影響を与えるか確認する。最後に実験3では、実物体と異なる内容量のCGを重畳描画した際の影響を同様に確認する。また、水の音の有無が推定へ与える影響もそれぞれ確認する。各実験を通して、実物体に様々な内容量のCGを重畳描画することにより、内容量推定へ与える影響を観点毎に分析する。

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いたMRシステムの構成を図1に示す。MRを実現するためのシステムとして、ビデオシースルー型HMD (Canon, HM-A1) およびMR空間構築プラットフォーム (Canon, MREAL) を用いた。また、被験者の頭部と実物体の位置姿勢情報を、磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) によって取得し、実物体上にCGを重畳描画した。

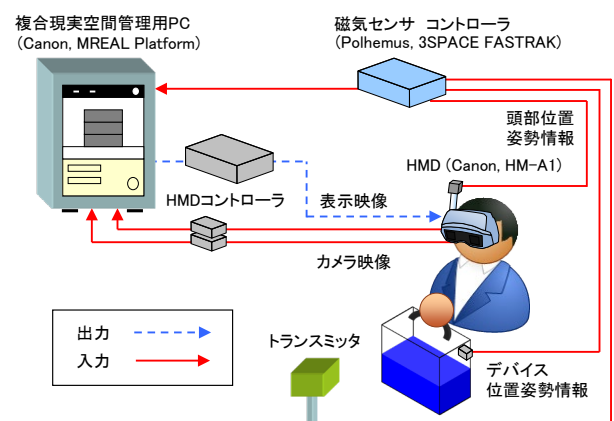


図1 システム構成

Fig.1 System Configuration

さらに、MR 空間を観察する際、単純に CG を重畳描画すると、CG が腕や手よりも手前に描画されるオクルージョン問題が発生する。この問題に対し、HMD キャプチャ画像から、肌領域の抽出とマスキングを行い、CG の位置関係に不整合が生じないように処理した。これを、解像度 1280×960 [pixel]、フレームレート 30 [fps] の環境にて実行し、被験者から時間遅れや遮蔽関係に関する違和感が無いことを確認した上で実験を行った。

また、水を入れた実物体の内容量を推定する際、内部から聞こえる水の音が、推定結果へ影響を与える可能性がある。そこで、密閉型ヘッドホン (Peltor, HTM79A) を用いてホワイトノイズを提示し、外部の音を遮断して実験を行った。また、水の音を聴取させる場合についても計測を行い、水の音を遮断する非聴取条件ではヘッドホンを装着させてホワイトノイズを提示し、水の音を聞かせる聴取条件ではヘッドホンを外して実験を行った。

【実物体】

水を入れる実物体については、厚さ 3mm のアクリル板を用いて、外寸が幅 $165\text{mm} \times$ 高さ $90\text{mm} \times$ 奥行き 80mm となる容器を作成し、上部に把手を取り付けた (350g)。そして、水をそれぞれ外寸の高さ 22.5mm (150g)、 45mm (400g)、 62.5mm (650g) の位置まで入れ、全体の質量が 500g 、 750g 、 1000g となる 3 種類の実物体を用意した。

最小内容量は、水の揺れを知覚できる最小の条件として設定し、最大内容量は、男女問わず片手で振ることが可能である最大の条件として設定した。また、被験者が実物体の内容量を視認できないように、実験時は容器の外側を黒色の画用紙で覆った実物体を把持させた (図 2)。

【CG 映像】

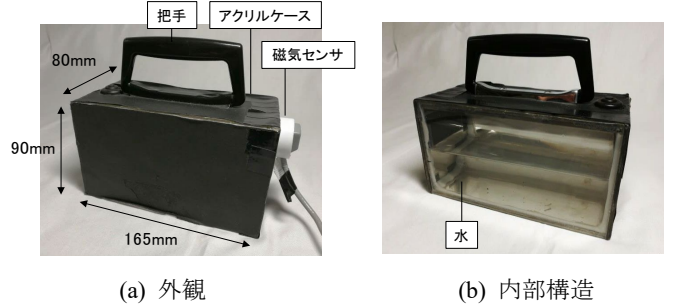
CG として提示する容器の寸法は、実物体と同じ大きさ (幅 $165\text{mm} \times$ 高さ $90\text{mm} \times$ 奥行き 80mm) とし、CG の水の内容量についても実物体と同様に、高さ 22.5mm 、 45mm 、 67.5mm の 3 種類とした。また、内容を回答させる上で、容器右面にゲージとなる CG を重畳描画した。これは、キーボードで上下に移動することができ、被験者は実験 2, 3 において、ゲージの高さを調節することで推定した内容を回答した。重畳描画した CG のうち、容器の液体は青、容器の内壁面は白、回答用ゲージは赤で着色されている (図 3)。

実験では、実物体を左右方向に振るという統制の下、しぶきや波のような詳細表現は行わず、液面を直線に近似して表現した。これにより、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おり、詳細な運動アルゴリズムについては先行研究を参照されたい⁶⁾。

また被験者は、目の前の机、その上に置かれた実物体、重畳描画された CG、そして自身の腕のみが視界に入った環境で実験を行った (図 4)。

3.3 評価方法

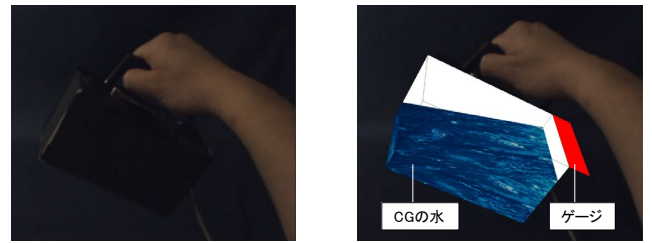
実験の評価方法として、被験者が推定した内容量そのものを評価する方法と、実物体の内容量と推定した内容



(a) 外観 (b) 内部構造

図 2 実験で使用した実物体

Fig.2 Real Object Used in Experiments



(a) CG 無し (b) CG 有り

図 3 実験で使用した CG 映像

Fig.3 Virtual Object Used in Experiments

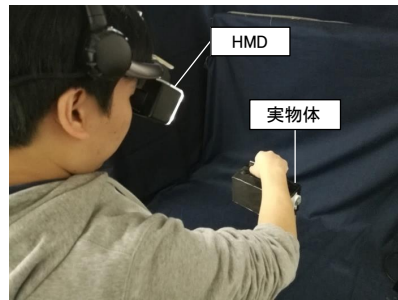
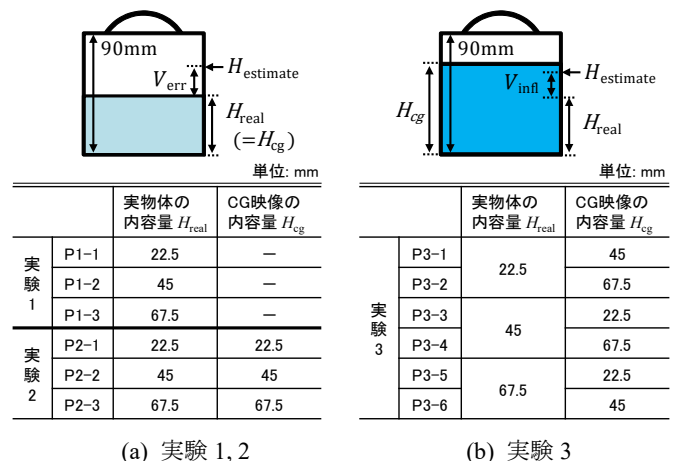


図 4 実験の様子

Fig.4 Experimental Scene



(a) 実験 1, 2 (b) 実験 3

図 5 実験の試行パターン

Fig.5 Experimental Patterns

量の差を評価する方法の両者で行った。なお本研究では、実物体の内容量に対して、被験者に実物体内の液面位置を推定させることで内容量の評価を行った。実験における試行パターンとその概念図が図 5 の通りで、後者の評価方法について、具体的に次の通り評価した。

まず実験1,2では、CG無し、または実物体と同一内容量のCGを重畳描画して内容量を推定する。そこで、推定した内容量に対する誤差の大きさ V_{err} を算出するために、式(1)の通り、実物体の内容量 H_{real} と推定した内容量 $H_{estimate}$ の差の絶対値を取ることで、推定の正確度を評価した(図5(a))。

$$V_{err} = |H_{estimate} - H_{real}| \quad (1)$$

一方で実験3では、実物体と異なる内容量のCGを重畳描画して内容量を推定する。そこで、CGの内容量 H_{cg} による影響の大きさ V_{infl} を算出するために、式(2)の通り、実物体の内容量 H_{real} と推定した内容量 $H_{estimate}$ の差を取ることで、CGの影響度を評価した(図5(b))。なお、実物体の内容量がCGの内容量より多い場合と少ない場合、各々の関係性に応じて評価を行っている。

$$V_{infl} = \begin{cases} H_{estimate} - H_{real} & (H_{cg} > H_{real}) \\ H_{real} - H_{estimate} & (H_{real} > H_{cg}) \end{cases} \quad (2)$$

4. 実験1：実物体の内容量推定に対する正確度の確認

4.1 実験目的

CGによる視覚的な内容量の変化が、内容量推定に与える影響を分析する上で、まずは被験者が内容量を液面位置で推定可能であるか、そして、どの様に実物体の内容量を推定するか確認する必要がある。また、水の音の有無による推定への影響も同様に確認する必要がある。そこで実験1では、CGを提示せず、かつ実物体内部が視認できない条件における内容量推定の正確度を確認する。

4.2 実験条件

実験1では、図5(a)に示す3種類の実物体の内容量を推定させた(P1-1 ~ P1-3)。被験者には水が入った実物体を振らせ、推定した内容量について、水面位置を実物体に直接指示して回答させた。

実物体の振り動作は左右方向とし、傾ける角度を左右約30度になるよう教示した。被験者の体位は直立状態、肘を約90度に屈曲させて実物体を振らせており、振る時間やリズムは自由とした。なお、実験1ではCGを重畳描画しないが、後の実験条件と統制を図るため、被験者にHMDを装着させた状態で推定させた。また、実験での試行を連続的に行うと、腕の疲労感によって知覚に影響を与える可能性がある。そこで、試行毎に腕の疲労感や違和感が無いかを確認した上で実施した。

実験の説明時には、指定された実物体の内容量を推定することのみを被験者に指示し、実験の目的や実物体の情報に関する告知は行っていない。また、内容量が異なる実物体を連続で振らせた場合、前試行の感覚を基準に内容量を回答する可能性があるため、試行間にはインターバルを設け、さらに1日につき1種類の内容量のみ試行した。なお試行毎に、実験者が実物体を入れ替える動作を行っており、推定する実物体が同じという前提情報を与えないよう配慮している。

聴覚に関する条件については、3.2節で述べた通り、ホワイトノイズをヘッドホンで聞かせて試行する非聴取条件に加え、実物体の振り動作によって生じる水の音を聞かせて試行する聴取条件でも計測を実施した。

4.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者にHMDとヘッドホン(非聴取条件のみ)を装着させる
- (2) 3種類の内容量の実物体から、1つをランダムに選択する
- (3) 被験者に実物体を持たせる
- (4) 実物体を振らせ、内容量を推定させる
- (5) 推定した内容量を、実物体に直接指示させる
- (6) 筋疲労による影響を排除するため、数分間のインターバルを設ける

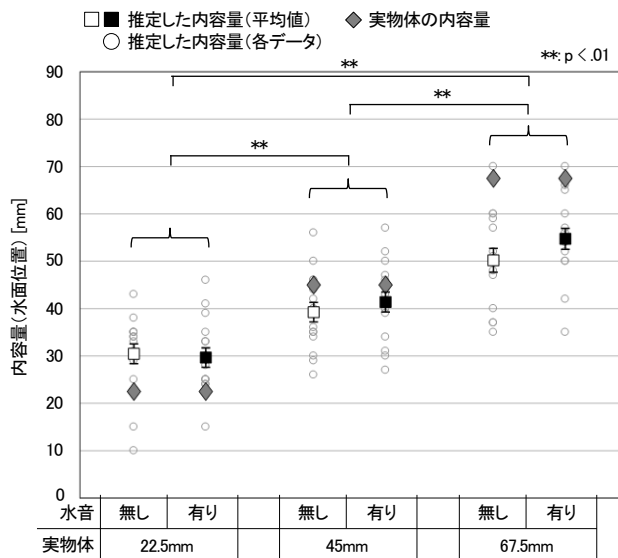


図6 実験1結果(各データと平均値)

Fig.6 Result of Experiment 1 (Individual Data and Average Value)

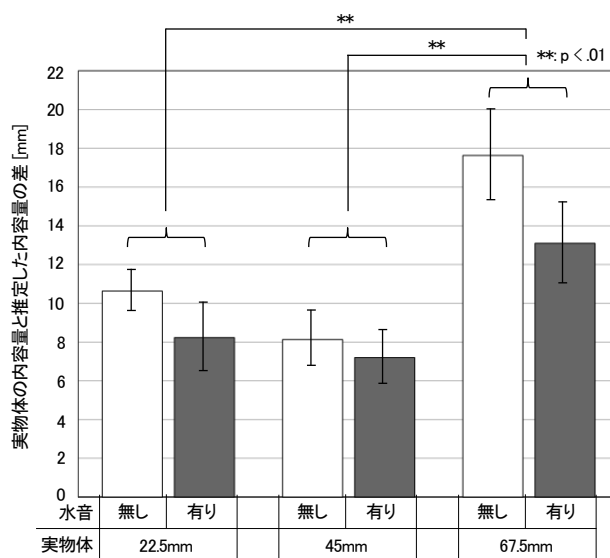


図7 実験1結果(誤差の平均値)

Fig.7 Result of Experiment 1 (Average Value of Estimation Error)

(1)～(6)の手順を、水音の聴取条件と非聴取条件にて実施し、各内容量に関して、1日以上の間を空けた上で繰り返し行った。被験者は成人15名(男性13名、女性2名、20代男女)で、全て右利きであり、試行回数は1名あたり3×2(実物体の内容量×音の有無)=6回である。

4.4 実験結果と考察

実験1の結果を図6,7に示す。図6は、3種類の実物体に対して、被験者が推定した内容量の各データと平均値を表している。図中にプロットされたマークは、◆が実物体の内容量、○が各被験者が推定した内容量(水面位置)、□と■が推定した内容量の平均値を示す。被験者が推定した内容量が、実物体の内容量(◆)に近いほど、推定の正確度が高いことを表す。図7は、式(1)に基づいて算出した、実物体の内容量と推定した内容量の誤差 V_{err} の平均値を示しており、値が小さいほど推定の正確度が高いことを表す。各図において、実物体の内容量・音の有無の組み合わせ毎に結果を記載している。なお、エラーバーは標準誤差を表している。

まず、図6の内容量の推定値について、実物体の内容量(3)×音の有無(2)の2要因分散分析を行った。結果として、交互作用に有意差は見られず、実物体の内容量による推定値への影響について、主効果に有意差が見られた($F(2,84)=49.34, p<.01$)。ここで、どの条件間に有意差があるかを確認するため、下位検定としてBonferroni法によって多重比較を行った結果、全ての内容量において1%水準で有意差が見られた。つまり、3種類の実物体について、推定した内容量にそれぞれ差があることが分かった。

また、図6の各データに着目すると、実物体の種類によって推定値に偏りが見られた。具体的に、内容量が少ない22.5mmの条件では、実物体の内容量をより多く推定する傾向にあり、音の条件に関わらず90%以上の被験者がその傾向にあった(非聴取条件:13/15名、聴取条件:14/15名)。反対に、内容量が多い67.5mmの条件では、実物体の内容量をより少なく推定する傾向にあった(非聴取条件:14/15名、聴取条件:14/15名)。液面位置が推定できなければ、外れた推定値が散見されることが考えられる。しかし、各実物体の内容量付近に推定値が分布しており、その値にも有意差が見られ、さらに被験者が回答を行う際にも円滑に回答できていたことを確認した。

続いて、図7の内容量の誤差について、同様に2要因分散分析を行った。結果として、交互作用に有意差は見られず、実物体の内容量による主効果に有意差が見られ、音の有無による主効果にも有意傾向が見られた(実物体の内容量: $F(2,84)=10.13, p<.01$, 音の有無: $F(1,84)=3.21, p<.1$)。主効果が見られた実物体の内容量に関して、Bonferroni法によって多重比較を行った結果、内容量22.5mmと67.5mm、45mmと67.5mmの条件間で1%水準の有意差が見られた。

図6,7の結果より、内容量の推定誤差が45mm,22.5mm,

67.5mmの順で増加していることが分かる。特に内容量67.5mmの条件では、他の条件と比べ顕著に誤差が出ることが確認でき、検定結果からもその傾向が見られた。一方で、内容量45mmの条件は誤差が最も小さく、内容量22.5mmの条件も45mmの条件より誤差は大きいものの、両条件間で有意差は見られなかった。内容量を推定する際は、実物体内部の水の動きを、振り動作によって生じる触覚の変化により捉えていると考えられる。内容量67.5mmの条件は、本実験の中で質量が最も大きく、慣性モーメントについても大きくなる。そのため、手や腕に掛かる力のモーメントが大きくなったことで触覚の感度が低下したことが考えられる。

さらに、聴取条件では非聴取条件と比べて、内容量を推定した際の誤差が減少していることが確認でき、検定結果からもその傾向が見られた。特に、内容量67.5mmの条件において減少の傾向が強くなり、正確度が低いほど水の音による影響がある可能性が示唆された。Plaisierらは、木製球が内部に入れられた実物体を振った際の音を收音し、それを被験者に聴取させることで、木製球の数を推定可能であることを示している^[13]。つまり、音の提示だけでも実物体の内容量を推定することが可能であり、本実験においても、水の音を聴取させることで内容量に関する知覚が補完され、推定値に影響を与えた可能性が考えられる。

5. 実験2: 実物体と同一内容量のCGの提示が内容量推定に与える影響の分析

5.1 実験目的

実験1では、CGを提示しない条件下で、内容量推定の正確度を確認した。ここで、実物体と同一内容量のCGを提示した場合、視覚的な影響に引きずられ、知覚される内容量の誤差が減少する可能性が考えられる。そこで実験2では、実物体と同一内容量のCGを重畳描画することで、実験1で確認した推定結果が、どのように変化するか確認する。

5.2 実験条件

実験2における実物体とCGの組み合わせパターンは図5(a)の通りで(P2-1~P2-3)、使用する実物体は実験1と同一となる。各実物体と同一内容量のCGを重畳描画した上で、非聴取条件と聴取条件の両条件で試行した。

本実験における内容量の回答方法として、仮想容器の右面に描画した赤いゲージを上下させ、推定した内容量を回答させる方法を取った(図3)。これは、実物体に重畳描画したCGに対して直接指示させた場合、CGに身体が被り、違和感の要因となることを避けるためである。なお、ゲージの上下による方法と直接指示させる方法で、推定した内容量に差異が無いことを事前に確認している。また、実物体とCGの内容量については、同じ/異なるといった事前情報は告知せず、指定した実物体の内容量

を推定することのみ指示した。その他の実験条件は、実験1で記載した条件に従う。

5.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者にHMDとヘッドホン（非聴取条件のみ）を装着させる
 - (2) 3種類の内容量の実物体から、1つをランダムに選択する
 - (3) 被験者にCGが重畳描画された実物体を持たせる
 - (4) 実物体を振らせ、内容量を推定させる
 - (5) 推定した内容量について、ゲージを上下させて回答させる
 - (6) 筋疲労の影響を排除するため、数分間のインターバルを設ける
- 実験1と同様 (1)~(6) の手順を、水音の聴取条件と非

聴取条件にて実施し、各内容量に関して、1日以上期間を空けた上で繰り返し行った。被験者は実験1と同じ15名で、試行回数は1名あたり3×2（実物体の内容量×音の有無）=6回である。

5.4 実験結果と考察

実験2の結果を図8, 9に示す。図8は、各被験者が推定した内容量の各データと平均値を表し、図9は、式(1)に基づいて算出した、実物体の内容量と推定した内容量の誤差 V_{err} の平均値を表している。各図において、指標が表す意味は実験1と同様で、実物体の内容量・CGの有無・音の有無の組み合わせ毎に、実験1の結果（CG無し）と対比させて記載している。なお、エラーバーは標準誤差を表している。

まず、図8の内容量の推定値について、実物体の内容量(3)×CGの有無(2)×音の有無(2)の3要因分散分

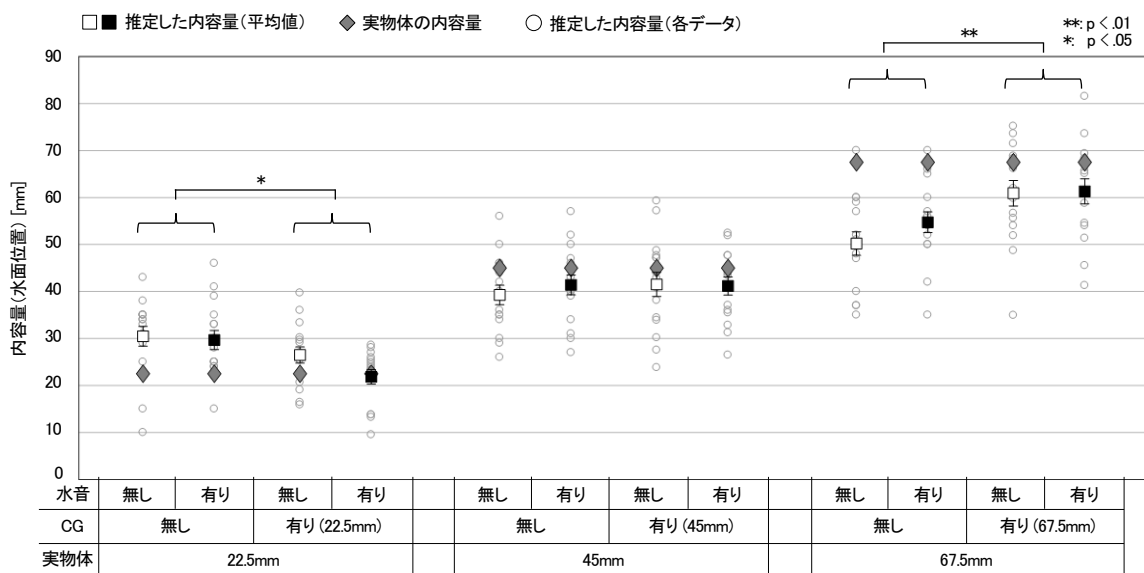


図8 実験2結果（各データと平均値）

Fig.8 Result of Experiment 2 (Individual Data and Average Value)

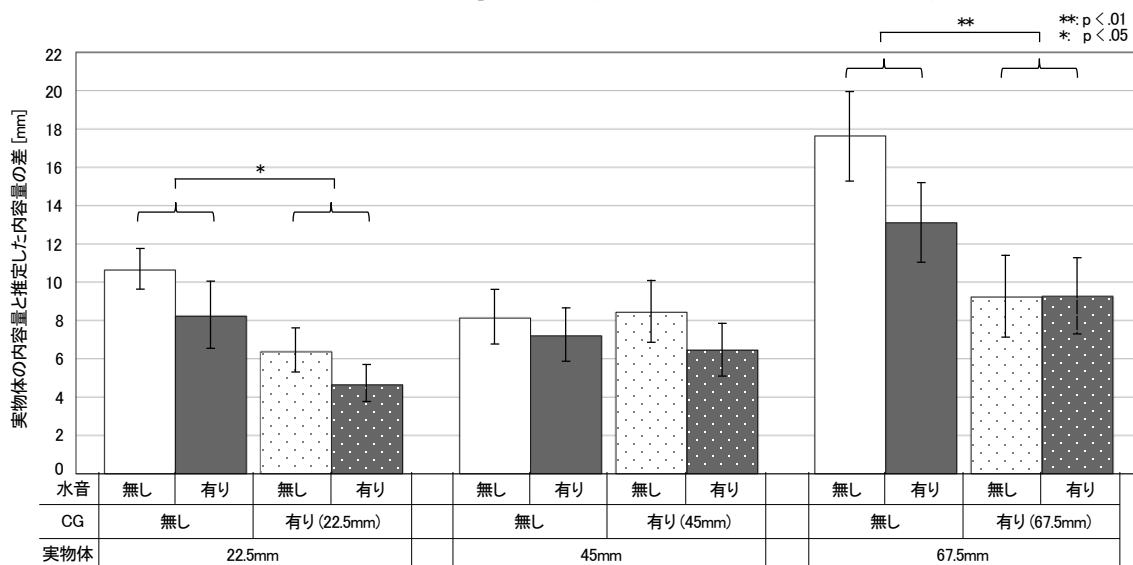


図9 実験2結果（誤差の平均値）

Fig.9 Result of Experiment 2 (Average Value of Estimation Error)

析を行った。結果として、2次の交互作用に有意差は見られず、1次の交互作用として実物体の内容量×CGの有無で有意差が見られた ($F(2,168)=10.14, p<.01$)。そこで、推定結果に対し、CGの有無における実物体の内容量の単純主効果検定を行ったところ、CG無し条件・有り条件、いずれも有意差が見られた (CG無し: $F(2,168)=48.11, p<.01$, CG有り: $F(2,168)=130.86, p<.01$)。また、下位検定として Bonferroni 法によって多重比較を行った結果、全ての内容量間において、1%水準で有意差が認められた。つまり、CGの有無に関わらず、推定した内容量に差異があることを確認できた。また、実物体の内容量におけるCGの有無の単純主効果検定を行ったところ、内容量45mmの条件では非有意となり、内容量22.5mm, 67.5mmの各条件において有意差が見られた (22.5mm: $F(1,168)=6.67, p<.05$, 67.5mm: $F(1,168)=14.30, p<.01$)。

続いて、図9の内容量の誤差について、同様に3要因分散分析を行った。結果として、2次の交互作用に有意差は見られず、1次の交互作用として実物体の内容量×CGの有無で有意傾向が見られ ($F(2,168)=2.99, p<.1$)、また、音の有無による主効果に有意傾向が見られた ($F(1,168)=3.73, p<.1$)。ここで、CGの有無における実物体の内容量の単純主効果検定を行ったところ、CG無し条件・有り条件、それぞれに有意差と有意傾向が見られた (CG無し: $F(2,168)=10.96, p<.01$, CG有り: $F(2,168)=2.36, p<.1$)。下位検定として Bonferroni 法によって多重比較を行った結果、CG無し条件では内容量22.5mmと67.5mm, 45mmと67.5mmの条件間で1%水準の有意差が見られ、CG有り条件では内容量22.5mmと67.5mmの条件間で10%水準の有意傾向が見られた。また、実物体の内容量におけるCGの有無の単純主効果検定を行ったところ、内容量45mmでは非有意となり、内容量22.5mm, 67.5mmの各条件において有意差が見られた (22.5mm: $F(1,168)=5.19, p<.05$, 67.5mm: $F(1,168)=12.62, p<.01$)。

実験1の結果と対比すると、内容量22.5mm, 67.5mmの条件において、CGの提示によって誤差が減少しており、上述の検定結果からも、その差が見られた。つまり、実物体と同一内容量のCGを提示することによって、内容量推定の正確度が向上することが示唆された。一方、内容量45mmの条件では、CGを提示した場合でも、誤差が減少する傾向は見られず、有意差も確認できなかった。本条件は実験1において最も推定誤差が小さく、正確度が高かったことから、CGの提示の有無に関わらず、実験1以上の誤差の減少が見られなかったと考えられる。

さらに音の有無によって、推定誤差が減少する傾向も検定結果からは見られ、実験1と同様に、聴覚情報が内容量の推定に寄与していることも確認できた。これらの結果より、主に触覚情報から内容量を推定していた実験1の結果に対し、同一内容量のCGを提示することで推定の正確度が向上し、さらに聴覚情報も影響を与えていることが示唆された。

6. 実験3：実物体と異なる内容量のCGの提示が内容量推定に与える影響の分析

6.1 実験目的

実験2では、実物体と同一内容量のCGを提示することで、内容量を推定した際の正確度が向上することを確認した。この結果から、内容量推定は視覚情報の影響を受ける傾向にあることが確認できた。ここで、実物体と異なる内容量のCGを提示した場合、視覚的な影響によって、同様に内容量の推定へ影響を与える可能性が考えられる。一方で、ヒトは物体を振ることによって、その性質を知覚できるため、異なる内容量のCGの提示をした場合、内容量推定への影響は見られない可能性もある。そこで実験3では、実物体と異なる内容量のCGを提示した際、どのように推定値が変化するか確認する。

6.2 実験条件と手順

実験3における実物体とCGの組み合わせパターンは図5(b)の通りで (P3-1~P3-6)、実物体とCGの組み合わせが変わる以外、回答方法や実験手順などは、実験2と同一である。被験者は実験1,2と同じ15名で、試行数は $3 \times 2 \times 2$ (実物体の内容量×CGの内容量×音の有無) = 12回である。

6.3 実験結果と考察

実験3の結果を図10(a)~(c)、図11(a)~(c)に示す。図10にプロットされたマーカは、◆が実物体の内容量、○が各被験者が推定した内容量 (水面位置)、□と■が推定した内容量の平均値、そして▲が提示したCGの内容を示す。被験者が推定した内容量が、CGの内容量 (▲) に近いほど、CGの影響を受けていることを表す。図11は、式(2)に基づいて算出した、実物体の内容量と推定した内容量の差 V_{diff} の平均値を表しており、値が大きいほど、CGの影響を受けていることを表す。各図において、実物体の内容量・CGの有無・音の有無の組み合わせ毎に結果を記載している。なお、エラーバーは標準誤差を表している。

まず、図10の内容量の推定値について、実物体毎にCGの内容量(3)×音の有無(2)の2要因分散分析を行った。結果として、全ての実物体において、交互作用に有意差は見られなかった。そこで、CGの内容量による推定値への影響について主効果を確認したところ、実物体の内容量22.5mm, 45mmの各条件において有意差が見られた (22.5mm: $F(1,56)=4.76, p<.05$, 45mm: $F(1,56)=23.78, p<.01$)。また、音の有無による主効果を確認したところ、実物体の内容量22.5mmの条件で有意差が見られた ($F(1,56)=7.07, p<.05$)。

続いて、図11の各実物体におけるCGの影響量について、同様に2要因分散分析を行った。結果として、全ての実物体において、交互作用に有意差は見られなかった。そこで、CGの内容量による推定値への影響について主効

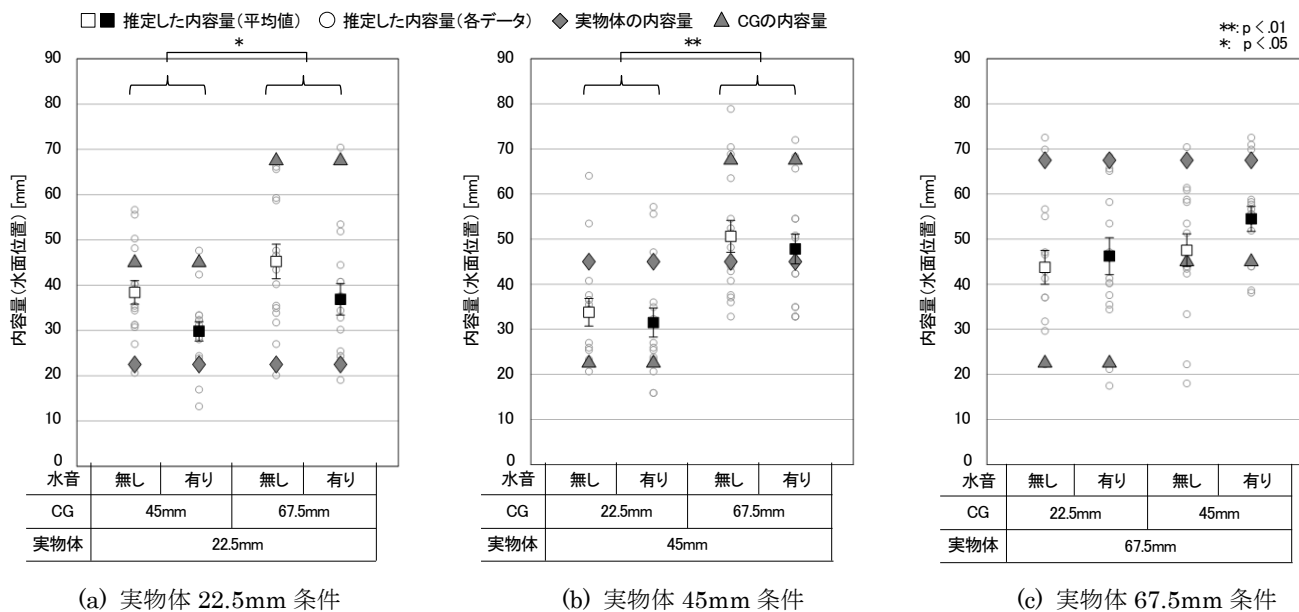


図 10 実験 3 結果 (各データと平均値)

Fig.10 Result of Experiment 3 (Individual Data and Average Value)

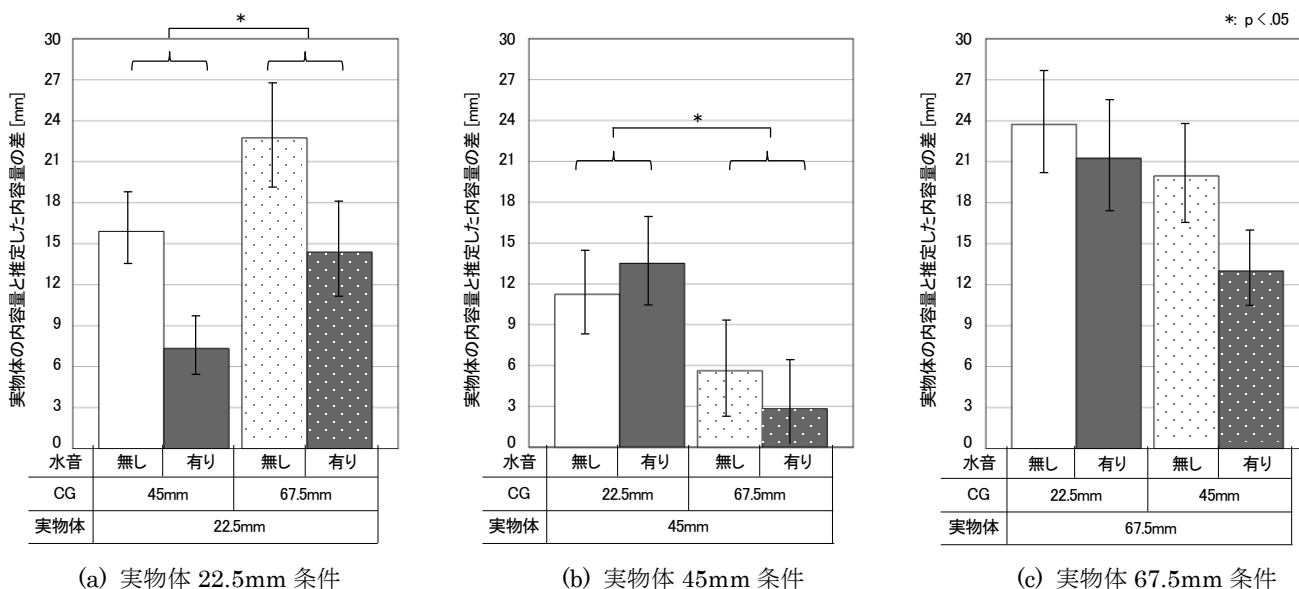


図 11 実験 3 結果 (CG による影響量の平均値)

Fig.11 Result of Experiment 3 (Average Value of Visual Influence)

果を確認したところ、実物体の内容量 22.5mm と 45mm の条件において有意差が見られた (22.5mm: $F(1,56)=4.76, p<.05$, 45mm: $F(1,56)=5.74, p<.05$). また、音の有無による主効果を確認したところ、実物体の内容量 22.5mm の条件で有意差が見られた ($F(1,56)=7.07, p<.05$).

これらのことから、実物体と異なる内容量の CG を提示することで、内容量の推定値に影響を与えることが分かった。特に、実物体の内容量 22.5mm, 67.5mm の非聴取条件では、その影響が顕著に表れており、実物体と CG の内容量の差が 22.5mm の条件 (実物体 22.5mm+CG 45mm / 実物体 67.5mm+CG 45mm) に着目すると、図 10 の平均値では CG の内容量付近に推定していることが分かる。また、内容量の差が 45mm の条件 (実物体 22.5mm+CG 67.5mm / 実物体 67.5mm+CG 22.5mm) では、内容量の差が 22.5mm の各条件より更に CG の影響が見られ、実物

体の内容量 22.5mm の条件では CG の内容量による有意差も確認できた。しかしながら、CG の内容量が倍量の増減をしたことで、推定される内容量も同等の増減がある傾向ではないことが分かる。MR 空間において、視覚情報が触力覚に影響を与え、さらに実際の触感と視覚の乖離が大きくなるにつれ、視覚の影響度が小さくなる傾向は、内容量という観点でも確認できた^[23]。

また、実物体の内容量 45mm の非聴取条件では、他の 22.5mm, 67.5mm の条件と比べ、CG による影響が小さい傾向にあることが分かる。上述した通り、実物体と CG の内容量差が 22.5mm の条件では、CG の内容量付近に知覚していた。このため、実物体の内容量 45mm の条件では、内容量 22.5mm, 67.5mm の CG を提示することで、同等の変化量となることが予想されたが、その傾向は見られなかった。

さらに、音の有無による影響については、実物体の内容量 22.5mm 条件のみ有意傾向であったが、聴取条件では非聴取条件と比べて、CG の影響度が低下傾向にあることが分かる。実験 1, 2 では、水の音を聴取させて内容量を推定することで、正確度が上がる傾向にあることを確認したが、実験 3 にて聴取させた水の音は、提示した CG の内容量と異なる音であり、この差異が推定の結果に表れた可能性がある。

7. むすび

先行研究では、剛体の実物体に対して、MR 技術によって CG の内容量を視覚的に変化させることで、重さ知覚の変化を確認した。これに対し本研究では、実際に水を入れた実物体に対して、CG の内容量を視覚的に変化させることで、水の内容量推定へ与える影響を分析した。実験では、水を入れた実物体に対する内容量推定の正確度を確認し、さらに様々な内容量の CG を重畳描画した際の影響を確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- (a) 実物体内部が視認できない状態で内容量を推定した場合、内容量が多い条件において推定の正確度が低下する。また、聴覚情報（水の音）を聴取しながら実物体を振ることで、推定の正確度が向上する。
- (b) 実物体と同一内容量の CG を重畳描画した場合、内容量推定の正確度が向上する。
- (c) 実物体と異なる内容量の CG を重畳描画した場合、視覚的な内容量に推定値が影響される傾向にある。ただし、内容量推定の正確度が高い実物体の条件や、聴覚情報の付与によって、視覚情報の影響が小さくなる傾向にある。

実験により、視覚情報が内容量の推定結果に影響を与えることが示された。さらに、聴覚情報を提示することによって、その影響を強めることや、弱めることも示唆された。これらのことより、実物体を変更せずとも、CG によって外観を変化させるだけで、多様な内容量表現が可能であることが分かった。

一方で、実験での効果は、水が入れられた実物体を把持し、左右に振る条件下で確認している。その他の錯覚に影響を与えるパラメータとして、実物体の体積や形状、把持条件などが挙げられる。今後は、各種条件が内容量推定に与える影響を系統的に分析していく予定である。

謝辞

本研究は、科研費・基盤研究 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] 「触覚とその応用特集号」, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 2, 2010.
 [2] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet:

“Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?,” *IEEE Virtual Reality* 2000, pp. 83 - 90, 2000.
 [3] T. Oshima, T. Kuroki, H. Yamamoto, and H. Tamura: “A mixed reality system with visual and tangible interaction capability - Application to evaluating automobile interior design,” *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* 2003, pp. 284 - 285, 2003.
 [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] 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.
 [7] 橋口哲志, 片岡佑太, 柴田史久, 木村朝子: “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”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No. 4, pp. 635 - 644, 2016.
 [8] H. Y. Solomon and M. T. Turvey: “Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects.,” *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 14, No. 3, pp. 404 - 427, 1988.
 [9] G. Burton, M. T. Turvey, and H. Y. Solomon: “Can shape be perceived by dynamic touch?,” *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 48, No. 5, pp. 477 - 487, 1990.
 [10] J. J. Gibson: “The senses considered as perceptual systems,” *Houghton Mifflin*, 1966.
 [11] E. H. Weber: “The Sense of Touch,” *Academic Press*, 1978.
 [12] P. Raghurir and A. Krishna: “Vital dimensions in volume perception: Can the eye fool the stomach?,” *Journal of Marketing Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 313 - 326, 1999.
 [13] M. A. Plaisier and J. B.J. Smeets: “How many objects are inside this box?,” *IEEE World Haptics* 2017, 2017.
 [14] A. Lécuyer: “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.
 [15] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: “Controlling fatigue while lifting objects using Pseudo-haptics in a mixed reality space,” *IEEE Haptics Symposium* 2014, pp. 175 - 180, 2014.
 [16] A. Iesaki, A. Somada, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: “Psychophysical influence on tactual impression by mixed-reality visual stimulation,” *IEEE Virtual Reality* 2008, pp. 265 - 267, 2008.
 [17] Y. Suzuki and J. Hyoba: “Effects of sounds on tactile roughness depend on the congruency between modalities,” *IEEE World Haptics* 2009, 2009.
 [18] A. Charpentier: “Experimental study of some aspects of weight perception,” *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
 [19] A. Krishna: “Interaction of senses: The effect of vision versus touch on the elongation bias,” *Journal of Consumer Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 557 - 566, 2006.

- [20] H.M. Lin: "Does container weight influence judgments of volume?," *Journal of Research in Marketing*, Vol. 30, No. 3, pp. 308 - 309, 2013.
- [21] S. Yabe, H. Kishino, T. Kimura, and T. Nojima: "Pseudo-haptic feedback on softness induced by squeezing action," *IEEE World Haptics 2017*, 2017.
- [22] 矢野博明, 伊川宏美, 亀田敏弘, 水谷孝一, 岩田洋夫: "AudioHapticsを用いた聴覚と力覚の感覚統合", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 241 - 248, 2004.
- [23] A. Nijima and T. Ogawa: "Influence analysis of visual stimuli on localization of tactile stimuli in augmented reality," *IEEE Virtual Reality 2012*, pp. 105 - 106, 2012.

(2018年8月8日受付, 2019年1月28日再受付)

著者紹介

片岡 佑太



2014年立命館大学情報理工学部卒。2016年同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院情報理工学研究科博士後期課程在学中。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。日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞を受賞。

奥川 夏輝



2018年3月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業。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。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。

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。立命館大学情報理工学部メディア情報学科特任助教を経て、現在、龍谷大学理工学部助教。博士(工学)。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。日本バーチャルリアリティ学会論文賞を受賞。

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。日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究委員会幹事。IEEE, 日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会等の

会員。日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞・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。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員。日本VR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を受賞。