基礎論文

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

木村 朝子[*1], 杣田 明弘[*2], 面迫 宏樹[*1], 柴田 史久[*1], 田村 秀行[*1]

Shape-COG Illusion: Psychophysical Phenomenon in Sense of Center-Of-Gravity Influenced by Mixed-Reality Visual Stimulation

Asako Kimura[*1], Akihiro Somada[*2], Hiroki Omosako[*1], Fumihisa Shibata[*1], and Hideyuki Tamura[*1]

Abstract – Mixed reality (MR) is the technology which merges real and virtual worlds in real-time. In MR space, a real object can be changed its visual appearance by superimposing a CG image (CGI) on it. Because it is said that the feeling of the weight is affected strongly by visual stimulation, we believe that it is affected similarly, in the case of presenting MR visual stimulation. If the behavior and extent of such an influence are well investigated, one real object can be perceived differently. In this study, we focus on the center-of-gravity (COG), and verify the influence of MR visual stimulation on sense of COG in MR environment. In this paper, we describe the systematic experiments of the influence. As the result, we obtained the interesting and promising result: (1) the sense of COG can be changed by MR visual stimulation, and (2) although the different feelings of COG between vision and sense of force, the feeling of COG can be represented by MR visual stimulation under certain conditions, (3) the influence from MR visual stimulation becomes smaller when COG positions of a real object and a CG image is distant.

Keywords: Mixed Reality, Center-of-Gravity, Illusion, Psychophysical Influence, Visual Stimulation.

1. はじめに

現実空間と仮想空間を継ぎ目なく実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; 以下MRと略す) 技術は, 人工現実感 (Virtual Reality; VR) の発展形であるが，従来の VR の限界を打破するものとの期待が大きく，最も活発な研究分野の 1 つとなっている[1]. 目の前の現実空間や共同作業者を視認しながら，重畳した仮想環境を実時間体験できる点で，ヒューマンインタフェース技術としても異彩を放っている.

我々はこの MR 技術を新しい情報提示技術ととらえ, その表現力向上に取り組んできた. なかんずく, MR 型視覚刺激や聴覚刺激が，触力覚に与える影響を分析することで，MR 型インタラクションの表現力や演出効果を高めることを目指してきた．今回，“Shape-COG Illusion”と名づけたものは，その中で見つかった興味深い現象である.

MR 研究やその応用の大半は，視覚的な MR の実現に向けられてきた．実物体や単純な触力覚デバイスに対して，CG 画像を重畳描画することで MR 空間において触覚を提示した試みもあるが[2]-[4]，これらはいずれも視覚的な MR の臨場感を向上させるための補助的な役割に留まっている．その理由は，視覚の MR と対称形をなす表現力豊かで汎用的な触力覚ディスプレイが存在しないためである.

人の触力覚は視覚からの刺激の影響を受けることが知られている．このため，視覚が触力覚に与える影響を分析し，限られた触力覚ディスプレイの能力を最大限に有効利用することが考えられる．こうした観点から，我々は MR 空間での視覚刺激（以下，MR 型視覚刺激）が触力覚に及ぼす影響を系統的に実験し，客観的な知見を得ることを目指してきた.

その第 1 歩として，実物体に同形状のテクスチャ画像を重畳描画する MR 型視覚刺激が触印象（特に「粗さの知覚」）に与える影響を実験・分析した[5]．この系統的な実験の結果，条件が合えば，実物体とは異なる材質の画像を MR 提示した場合，触覚的にもその素材感を与えることができるという知見を得た.

次なる興味は，見えているものと持っているものが異なる場合（例えば，玩具の銃に対し，近未来的な銃の CG 画像を重畳描画した場合[4])，人はどのように感じるかという疑問である．人がものを持つ際には，視覚によってあらかじめ把持する力を想定しているということが示唆されている[6]．このため，力覚の知覚に関しても視覚情報がかなり関与してくる可能性がある．そこで，本研究では MR 型視覚刺

*1 立命館大学大学院理工学研究科
*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
*2 現在, 株式会社デンソー
*2 Denso Corporation

激が力覚に及ぼす影響について分析・検討した．ものを持つ際には，質量による重さや，重心位置の違いによる形状に関する情報が得られるが，重心知覚に焦点を当てて系統的な実験を行ったところ，非常に興味深い結果が得られたのでそれを報告する．

2. 関連研究

重心知覚は,ダイナミックタッチという観点から,これまで主に心理学分野で研究が進められてきた[7]．ダイナミックタッチとは，筋感覚を含む運動性触覚のことで，例えば手に持った棒を振ることで，直接目で見ることなく棒の長さ（重心）を知覚できるというものである[8]．VR 分野などでは，触力覚刺激を付与することで，物体の長さや重さ知覚などに錯覚を生じさせる手法が検討されてきた[9][10]．しかし，視覚刺激が重心（長さ）知覚に与える影響については,これまであまり検討されてこなかった．

一方，MR 型視覚刺激による影響を検討した研究は我々の先行研究[5]以外にも既にいくつか行われている[11]-[13]. [11][12] は MR 環境での視覚刺激が触印象に影響を与えるという，[5]と類似した発想の研究であり，[13]では物体の曲率に着目した実験結果を示している．我々はまた[5]の発展形として聴覚刺激を援用した[14]も試したが，これらの研究はいずれも触覚（表面材質，詳細な形状の探索[15]）に焦点が当てられており，力覚に関しては検討されていない．

視覚刺激が力覚に与える影響に関する研究の代表例としては，Charpantier[16]が発見した錯覚現象“Size-Weight Illusion” がある．これは同一質量の物体が，その容積の大小に応じて，異なる重さに感じられる現象である．また，Rock ら[17]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したところ，大きく見えたキューブの重さを，より軽く感じることを示した．これは，同じ実物体を拡大鏡によって異なる重さと知覚していることから，純粋に視覚による影響を力覚が受けていることを示していると考える．更に近年では，VR 環境を利用した例も存在する[6][18]．中でも，金ら[6]は，力覚ディスプレイ“SPIDAR”を用いて“Size-Weight Illusion” の検証を行っている．これらの結果は，視覚刺激として CG 画像を対象とした場合にも，同様の錯覚現象が起こるという点において興味深い結果を示している．

これらの研究では，いずれも視覚的に形状を変化させることで力覚に影響を及ぼしている．これをふまえ，本研究では，把持部以外（以下，本体）が明らかに実物体と異なる形状の CG 画像を重畳描画することで，重量感を得るための要素である重心知覚が視覚に引きずられるかを実験する．しかし，前述のように，先行研究ではいずれも重さに焦点を当てた研究を中心に行われている．そのため，本研究では，MR 型視覚刺激が重心知覚に与える影響の有無を確認する基礎的な実験から始める．

3. 目的と実験準備

3.1 目的と実験対象

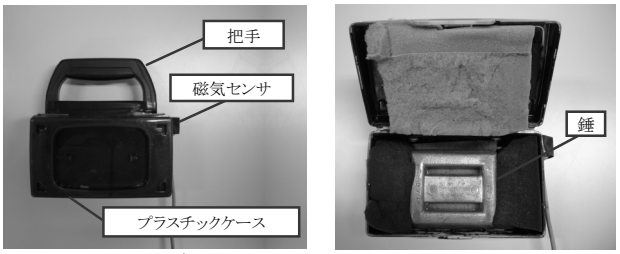
人はものを持ち上げることで重さを得，振ることで,重心を視覚だけでなく力覚的にも知覚している[7].

そのため，実物体に大きさ・形状の異なる CG 画像を MR 型視覚刺激として重畳描画した場合，重さに関しては，CG 画像によって覆われる部分に錘をつけることで,外観に応じた質量を調整可能である．しかし，重心に関しては，様々な形状の CG 画像を用いた場合,必ずしも視覚･力覚間で一致するとは限らない．そのため，実際に体感する重心位置と見た目から想像する重心位置の違いに違和感を持つと予想できる．

そこで，視覚刺激を援用することが考えられる．もし，“Size-Weight Illusion” のような現象が重心知覚にもあれば，CG 画像と実物体との重心位置が明らかに異なる場合でも，視覚に引きずられ，力覚的にも視覚にあった重心位置を提示することが可能であると考えられる．このような興味から，MR 型視覚刺激が重心知覚に与える影響について実験することとした．

ただし，提示する実物体や，CG 画像，把持方法なども重心知覚に影響することが考えられる．これらの複数の要因及び手段が重なった現象を観察し分析することは困難であるため，本研究では以下の場合に限って考えることとした．

(1) 使用する実物体は工業製品や鞄など持つものに広く使用されている「把手」を採用する（**図 1** (a)）.
(2) 実物体は CG 画像に覆われる把持部に錘を固定する（図 1 (b)）．これは，ある程度の重さがないとその CG 画像を持っている感覚が得られないためである．
(3) 容積の変化によって重さの印象を変化させない（Size-Weight Illusion を除外する）ために，CG 画像本体の容積は同じとし，縦横比の変化によって重心位置を変化させたものを用いる．
(4) CG 画像は縦横比を変えたもののほか,把手の位置を変化させたものについても対象とする．これにより，力のかかる向きと CG 画像の重心の位置がどのような影響を及ぼすか確認する．
(5) 把手を把持する方法は，トランクや鞄を持つような方法（以下，トランク型）と，カップやジョッキを持つような方法（以下，カップ型）が



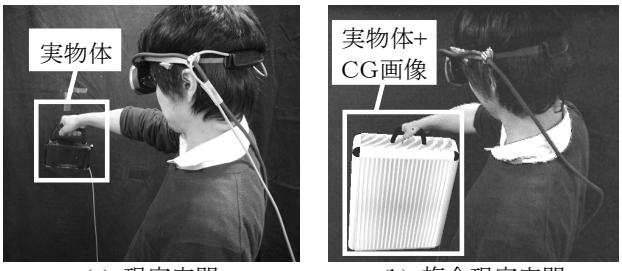
(a) 外観　(b) 内部

図 1　実物体
Fig. 1　Real Object



(a) トランク型　(b) カップ型

図 2　把持方法
Fig. 2　How to Grip



(a) 現実空間　(b) 複合現実空間

図 3　実験風景
Fig. 3　Experimental Scene

考えられる（**図 2**）．これらを対象とし，把持方法が重心知覚にどのような影響を及ぼすかについて確認する．

(6) 実物体を振る方法は，トランク型では，手首を支点として水平に振り，カップ型では垂直に振ることを対象とする．これは振っているという感覚を被験者に視覚的に実感させるためである．

3.2 実験準備

【実験環境】

実験風景を**図 3** に示す．実験で使用するシステムは，Canon 製ビデオシースルー型 HMD (Head Mounted Display) 及び MR Platform System である．被験者の頭部及び実物体の位置姿勢の取得は Polhemus 社の磁気センサ 3SPACE FASTRAK を使用する．HMD のカメラキャプチャ画像から肌色検出を行い，その領域を実時間で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している[5].

【提示する刺激】

実験では，様々な縦横比のものが存在することから，CG 画像の外観としてアタッシュケースを模したものを利用する．

触覚刺激として用いる把手は，実際に市販のアタッシュケースから取り外したものを用いる．さらにその下にプラスチックケースの箱（高さ 90 x 幅 155 x 奥行き 65 mm）を固定（図 1 (a)），中に錘を封入する（図 1 (b)）．把手の質量は 0.2 kg であり，錘の質量は 1 kg である．

表 1　実験で使用する CG 画像のサイズ
Table 1　Size of CG Images Used in Experiments

(a) 実験 1～3

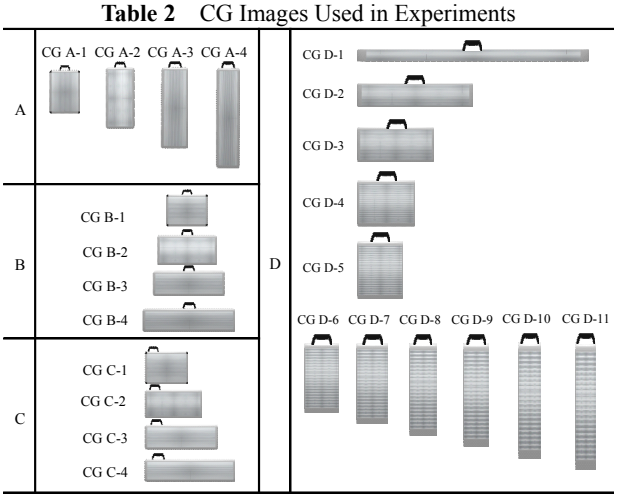
	幅 x 高さ
CG1	360 x 480
CG2	288 x 600
CG3	240 x 720
CG4	206 x 840

すべての CG の奥行きは 150（単位:mm）

(b) 実験 4

	幅 x 高さ
CG D-1	1000 x 50
CG D-2	500 x 100
CG D-3	333 x 150
CG D-4	250 x 200
CG D-5	200 x 250
CG D-6	166 x 300
CG D-7	143 x 350
CG D-8	125 x 400
CG D-9	111 x 450
CG D-10	100 x 500
CG D-11	91 x 550

表 2　実験で使用する CG 画像
Table 2　CG Images Used in Experiments



実験 1 から 3 での視覚刺激には，奥行き 150 mm で，縦横比（重心位置）が段階的に異なる 4 種類の直方体形状の本体を持つ CG 画像を用いる（**表 1** (a)）．これらは，実物体とは明らかに形状が異なり，かつ視覚的に長辺の長さの差が明確に分かる大きさにしている．更に，これら CG1～CG4 に対して，

A. 把手が中央にある
B. A とは本体部分を 90 度回転させたもの
C. B の把手が端の位置にあるもの

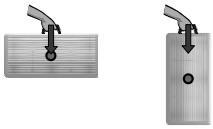
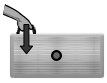
の 3 種類に把手の位置を変更し，計 12 (4 x 3) 種類の CG 画像を使用する（**表 2**）．

実験 4 での視覚刺激には，同じく奥行き 150 mm で，縦横比（重心位置）が段階的に異なる 11 種類の直方体形状の本体を持つ CG 画像を用いる（表 1 (b), 表 2）．

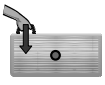
実験の手順と，各実験の実験対象，種類，条件を

表 3　実験概要
Table 3　Experimental Overview

予備実験

	実験1	実験2.1(a)	実験2.1(b)	実験2.2(a)	実験2.2(b)
使用するCG画像	Pair1 : CG A-1, CG B-1 Pair2 : CG A-2, CG B-2 Pair3 : CG A-3, CG B-3 Pair4 : CG A-4, CG B-4	CG A-1～4	CG C-1～4	CG A-1～4	CG C-1～4
把持方法	トランク型	トランク型	トランク型	カップ型	カップ型
現実空間					
複合現実空間					

本実験

	実験3.1			実験3.2			実験4
使用するCG画像	CG A-1～4	CG B-1～4	CG C-1～4	CG A-1～4	CG B-1～4	CG C-1～4	CG D-1～11
把持方法	トランク型			カップ型			トランク型
現実空間							
複合現実空間							

：手にかかる力の向き　●：CG 画像の重心

表 3 に示す．まず予備実験では「MR 型視覚刺激によって重心位置を錯覚することがありうるのか」「手に力のかかる向きと CG 画像の重心位置の関係，および把持方法が重心知覚の錯覚にどのような影響を与えるのか」を確認するための実験を行う．その上で，本実験では，実際には視覚・力覚間で重心位置が異なるにもかかわらず，MR 型視覚刺激によって重心位置を正しいと錯覚するための条件，および錯覚によりどの程度重心知覚のずれが発生するかを調べる．

4. 予備実験

まずは実物体と外観を変更することでどのように重心知覚に影響を及ぼすか確認する基礎的な実験を行う．具体的には，同一の実物体に対し視覚的に縦横比（重心位置）を変更することで，力覚的な重心知覚が視覚に引きずられることはあるかを調べる．まず，実験 1 で「MR 型視覚刺激によって重心位置を錯覚することがありうるのか」を確認し，実験 2 で「手に力のかかる向きと CG 画像の重心位置の関係」および「把持方法」に着目し，これらが重心知覚の錯覚にどのような影響を与えるのか確認する．

4.1 実験 1：把手の位置のみを変化させた場合

4.1.1 実験目的

次の条件下で，実際には同じであるはずの重心位置を MR 型視覚刺激によって異なると錯覚することがあるのか，ある場合はどのように錯覚するかを確認する．

・2 つの実物体の質量（計 1.2 kg）・重心位置は同じ
・重畳描画する CG 画像は，表 3 の Pair 1～4 の各組み合わせ
・把持方法はトランク型

4.1.2 実験内容

(1) 実験準備として，被験者が重心位置の違いを正しく判断できるよう，容積が同じで長さ（即ち，重心位置）の違う 2 つの物体（今回は折り畳み杖を伸ばしたものと，折りたたんだものを使用した）を提示し，振り比べることで重心位置の違いを体験・学習させる．
(2) 次に HMD を装着した被験者に対し，2 種類のアタッシュケースの CG 画像（Pair 1～4 の各組合せ）が重畳描画された実物体（図 1）2 組を順次手渡す．
(3) 被験者は両者を振り比べ(図 3),「どちらの方が，より手から遠い位置に重心があると感じるか（分からないという回答を許す)」を回答する．
(4) Pair 1～4 の MR 型視覚刺激に対して (2) (3) を繰り返し，実験後にコメントを聴取する．

以降，全ての実験で被験者は成人 13 名である．

4.1.3 実験結果と考察

結果を**図 4** に示す．図より全ての組合せで，実際には同じであるはずの重心位置を「異なるように感じる」という回答となった．特に Pair 2 は全被験者が「縦長の CG 画像の方が，重心位置がより下にあ

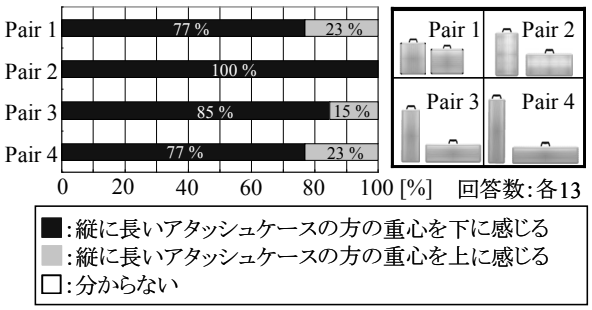


図 4　実験 1 結果
Fig. 4　Result of Experiment 1

るように感じる」と回答した．

実験後に聴取したコメントには「CG 画像の縦横の長さの差が大きい組合せほど重心位置の差を顕著に感じる」という意見が多かった．これより，

(i) 把持している実物体の重量・重心位置は同じであっても，重畳描画される CG 画像の重心位置が異なると，それを手に持ち，振ったときに重心位置が異なるように錯覚する傾向がある
(ii) 視覚的に重心位置に差があるペアのほうが，重心知覚に差があるように感じる傾向がある
(iii) 実物体と CG 画像の重心位置を極端に変えた場合，両者の重心位置とは全く違う位置に重心位置があるように知覚する場合もある

ということがわかった．(i) (ii) は我々が期待した結果である．しかし，(iii) については，当初「重心位置の差はわからない」という回答が増えると予想していた．その予想に反して「横長の CG 画像の方が重心位置を下に感じる」と回答する被験者が増える結果となった．

4.2 実験 2.1：段階的に縦横比が異なる場合 (1)

4.2.1 実験目的

実験 1 では，MR 型視覚刺激によって重心知覚に影響を与えることがわかった．次に，提示する MR 型視覚刺激と知覚される重心位置の関係を調べるために，以下に示す環境下で一対比較実験を行う．

・把持方法はトランク型
・2 つの実物体の質量 (1.2 kg)，重心位置は同じ
・2 つの同じ実物体それぞれに対して，
　CG 1～4 のうち 2 つをランダムに重畳描画

また，CG 画像の重心位置が力のかかる向きにある／ない場合の違いを確認するために，

実験 2.1 (a) 力のかかる向きに CG 画像の重心がある場合として，CG A-1～4 を提示
実験 2.1 (b) 力のかかる向きに CG 画像の重心がない場合として，CG C-1～4 を提示

する実験をそれぞれ行う．

4.2.2 実験内容

(1) HMD を装着した被験者に対し，無作為に選出した縦横比の異なる 2 種類の CG 画像が重畳描画された実物体（図 1）2 組を順次手渡す．

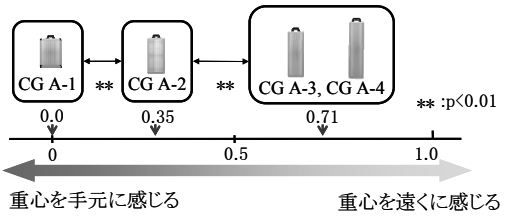


図 5　実験 2.1 (a) 結果
Fig.5　Result of Experiment 2.1 (a)

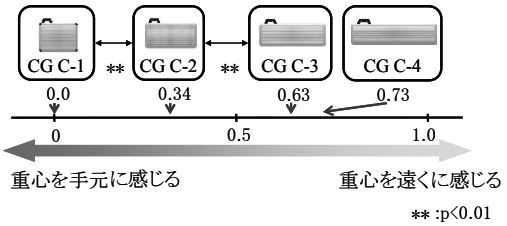


図 6　実験 2.1 (b) 結果
Fig. 6　Result of Experiment 2.1 (b)

(2) 被験者は 2 種類のアタッシュケースを振り比べ（図 3）「どちらの方が，より手から遠い位置に重心があると感じるか（違いが分からないという回答を許す）」を回答させる．
(3) 全ての組合せにおいて (1) (2) を行う．

この過程はシェッフェの一対比較法の手順に基づいており，得られた回答は同手法の検定法によって心理尺度として求められる．仮説通り，MR 型視覚刺激によって重心知覚が影響を受けるならば，ここで得られる心理尺度には何らかの偏りが見られるはずである．

4.2.3 実験結果と考察

結果を**図 5, 6** に示す．図中の数直線は CG 画像ごとに得られた心理尺度を示している．数直線上の矢印と数値はその上に書かれた CG 画像を実物体に重畳描画した際に被験者が感じた重心位置を示す．数値が大きくなるにつれ，被験者は実物体を重心が手から遠い位置にあると感じたことを示している．

図 5 より実験 2.1 (a) の結果は，CG A-1, 2 間と CG A-2, 3 間の心理尺度に有意水準 1%の有意差があり，CG A-1～3 では，仮説通り被験者の重心知覚が MR 型視覚刺激に大きく引きずられ，CG 画像の重心位置が視覚的に手元から離れているほど，力覚的にもそのように感じる傾向が見られた．また CG A-4 のように，実物体と CG 画像の重心位置が極端に異なる場合，重心知覚への影響が小さくなることも見て取れる．

また，図 6 より，実験 2.1 (b) もほぼ同様の結果が得られていることが分かる．

4.3 実験 2.2：段階的に縦横比が異なる場合 (2)

4.3.1 実験目的と内容

把持方法をカップ型に変更した場合，重心知覚に変化があるか確認する．手順は実験 2.1 と同様である．

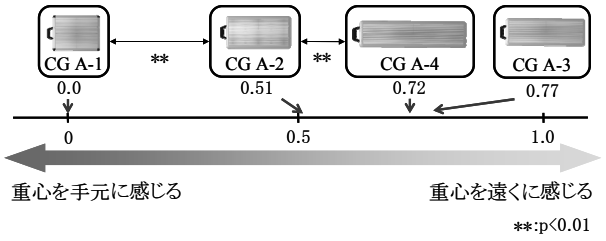


図 7　実験 2.2 (a) 結果
Fig. 7　Result of Experiment 2.2 (a)

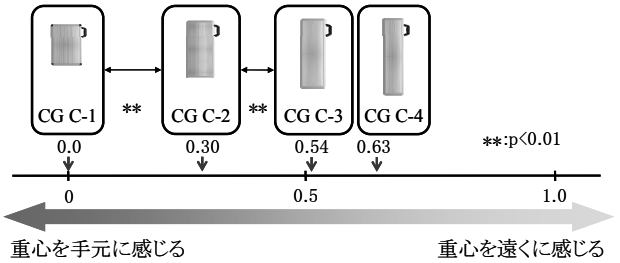


図 8　実験 2.2 (b) 結果
Fig. 8　Result of Experiment 2.2 (b)

4.3.2 実験結果と考察

結果を図 7，8 に示す．ここでも，CG C-1, 2 間と CG C-2, 3 間の心理尺度に有意水準 1%の有意差があり，実験 2.1 とほぼ同様の結果・傾向を確認した．

5. 実験

予備実験より，MR 型視覚刺激によって重心知覚が変化することが示された．そこで，本実験では以下の 2 点を調べる．

- 実際には視覚・力覚間で重心位置が異なるにもかかわらず, MR 型視覚刺激によって重心位置を正しいと錯覚する条件（実験 3.1, 3.2）
- 錯覚による重心知覚のずれの程度（実験 4）

5.1 実験 3.1：単純な形状の場合 (1)

5.1.1 実験目的

把持方法がトランク型の場合に，視覚・力覚間で違和感無く重心を提示することが可能な条件を調べる．この実験では，CG A-1～4, B-1～4, C-1～4 の CG 画像を使用する．各 CG 画像の特徴は以下の通り．

・CG A-1～4. 縦長で，力のかかる向きに重心がある
・CG B-1～4. 横長で，力のかかる向きに重心がある
・CG C-1～4. 横長で，力のかかる向きに重心がない

5.1.2 実験内容

(1) 実物体に CG A-1～4, B-1～4, C-1～4 の CG 画像から無作為に選出したものを重畳描画し，被験者に提示する．
(2) 被験者はそれを振り，見た目と重心位置が「合っている」「少し合っている」「違和感がある」の 3 段階で回答させる．
(3) 全ての CG 画像について (1) (2) を繰り返す．

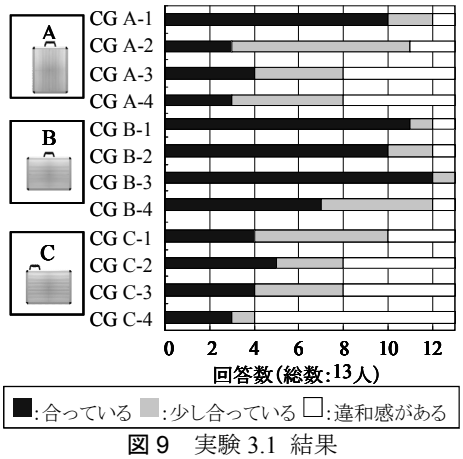


図 9　実験 3.1 結果
Fig.9　Result of Experiment 3.1

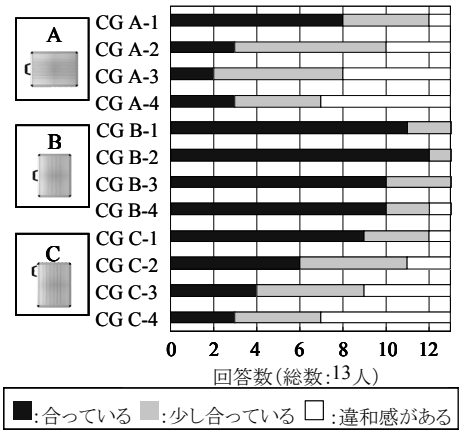


図 10　実験 3.2 結果
Fig. 10　Result of Experiment 3.2

5.1.3 実験結果と考察

結果を図 9 に示す. 図より, 以下のことが分かる.

(i) CG A-1 においてはほとんどの被験者が「合っている」と回答している
(ii) CG A-3, 4 のように, 縦にとても長い CG 画像で「違和感がある」という回答が増加している
(iii) CG B-1～4 の CG 画像においてほとんどの被験者が「合っている」と回答している
(iv) CG B-1～4 よりも CG C-1～4 が「違和感がある」という回答が多い

(i) は，CG 画像の重心位置が実物体と明らかに異なる場合でも，視覚に引きずられ，それらしい重心位置と知覚させることが可能なことを示唆している．(ii) は，高さが 90 mm の実物体に対して，幅が 720 mm や 840 mm の CG 画像を提示しており, 重心位置が極端に異なる場合は錯覚現象が起こりにくくなることを示している．しかし，このような場合にも 6 割を超える被験者が「見た目と重心位置が多少なりとも合っている」と感じている点は興味深い. (iii) からは，CG A-1, 2 よりも重心位置が近ければ，それらしい重心位置を得られるということ，横に長いといった重心以外の要素は，重心知覚にあまり関与していないことが分かる．また (iv) は，力のかかる向き

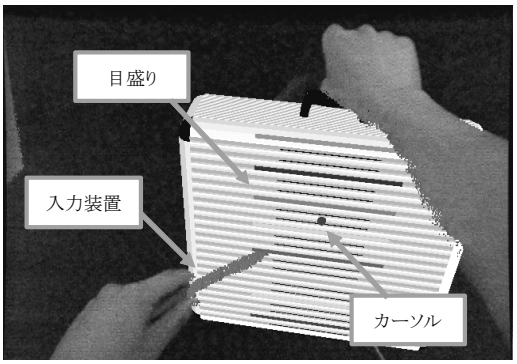


図 11　実験 4 の風景
Fig. 11　Experimental Scene in Experiments 4

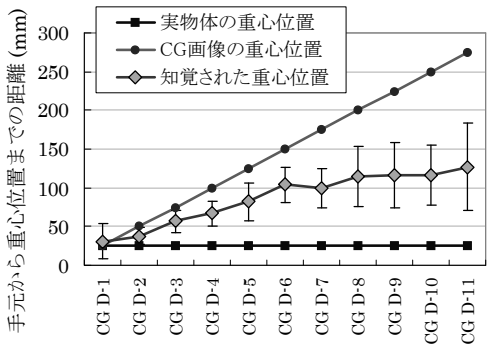


図 12　実験 4 結果
Fig. 12　Result of Experiment 4

に CG 画像の重心位置がない場合，錯覚現象が起こりにくくなることを示している．

5.2 実験 3.2：単純な形状の場合 (2)

5.2.1 実験目的と内容

次に，把持方法をカップ型に変更して実験 3.1 と同様の実験を行う．これにより，把持方法が重心知覚にどのような影響を及ぼすか確認する．

5.2.2 実験結果と考察

結果を**図 10** に示す．実験 3.1 と比較すると，以下のことが見て取れる．

(i) CG A-1～4 では，同様の結果が得られている
(ii) CG B-1～4, C-1～4 では，同様の結果が得られているか，「違和感がある」の回答が減少している

当初，トランク型よりもカップ型のほうが手首に負担がかかるため，結果が悪化すると予想していた．しかし，(ii) は，この予測とは異なっていた．この原因として，カップ型の持ち方をした場合に，長さの大小に関する情報が知覚しにくくなることが考えられる．実際，数名に実験 1 で使用した 2 つの杖をトランク型とカップ型で持ち方ごとに振り比べさせたところ，トランク型の方が長さの差が分かりやすいという回答が多く得られた．このことから，カップ型は長さの違いが分かりにくく，その結果トランク型以上に視覚に引きずられ，実験 3.1 とほぼ同等，あるいは「違和感がある」の回答が減少したのではないかと考えられる．

5.3 実験 4：知覚される重心位置の計測

5.3.1 実験目的

これまでの実験から，CG 画像の重心位置が下になるほど，それに引きずられ知覚される重心位置も下になると予想される．一方，予備実験 1 で実物体と CG 画像の重心位置を極端に変えた場合，両者の重心位置とは全く違う位置に重心位置があるように知覚される場合があった．そこで，ここではどの程度視覚に引きずられるのか，重心知覚錯覚の程度と範囲を定量的に調べることを目的とする．

5.3.2 実験内容

実験 4 では，重心位置が 25mm ずつ異なる CG D-1～11 の CG 画像（トランク型）を使用し，被験者が知覚した重心位置を直接指し示させる．まず，被験者は利き手で実物体を持ち，実物体を把持していない手でスタイラスを持つ．

(1) 実物体に CG D-1～11 の中から無作為に選出したものを重畳描画し，被験者に提示する．
(2) 被験者にそれを振らせ，重心位置を把握させる．
(3) 被験者が重心位置を把握したと答えると，その重心位置を忘れにくくするため CG 画像に目印として目盛りが表示される．さらにスタイラスの動きに連動して上下に移動するカーソルが表示され，被験者はスタイラスを動かすことで自身が知覚した重心位置を指し示す（**図 11**）．
(4) 全ての CG 画像について (1) (2) (3) を繰り返す．

5.3.3 実験結果と考察

結果を**図 12** に示す．図より以下のことが分かる．

(i) CG D-1 以外では，知覚される重心位置は，実物体と CG 画像の重心位置の間となる
(ii) 特に CG 画像の重心位置が 50～150mm の範囲内では，手元から CG 画像の重心位置までの距離が大きくなるほど知覚される重心位置も大きくなる
(iii) (ii) の範囲を超えると，知覚される重心位置の分散が大きくなり，値の変化量も小さくなる

(i)(ii)より，特定の範囲内では CG 画像の重心位置が下になるほどそれに引きずられ，知覚される重心位置もより下に移動することが分かった．一方 (iii) より，手元から CG 画像の重心位置までの距離がある値以上に大きくなると，重心知覚の個人差が大きくなり，重心知覚のずれも増加率が小さくなること，即ち MR 型視覚刺激による重心知覚への影響は，重心の位置と実際の重心が離れるほど小さくなることが分かった．また，CG D-1 では，殆どの被験者が正しい重心位置を知覚していたが，横幅があまりに大きいためか，実物体や CG 画像の重心位置よりも大きい（低い）位置を重心として知覚する被験者が若干名いた．

6. 実験結果・運用結果の考察

前章までの実験結果を分析・整理した結果，次の知見が得られた．

(a) 実験 1, 2 より, 同じ実物体に視覚的に重心位置の異なる CG 画像を重畳描画したとき，力覚的にも重心位置が異なって知覚されること，即ち，MR 型視覚刺激が重心知覚に影響を及ぼすことが示された．しかし,その程度は力のかかる向きと CG 画像の重心位置や把持方法によって異なる．

(b) 実験 3.1, 3.2 より，実物体とは明らかに形状が異なる CG 画像を提示した場合でも，視覚に引きずられ，視覚に合った重心を提示することが可能であることが分かった．ただし，極端に実物体とは形状の異なる CG 画像を提示した場合，および力のかかる向きに CG 画像の重心が無い場合には違和感が増すという顕著な傾向が見られた．

(c) 実験 4 より, MR 型視覚刺激による重心知覚への影響は，CG 画像と実物体の重心の位置が離れるほど小さくなるという傾向が見られた．また刺激間で重心位置の差が小さい範囲では，重心位置が視覚刺激と力覚刺激の重みつき和で知覚され，それ以降は力覚優位となる傾向が見られた．

異種感覚を統合する場合，複数の感覚による刺激の加算となる例が知られている[19][20]が，重心位置知覚に関しても，今回の実験条件下では同様の結果となった．ただし，本錯覚現象についてはまだ明らかになっていないことも多く，今後更なる研究が行われる中で，他の条件下でも同様の傾向となるのか調べていく必要がある．

本研究で得られた現象・知見は，筆者らの予想を大きく上回るものであった．少なくとも，先行研究[5][14]で観察されたよりも遥かに顕著な現象であった. この錯覚現象を広く一般に体験してもらうため，2009 年 3 月 5 日に情報処理学会「インタラクション 2009」（於学術情報センター）のインタラクティブ発表で展示を行い，約 100 名の参加者が体験するところとなった．内容は実験 1 とほぼ同じだが，本研究の趣旨を説明した上で体験を行う点が異なっている．即ち，参加者は展示概要説明で内容を知り，同一物体に錯覚が生じることを知った上で，予備知識と期待をもって長い列で順番待ちをしたことになる．

体験後の感想を，アンケート記入と口頭での聴取により求めたが，その結果は以下の通りである．

①横長物体より縦長物体の重心が下に感じた　75%
②横長物体より縦長物体の重心が上に感じた　3%
③両者の違いが分からなかった　22%

この展示体験は，第 5 章で記した実験ほど系統的かつ再現性があるものではないが，興味深い意見が聴取できたので，分析結果を付して記す．

・4 人に 3 人の体験者が予想通りの錯覚を感じた．その比率は，我々の実験室内での結果よりやや悪いが，事前に画期的な錯覚現象が見られるとの過剰な期待をもって臨んだ体験者には，想像したほどの現象ではなかったのだと解釈できる．

・一方,「本当か訝りながらも体験したが，明らかに重心位置が異なって感じた」と答えた体験者が多かった．中には「絶対同じ実物体ではない」「アクチュエータを使用しているかと思う位の差を感じた」とまで断言する体験者もあった．予見した上でここまでの意見が出るということは，個人によっては，相当大きな錯覚を感じていることを意味している．

7. むすび

本研究では，実物体に明らかに異なる形状の CG 画像を重畳描画することで，重心知覚にどのような影響を与えるかを系統的な実験を行った. その結果，CG 画像の形状によっては，重心位置の知覚に錯覚現象（Shape-COG Illusion）が生じることが確認できた．この錯覚はあらゆる状況で起こるわけではないが，MR 型視覚刺激をうまく利用できれば，限られた実物体を別の重心位置をもつ物体と思わせることができることを意味している．この実験結果は１つの客観的事実であり，錯覚の存在を証明したという点で価値があると考えている．

この研究より, 幾つかの興味深い知見が得られた．しかし，本実験で用いたパラメータ以外にも重心知覚に影響を及ぼす要素は他に存在することが考えられる．そのため，今後は様々に条件を変えながら客観的な実験を積み重ねていく予定である．例えば錘の位置や重さについて，今回は把手のすぐそばに錘を配置したが，この配置を少し変えるのみで重心知覚に物理的な差以上の大きな影響を与える可能性もあるのではないかと予想している．また，様々な重さの錘を利用し，重さを変化させた際に，重心知覚へどのような影響を及ぼすかについても，引き続き実験を行っていく予定である．さらに，この Shape-COG Illusion は MR 環境でのみ起こる現象なのか，実環境や VR 環境でも起こるのかについても今後確認していく必要がある．これらに関しては稿を改めて報告したい．

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] “「複合現実感 1～4」特集”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌（VR 論）, 1999, 2002, 2005, 2008.
[2] 大島登志一, 山本裕之, 田村秀行, “実体触知機能を

重視した複合現実感システムー自動車インテリア・デザイン検証への応用ー”，同上, Vol. 9, No. 1, pp. 79 – 87, 2004.
[3] 石黒祥生, 大槻麻衣, 比嘉恭太, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行, “Watch the Birdie!ー三感融合型複合現実感アトラクション”，同上, Vol. 12, No. 3, pp. 259 - 268, 2007.
[4] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama, “Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 64 - 70, 2001.
[5] 家崎明子, 杣田明弘, 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”，VR 論, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
[6] 金載烋, 洪性寛, 佐藤誠, 小池康晴, “SPIDAR を用いた size-weight illusion の検証”，同上, Vol. 7, No. 3, pp. 347 - 354, 2002.
[7] 佐々木正人, 三嶋博之, “アフォーダンスの構想―知覚研究の生態心理学的デザイン”，東京大学出版会, 2001.
[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] H. Y. Yao, V. Hayward, “An Experiment on Length Perception with a Virtual Rolling Stone,” Proc. EuroHaptics Int. Conf. 2006, pp. 275 - 278, 2006.
[10] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲, “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”, VR 論, Vol. 13, No. 1, pp.15 - 24, 2008.
[11] 中原守勇, 北原格, 亀田能成, 大田友一, “複合現実感における視触覚融合による素材感呈示”，2006 信学総大, p. 157, 2006.
[12] 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素材感提示に関する実験的検討”，第 12 回 VR 学大, pp. 103 - 106, 2007.
[13] 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”, VR 論, Vol. 13, No. 1, pp. 25 - 36, 2008.
[14] 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 ー産業応用システムでの利用を想定した評価 ー”, VR 論, Vol. 14, No. 3, pp. 325 - 333, 2009.
[15] S. J. Lederman, R. L. Klatzky, “Extracting object properties through haptic exploration,” ActaPsychologica, Vol. 84, pp. 29 - 40, 1993.
[16] A. Charpentier, “Experimental study of some aspects of weight perception,” Archives de Physiologie Normales et Pathologiques, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
[17] I. Rock, C. S. Harris, “Vision and touch,” Scientific American, Vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.
[18] 大竹理香, 原正之, 黄健ほか, “ハプティックインタフェースを用いた力感覚と錯覚現象の計測”，計測自動制御学会論文集, Vol. 43, No. 8, pp. 699 - 701, 2007.
[19] 彦坂和雄, “脳における異種感覚の統合様式”，電子情報通信学会誌, Vol.76, No.11, pp. 1190 - 1196, 1993.
[20] 高橋康介, 齋木潤, “視覚触覚統合による物体変形量の知覚: 感覚間時間遅延の効果”，信学技報, Vol. 105, No. 682, pp. 1 - 6, 2006.

(2010 年 12 月 15 日受付)

［著者紹介］

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．博士（工学）．複合現実感，ハプテックインタフェース等の研究に従事. 本学会論文賞, 学術奨励賞, 情報処理学会山下記念研究賞等受賞．

杣田 明弘 （非会員）



2007 年立命館大学理工学部情報学科卒．2009 年同 大学院理工学研究科博士前期課程修了．同年 4 月，(株）デンソー入社．2006 年より 2009 年 3 月まで，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．第 71 回情報処理学会全国大会大会優秀賞，インタラクション 2009 インタラクティブ発表賞受賞．

面迫 宏樹 （非会員）



2011 年立命館大学理工学部情報学科卒．現在，立命館大学大学院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力覚印象に与える影響に関する研究に従事．

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．現在，同 情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授．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．本学会論文賞，学術奨励賞受賞．

田村 秀行 （正会員）



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．現在，同 情報理工学部メディア情報学科教授．工学博士．1997 年より 2001 年まで, MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．本学会元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」（オーム社）など．電子情報通信学会フェロー，IEEE, ACM，情報処理学会，人工知能学会, 映像情報メディア学会等の会員. 情報処理学会論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞．