

# Dent-Softness Illusion : 複合現実型視覚刺激による 硬さ知覚への影響

平野 有一<sup>\*1</sup>, 木村 朝子<sup>\*1</sup>, 柴田 史久<sup>\*1</sup>, 田村 秀行<sup>\*1</sup>

## Dent-Softness Illusion : Psychophysical Influence on Sense of Hardness by Mixed-Reality Visual Stimulation

Yuichi Hirano<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*1</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, and Hideyuki Tamura<sup>\*1</sup>

**Abstract – In mixed reality (MR) environment, an appearance of touchable object can be changed by superimposing a computer generated image onto it (MR visual stimulation). Meanwhile, when human sense a hardness of real object, it is known that the perception is influenced by not only tactile information but also visual information. In this paper, we studied psychophysical influence on sense of hardness by using a real object which is superimposed by a computer generated image (CGI). In this experiment, we deform the CGI animation on the real object extremely, while the subject pushes the real object by his/her finger. As the results of the experiments, it found that human subjects sensed different hardness by emphasizing dent deformation of the CGI animation.**

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

### 1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術の特徴として、現実世界に存在するものをそのまま利用し、それに付加したい情報だけを電子的に生成・融合することで、本物の触感を得つつ、そこに視覚的にのみ電子的なデータを重ね合わせることができることが挙げられる。この時、見ているものと触っているものの材質や変形の仕方が違っていると、人はどのように感じるのかという疑問が生じる。単に違和感があるだけかもしれないが、視覚に引きずられて触覚が影響を受け、ある種の錯覚が起こるとすることも考えられる。ならば、その影響がどのような場合に起こり、どのような振る舞いをするか調査することは科学的に極めて興味深い。

これまで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を用い、視覚的にCG画像を重畳描画することでMR空間において触覚を利用した試みもある[1]-[3]が、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。一方、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。そこで我々はMR環境における実物体の外観変化(MR型視覚刺激)が触印象に与える影響について系統的に実験を行ってきた。

我々はその第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[4][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。次に、実物体に重心位置の異なる仮想物体を重畳描画するMR型視覚刺激が重心知覚に与える影響を実験分析し、顕著な現象を確認したため、これを“Shape-COG Illusion”と命名した[6]。

第3の試みとして、我々は硬さ知覚に注目し、MR型視覚刺激による外観変化が硬さ知覚に影響するかを確認する。本論文では、まず視覚刺激を変えることで、同じ硬さの実物体をより硬く、または軟らかく錯覚するのかを確認し、その際の硬さ知覚の弁別閾を求めた。次に、異なる硬さの実物体に対して、視覚的に硬さが逆転するようなMR型視覚刺激を提示した場合に、硬さ知覚の逆転現象が起こるのかを確認する実験を行う。以下、本稿ではこれらの実験、結果、考察に関して述べる。

### 2. 関連研究

物体の硬さに対するヒトの認知特性に関しては、これまでに認知メカニズムの解明や弁別特性の調査など、多くの研究が進められてきた[7][8]。中でも、Srinivasanらは視覚と力覚による提示硬さを矛盾さ

\*1 立命館大学大学院理工学研究科

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

せた場合に注目し、硬さ知覚においては視覚が優位であると報告している[9].

他方、近年視覚刺激を活用することで擬似的に触力覚を錯覚させる Psuedo-Haptics の研究が活発化している[10]. Psuedo-Haptics とは、身体の動きに応じて視覚刺激をコントロールすることによって、知覚される触力覚を擬似的に変化させることができるというものである。例えば、Biocca らは VR 環境下で被験者が仮想物体を指でつまんで移動させる際、触力覚装置を用いていないにも関わらず、ある種の抵抗を感じたと報告している[11]. また、立藪らは触力覚提示装置 PHANToM とディスプレイを用いて Psuedo-Haptics による硬さ知覚への影響について調査している[12].

このような視覚刺激による錯覚効果を生かし、触力覚提示装置に視覚刺激を効果的に付与することで、硬さの識別率や遅延の問題を擬似的に補おうとする研究がいくつか行われている。佐々木らは力覚提示装置（グローブ型）を用い、物体を押し込んだときの変位量を改変（強調）した CG を目と指先の間に配置した液晶モニタに提示することにより、力覚提示装置の硬さ提示能力が向上することを示した[13]. また大西らは、触覚情報の提示に触力覚提示装置 PHANToM、視覚情報の提示に液晶モニタを利用し、視覚情報を触力覚情報に対して遅延させると、遅延のない場合よりも硬く知覚されると報告している[14]. また、Knorlein らは触力覚情報提示に PHANToM、視覚情報の提示にヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) を利用して大西らと同様の実験を行い、同様の結果を得たと報告している[15].

これらの研究では、触力覚提示装置に対して視覚刺激を付与している。これに対して我々は、MR 技術を利用することで、実物体そのものに視覚刺激を付与した場合、すなわち現実世界に存在するものの触感を得つつ、付加したい情報だけを電子的に融合した場合について検討する。

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[4]-[6]以外にも既にいくつか行われている。例えば、中原らは 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[16]. しかし、MR 型視覚刺激を提示した際の硬さ知覚に関する錯覚現象についてはこれまで検討されてこなかった。

そこで本研究では、体験者が本物の触感を得て、自身の手指を見ながら操作できる環境下で、硬さ知覚に錯覚が起こりうるかについて検証する。

### 3. 目的と実験準備

#### 3.1 目的と実験対象

人はものを手指などで押し込むことで、対象の硬さを視覚・力覚の双方から知覚している。しかし、実物体に凹み方の異なる CG アニメーションを MR 型視覚刺激として重畳描画する場合には、必ずしも視覚・力覚間で硬さが一致するとは限らない。そのため、実際に体感する硬さと見た目から想像する硬さ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”や“Shape-COG Illusion”のような錯覚現象が硬さ知覚にもあれば、CG アニメーションの見た目の硬さと実物体の硬さ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硬さ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 型視覚刺激が硬さ知覚に与える影響について実験することにした。

ただし、提示する実物体や、CG アニメーション、押し込み方なども硬さ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などにも広く使用され、形状が単純で様々な硬さが存在するという理由からウレタンフォームを採用する
- (2) 押し込み方法は、対象を上から押す、挟み込んで押すなどの方法が考えられるが、今回はまず実物体を上から押す方法を対象とする
- (3) 提示する MR 型視覚刺激 (CG アニメーション) は、指で押し込んだ部分が凹み、その周りが反り上がるという形状の変形を対象とする

以上のような条件のもと、まず予備実験では、同一の実物体に対して凹み方の異なる仮想物体を重畳描画することで、物理的には同じ硬さであるにもかかわらず、より硬く、またはより軟らかく知覚されることがあるのかを検証する。その上で、本実験では、まず、実験 1 で MR 型視覚刺激を変化させた際の硬さ知覚の弁別閾を調べ、さらに実験 2 で異なる硬さの実物体に対して、視覚的には硬さが逆転するような CG アニメーションを MR 型視覚刺激として提示した場合に、硬さ知覚の逆転現象が起こるのかを確認する実験を行う。

#### 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。被験者は Canon 社製のビデオシーンスルー方式 HMD VH-2002 を装着し、両眼立体視しながら MR 空間を観察する。被験者の頭部の位置

姿勢情報検出には Polhemus 社製磁気センサ 3SPACE FASTRAK を使用する。実験対象となる実物体の位置・姿勢は事前に計測しておく。

実験では、被験者が実物体を指で押し込む深さ（量）に応じて、仮想物体が凹む様子を提示する。この押し込み量を数値として取得するために、実物体には浅草ギ研製の曲げセンサ AS-BEND を取り付ける。曲げセンサは、ウレタンフォームの表面中央部に固定し、どの被験者も常にセンサの同じ位置を押し込むよう、曲げセンサの中央にあたる部位に印をつけている（図 3）。

また、MR 空間を構築する際、現実世界からキャプチャした画像に仮想物体（CG）を単純に重畳描画したのでは、仮想物体が常に実物体の前に描かれる。そのため、重畳描画の対象である実物体だけでなく、自分の手など対象外の実物体も仮想物体によって覆われてしまうというオクルージョン問題が生じ、物体を触っているという感覚が得にくくなる。そこで、本研究で用いる HMD がビデオシースルー方式であることを利用して、キャプチャ画像から肌色抽出を行い、その領域を実時間でマスキングすることで、手領域に仮想物体が重畳描画されないようにしている（図 4）。

【提示する刺激】

実物体として使用するウレタンフォームは、幅 210×奥行 105×高さ 50 mm で、中指で押して明らかに硬さの異なる 3 種類（株式会社 INOAC 製）を採用した。表 1 に、各ウレタンフォームの密度・硬さを示す。本論文では、より硬いウレタンフォームから順に、Urethane 1, 2, 3 と呼ぶこととする。

ウレタンフォームのような弾性物は、強く押し込むほど反発力が大きくなり、硬く感じるという特性がある。そのため、試行毎に押し込み量が一定でなければ、押し込み量の差が硬さ知覚に影響を及ぼす恐れがある。そこで、各ウレタンフォームについて硬度計で表 1 に示す硬さが計測される深さまで押し込むとビープ音が提示されるように設定しておき、被験者にはビープ音が鳴るまで押し込み、ビープ音が鳴ったら押すのをやめるよう指示する。この際、各ウレタンフォームでビープ音が鳴る押し込み深さは表 1 に示すとおりである。

視覚刺激には、実物体同様、幅 210×奥行 105×高さ 50 mm の本体を持つ CG モデルを用いる。この CG モデルは、白色の 3D モデルにスムーズシェーディングをかけたシンプルなものであり、体験者は立体視、陰影、形状変化から対象の立体形状を把握することができる。体験者が実物体上部を押し込むと、そこに配置された曲げセンサの値  $bend(t)$  に応じて仮想物体上部の対応する部分が  $h(t)$  だけ凹み、その周辺が  $h(t)$  反り上がるアニメーションを表示する

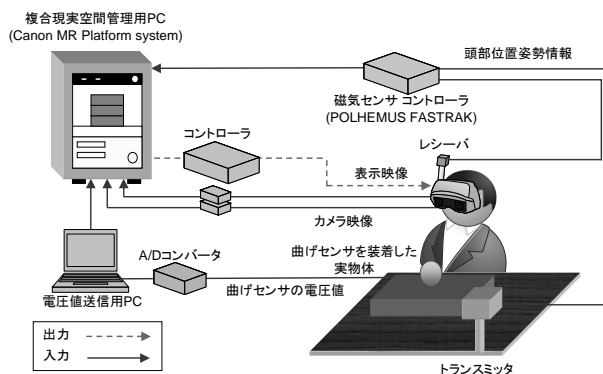


図 1 システム構成  
Fig. 1 System Configuration

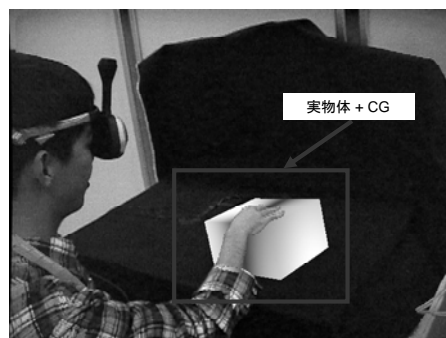


図 2 実験風景  
Fig. 2 Experimental Scene

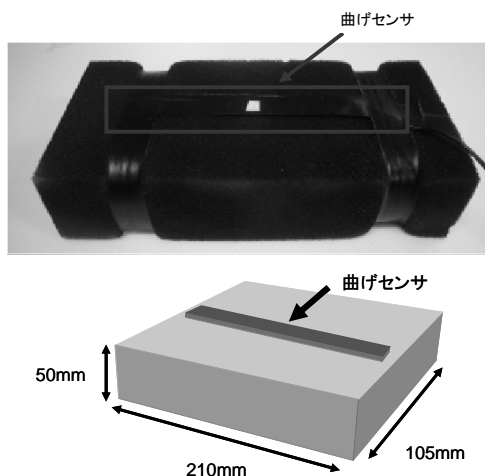


図 3 実験で使ったウレタンフォーム  
Fig. 3 Urethane Used in Experiments

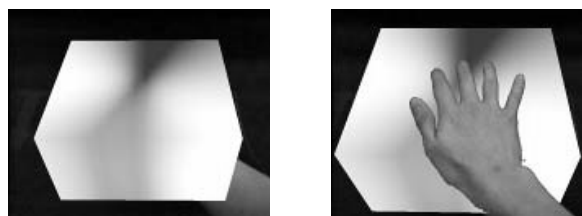


図 4 手領域の抽出（左：適応前 右：適応後）  
Fig. 4 Extracting Hand's Area

(図 5(a)). この  $h(t)$  は以下の式で求めることができる。

$$h(t) = \frac{h_{max} \cdot bend(t)}{bend_{max}} \quad (1)$$

表 1 実験で使用するウレタンフォーム

Table 1 Urethane Used in Experiments

ウレタンフォームの種類	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	硬さ ※	押し込み深さ (mm)
Urethane 1 (硬い)	40 ± 4.0	E 26	6
Urethane 2 (中間)	35 ± 3.0	E 15	11
Urethane 3 (軟らかい)	16 ± 1.5	E 8	15

※硬さ：JIS K 6253 タイプ E の硬度計で試験した値

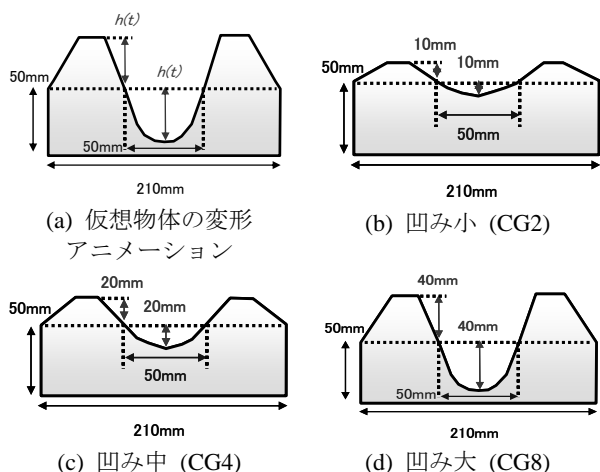


図 5 実験で使用する視覚刺激

Fig. 5 Visual Stimulation Used in Experiments

表 2 実験で使用する視覚刺激の種類

Table 2 Variety of Visual Stimulation Used in Experiments

仮想物体	$h_{max}$ の値
CG1	5mm
CG2 (凹み小)	10mm
CG3	15mm
CG4 (凹み中)	20mm
CG5	25mm
CG6	30mm
CG7	35mm
CG8 (凹み大)	40mm

ただし、 $bend_{max}$  はウレタンフォームを特定の深さまで押し込んだ際の曲げセンサの値で、 $h_{max}$  はその際の仮想物体の最大凹み量を示す。

実験では、 $h_{max}$  が 5mm ずつ段階的に異なる CG1~8 を用意し (表 2)、予備実験および実験 2 では見た目明らかに凹み方の異なる CG2 (凹み小)、CG4 (凹み中)、CG8 (凹み大) (図 5(b)~(d)) を、実験 1 では CG1~8 のすべてを使用する。

#### 4. 予備実験

##### 4.1 実験目的

実際には同じであるはずの物体の硬さを 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ために、以下の条件下で実験を行う。

- 1 つの実物体に対して 3 種類の視覚刺激 (CG2,CG4,CG8) を提示・比較し、実物体の硬さ

が同じであるにもかかわらず、MR 型視覚刺激により異なる硬さと知覚されるか確認する

- 上記実験を硬さの異なる 3 種類の実物体 (Urethane1~3) に対して行い、実物体の硬さが異なる場合でも同様の結果となるのか比較する

##### 4.2 実験内容

- (1) HMD を装着した被験者の目前 (卓上) に 1 種類 (Urethane1~3 のうち 1 つをランダムに選択) のウレタンフォームを配置
- (2) 凹み方の異なる 3 種類の CG アニメーションのうち 2 種類を (順序の違いを考慮した全 6 組から) ランダムに選択
- (3) (1)に(2)で選択した CG アニメーションの 1 つ目を重畳描画し、被験者には中指で、ウレタンフォームの印の付いた位置をビープ音が鳴るまで押し込ませる (複数試行可)
- (4) 同様に、2 つ目の CG アニメーションを提示し、押し込ませる (複数試行可)
- (5) 1 つ目の試行と比較して 2 つ目の試行をどう感じたかを -3 (軟らかい) ~ +3 (硬い) の 7 段階で回答させる (被験者が回答できるまで、(3)(4)の試行を繰り返す)
- (6) 残り 5 組の組み合わせについて (2)~(5) を繰り返す
- (7) (1)~(6)の実験を、残りの 2 つのウレタンフォームに対しても行う。ただし、前の実験での触印象が次の実験に影響することを避けるため、異なるウレタンフォームを使った実験は 1 日以上時間を空けて実施する
- (8) すべてのウレタンフォームの実験が終わった後、気づいたことや感想などのコメントを聴取する

実験手順はシェッフェの一対比較法に基づいており、結果は同手法の計算式により硬さ/軟らかさの心理尺度として求められる。実物体の硬さが同じであるにもかかわらず、MR 型視覚刺激により硬さ知覚に何らかの影響が及ぼされるのであれば、この心理尺度に偏りが発生するはずである。

被験者は 15 名 (20 代の男性 11 名、女性 4 名) である。

##### 4.3 結果と考察

実験結果を図 6 に示す。図中の数直線は、求められた硬さ/軟らかさの心理尺度を示しており、数直線上に記された数値は、その上に描かれた CG アニメーションを提示した場合に、対象をどれだけ硬く/軟らかく感じたかを数値化したものである。数値が大きいくほど被験者は物体を硬く感じ、数値が小さいほど軟らかく感じたことを示している。

実験結果より以下のことがわかった。

- (i) Urethane1~3 すべてにおいて、凹み方の異なる仮

想物体を提示した場合の心理尺度間に有意水準 1% の有意差がある

- (ii) Urethane1~3 すべてにおいて、被験者は CG アニメーションの凹み量が大きいものほど柔らかく感じている
- (iii) Urethane1~3 すべてにおいて、凹み小と中の間よりも、中と大の間の距離の方が大きく離れている
- (iv) Urethane1~3 すべてにおいて、同様の硬さ知覚の傾向が見られる

(i) より、MR 型視覚刺激は硬さ知覚に影響を及ぼすこと、1% の有意差があることから、ほとんどの被験者が影響を受けたことがわかる。また、(ii) (iv) の結果や、被験者からは「CG が大きく凹むほど硬さの違いを感じやすい」「同じ実物体を触っているとわかっていても CG の凹みの大きさに硬さが変わったように感じてしまう」などのコメントが得られたことから、硬さ知覚における視覚の影響は大きく、今回使用したウレタンフォームの硬さ範囲内では、MR 型視覚刺激における実物体の硬さの違いに関わらず、視覚が硬さ知覚に有意な影響を与えたことがわかる。本実験で提示した 3 種類の CG アニメーションの最大凹み量は、10, 20, 40 mm と等間隔ではないが、(iii) の結果や「凹みが極端に変化する方が硬さの違いを感じやすかった」などのコメントから、凹み量の差が、硬さ知覚に大きく影響を与えることがわかる。また、被験者ごとに影響の大小はあったものの、凹み量が大きい CG アニメーションを重畳描画したものを硬く感じると答えた被験者や凹み量が小さい CG アニメーションを重畳描画したものを柔らかく感じると答えた被験者は 1 人もいなかった。

## 5. 実験

### 5.1 実験 1：硬さ知覚の弁別閾の測定

#### 5.1.1 実験目的

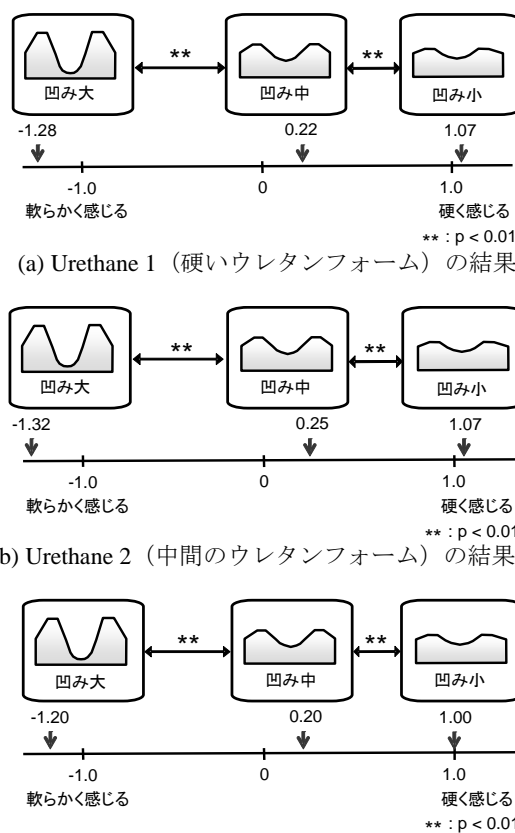
予備実験より、MR 型視覚刺激は硬さ知覚に影響を与えることがわかった。そこで、実験 1 では MR 型視覚刺激を変化させた際の硬さ知覚の弁別閾を調べるために、以下の条件下で実験を行う。

- ・極限法に基づき弁別閾を求める
- ・視覚刺激として、仮想物体の凹み量を 5mm ずつ変化させた CG1~CG8 の 8 種類の CG を用いる
- ・1 つの実物体に対して、標準刺激と比較刺激を順に提示・比較し、硬さの違いを感じるかどうかを確認する
- ・標準刺激はそのまま、比較刺激のみ図 7 の矢印の方向に順に変更して同様の試行を行い、どの段階で硬さの違いを感じるようになるまたは感じなくなるかを調べる
- ・図 7 に示す A~D の 4 種類の提示パターンに対し

- ・同様の実験を行い、弁別閾を求める
- ・上記実験を硬さの異なる 3 種類の実物体 (Urethane1~3) に対して行い、実物体の硬さが異なる場合でも同様の弁別閾となるのか比較する

#### 5.1.2 実験内容

- (1) HMD を装着した被験者の目前 (卓上) に 1 種類 (Urethane1~3 のうち 1 つをランダムに選択) のウレタンフォームを配置
- (2) 図 7 に示す 4 種類のパターンから、重畳描画する視覚刺激の種類および順序をランダムに 1 パターン決定
- (3) 決定されたパターンに従い、2 種類の CG アニメーションを選択



(a) Urethane 1 (硬いウレタンフォーム) の結果  
(b) Urethane 2 (中間のウレタンフォーム) の結果  
(c) Urethane 3 (軟らかいウレタンフォーム) の結果  
図 6 予備実験の結果

Fig. 6 Result of Preliminary Experiment

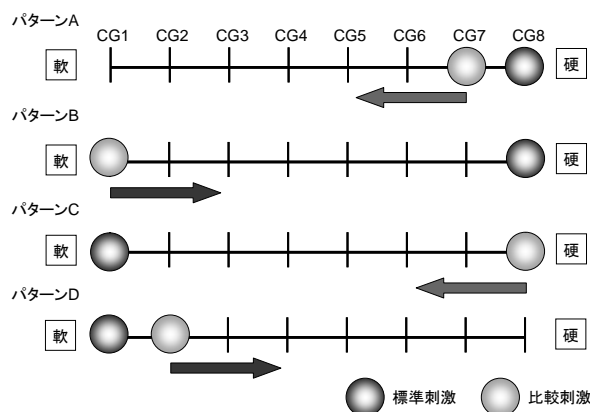


図 7 視覚刺激の提示パターン  
Fig. 7 Presentation Pattern of Visual Stimulation

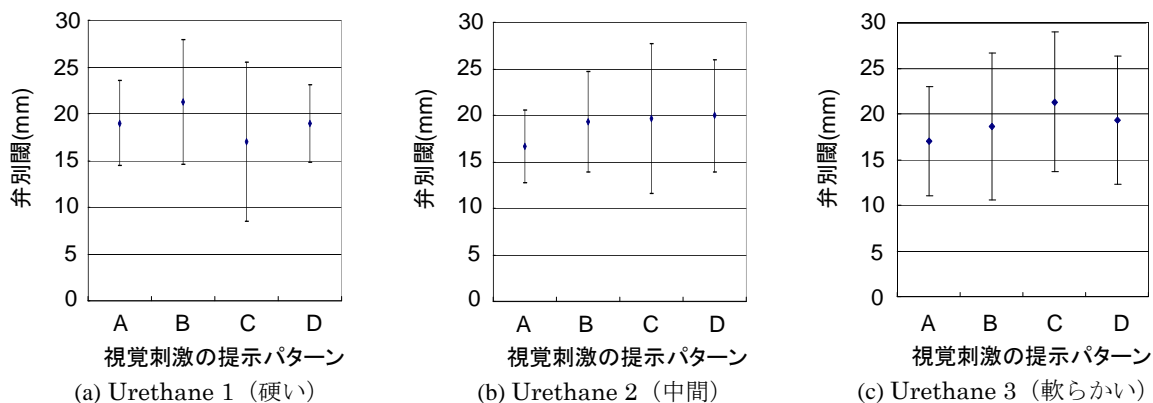


図8 実験1の結果  
Fig. 8 Result of Experiment 1

表3 実験2で用いた実物体と仮想物体の組み合わせ

Table 3 Combination of Real and Virtual Object Presented in Experiment 2

(a)	Urethane1 (硬い) + CG2 (凹み小) と Urethane2 (中間) + CG8 (凹み大)
(b)	Urethane1 (硬い) + CG2 (凹み小) と Urethane3 (軟らかい) + CG8 (凹み大)
(c)	Urethane2 (中間) + CG2 (凹み小) と Urethane3 (軟らかい) + CG8 (凹み大)

- (4) (1)に(3)で選択されたCGアニメーションを順に重畳描画し、被験者には中指で、ウレタンフォームの印の付いた位置をビーブ音が鳴るまで押し込ませる(複数試行可)
- (5) (4)の2種類の試行を比べ、硬さの違いを感じるかを回答させる(被験者が回答できるまで、(4)の試行を繰り返す)
- (6) パターン A, D では、差を感じると回答するまで、一段階ずつ変化量が小さいまたは大きいCGアニメーションに変えて、手順(1)(2)を繰り返し、パターン B, C では、差を感じないと回答するまで、一段階ずつ変化量が大きいまたは小さいCGアニメーションに変えて、手順(1)(2)を繰り返す
- (7) (2)~(6)の実験を、残りの3パターンの視覚刺激提示順序(図7)に対しても行う
- (8) (1)~(7)の実験を、残りの2つのウレタンフォームに対しても行う

ただし、順序効果の発生を避けるため提示するパターンの順序と押し込ませるウレタンフォームの順序はランダムにしている。

被験者は20代の学生15名(男性14名、女性1名)である。

### 5.1.3 結果と考察

実験結果を図8に示す。図中の横軸は視覚刺激の提示順序(パターン)を、縦軸は各々のパターンで得られた弁別閾を表している。図より、3つのウレタンフォームおよびすべての提示パターンにおいて、弁別閾は15~25mmの間の値となっている。以上のことから、今回使用したウレタンフォームの硬さ範

囲内では、同じウレタンフォームに対して仮想物体の凹み量を少なくとも25mm以上変えたMR型視覚刺激を提示することで、それらが異なる硬さであると知覚されるということがわかる。また図の(a)~(c)を比較すると、この範囲ではウレタンフォームの硬さの違いは大きくは影響していないと思われる。

## 5.2 実験2: 硬さ知覚における逆転現象の確認

### 5.2.1 実験目的

実験2は、異なる硬さの実物体に対して、視覚的に硬さが逆転するようなCGアニメーションを提示した場合に、硬さ知覚の逆転現象が起こるのか確認することを目的とする。

- ・硬さの異なる2種類のウレタンフォームに対して、視覚的に硬さが逆転するCGアニメーションの組み合わせを表3のように選択する(硬い実物体に対して、軟らかい物体をイメージする凹み量の大きいCGアニメーション、軟らかい実物体に対して、少し硬い物体をイメージする凹み量の小さいCGアニメーションを提示する組み合わせとなっている)
- ・表3の組み合わせ通り、卓上に2つの実物体を併置し、対となるCGアニメーションを提示・比較した場合に、実際にはより硬い実物体を、より軟らかいものとして知覚されることがあるかどうかを確認する

### 5.2.2 実験内容

- (1) HMDを装着した被験者の目前(卓上)に2種類のウレタンフォーム(表3の3つの組み合わせ(a)~(c)の左右の配置位置の違いを考慮した全6組の中から1組をランダムに選択)を配置する
- (2) 各ウレタンフォームには、表3で対となっているCGアニメーションを重畳描画する
- (3) まず被験者に向かって左に置いてあるウレタンフォーム、次に被験者に向かって右に置いてあるウレタンフォームを押し込ませる(この際、被験者には中指で、ウレタンフォームの印の付いた位

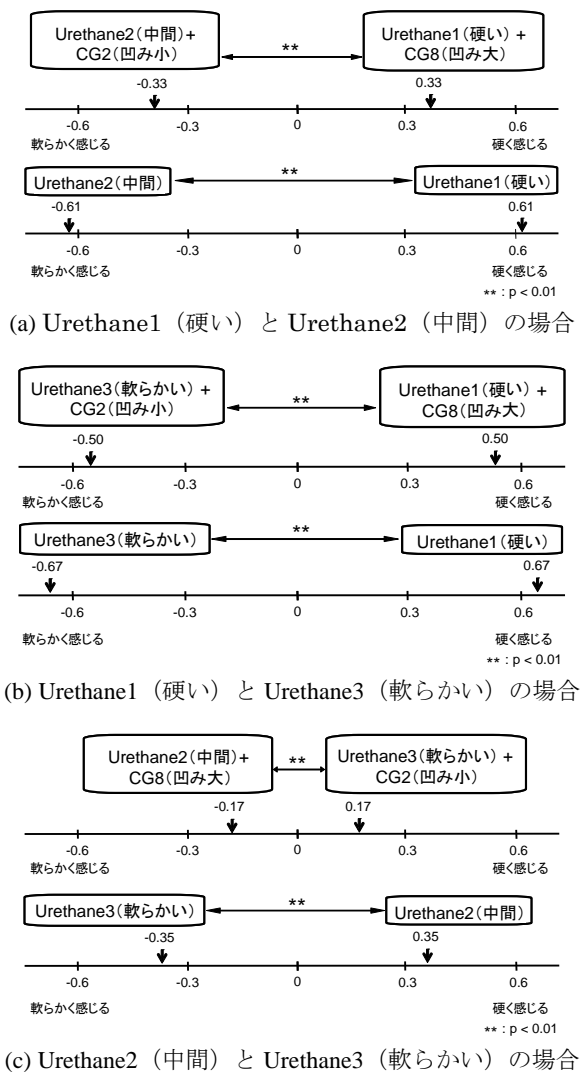


図 9 実験 2 の結果

Fig. 9 Result of Experiment 2

置をビーブ音が鳴るまで押し込ませる)

- (4) 左側と比較して右側の物体をどう感じたかを-2 (軟らかい) ~+2 (硬い) の 5 段階で回答させる (被験者が回答できるまで、2つのウレタンフォームを押し比べることを許す)
- (5) 残り 5 組の組み合わせについて (1)~(4) を繰り返す
- (6) 次に被験者は HMD を外し、(1)~(5) と同様の実験を、仮想物体を重畳描画しない状態 (現実世界のみ) で行う
- (7) すべての実験終了後、気づいたことや感想などのコメントを聴取する

被験者は 20 代の学生 11 名 (男性 9 名, 女性 2 名) である。

### 5.2.3 結果と考察

実験結果を図 9 に示す。(a)~(c) の数直線は、それぞれ上が MR 型視覚刺激を提示した場合の結果、下が HMD を装着せずに実物体を押し込んだ場合の結果である。図より、比較的軟らかい Urethane3 と 2 では、実際にはより軟らかい実物体をより硬いと知

覚する逆転現象が起きていることがわかる。一方、Urethane1 と 2, Urethane1 と 3 の組み合わせでは、このような逆転現象は起きていないことがわかる。

被験者のコメントには「Urethane1 は硬すぎて視覚的に軟らかそうな CG が表示されてもやはり硬く感じる」や「Urethane3 と 2 を比べた際は HMD 越しだと確かに Urethane3 のほうが硬く感じたが HMD を外して触ると Urethane3 のほうが軟らかく感じて不思議な気分だった」といったものがあった。

以上のことから、物体の硬さが近い場合は逆転現象が起こるが、物体の硬さが大きく異なる場合は逆転現象が起こらないことが確認された。

## 6. 実験結果の考察

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) 予備実験より、実際には同じであるはずの物体の硬さを MR 型視覚刺激によって異なる硬さと知覚されることがあることが示された。また、MR 型視覚刺激における凹み量の大きさが、硬さ知覚に大いに影響することが示された。今回実験で使用したウレタンフォームは、指で押した際に明らかに硬さの違いが分かるものを採用したが、これら実物体の硬さの違いによる影響はあまりでなかった。

(b) 実験 1 より、MR 型視覚刺激を変化させた際の硬さ知覚の弁別閾は、20~25mm 程度である。

(c) 実験 2 より、実物体の硬さが近い場合には、視覚的に硬さが逆転するような MR 型視覚刺激を提示することによって、硬さ知覚の逆転現象が起こることが示された。

本研究で得られた現象・知見を、我々は“Size-Weight Illusion”や“Shape-COG Illusion”に引き続く現象と位置づけ、“Dent-Softness Illusion”と呼ぶことにした。

## 7. むすび

我々は MR 環境における実物体の外観の変化が、触知覚に与える影響について調査を行ってきた。本稿では、数ある触力覚感覚の中でも硬さ知覚に焦点を当て、MR 型視覚刺激が硬さ知覚に与える影響について実験を行った。その結果、提示する CG アニメーションを変えることで、硬さ知覚に錯覚現象 (Dent-Softness Illusion) が生じることが確認できた。加えて、MR 型視覚刺激を変化させた際の硬さ知覚の弁別閾や、実物体の硬さよりも視覚刺激の方が優位に影響する場面があることを確認した。

本研究から、いくつかの興味深い知見が得られたので、今後はほとんど変形しないような硬い実物体

でも同様の結果が得られるのか、また、物体の持ち方や押し方を変えた場合、両手で同時に触れた場合など、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。

### 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] 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—自動車インテリア・デザイン検証への応用—”, 同上, Vol. 9, No. 1, pp. 79 - 87, 2004.
- [2] 石黒祥生, 大槻麻衣, 比嘉恭太ほか, “Watch the Birdie!—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.
- [3] 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.
- [4] 家崎明子, 杉田明弘, 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.
- [5] 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.
- [6] 杉田明弘, 溝口晃太, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行, “複合現実型視覚刺激が重心知覚に与える影響”, 第71回情報処理学会全国大会講演論文集, pp. 115 - 116, 2009.
- [7] 入江隆, 藤田尚文, 中西秀男, 太田学: “やわらかさ知覚のメカニズム”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J91-A, No. 1, pp. 162 - 171, 2008.
- [8] 千葉亮, 土井幸輝, 藤本 浩志: “弾性物体を対象物としたヒトの指先の硬さ弁別特性”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 573 - 578, 2006.
- [9] M. A. Srinivasan, G L. Beauregard, and D. L. Brock, “The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments,” Proc. ASME Dynamic Systems and Control Div., Vol. 58, pp. 555 - 559, 1996.
- [10] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet, “Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback,” Proc. Virtual Reality Conference, IEEE, pp. 83 - 90, 2000.
- [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, Vol. 10, No. 3, pp. 247 - 265, 2001.
- [12] 立藪真理, 佐藤克成, 黒木忍, 南澤孝太, 川上直樹, 舘暲, “硬さ識別における pseudo-haptic の影響”, 日本バーチャルリアリティ学会第14回大会論文抄録集, 3B1 - 1, 2009.
- [13] 佐々木博, 藤田欣也, “力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果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. 5, No. 1, pp. 795 - 802, 2000.
- [14] 大西仁, 林大作, 中村直人, 望月要, “力覚ディスプレイの出力遅延と視覚情報が弾性力知覚に与える影響”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 610, pp. 37 - 41, 2006.

- [15] B. Knorlein, M. D. Luca, and M. Harders, “Influence of visual and haptic delays on stiffness perception in augmented reality,” Proc. 8th IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 49 - 52, 2009.
- [16] 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.

(2010年12月17日受付)

### [著者紹介]

平野 有一 (学生会員)



2010年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。現在、同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。

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)。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、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。

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。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。IEEE、電子情報通信学会、日本ロボット学会、情報処理学会等の会員。2005年本学会学術奨励賞受賞。

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。