

# 複合現実型視覚刺激による触印象への影響 (4)

## — 硬さ知覚への影響に関する基礎実験 —

Psychophysical Influence on Tactual Impression by Mixed-Reality Visual Stimulation (4)  
--- Fundamental Experiment of Psychophysical Influence on Sense of Hardness ---

平野有一, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行  
Yuichi Hirano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

立命館大学 大学院理工学研究科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**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 the real object which is superimposed the computer generated image. In this experiment, we change the image on real object as the subject push real object by a finger. As the result of the experiments, it found that human senses different hardness by changing dent of computer generated image.

**Key words:** 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ができる。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くと、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ることも考えられる。これはある種の錯覚である。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。

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。これまでに、実物体とは異なる表面粗さの CG テクスチャを重畳描画することで、触覚に差があるように感じる場合があること [1]、これに聴覚刺激を付加した場合にその影響がより強くなること [2] を示した。また実物体に重心位置の異なる仮想物体を重畳描画すると、重心知覚が視覚 (仮想物体の重心位置) に引きずられるという現象も発見した [3]。

本稿では次なる試みとして、硬さ知覚に注目する。人は物の硬さを知覚する際に、触れている部分の感覚だけでなく視覚からの影響を受けていることが報告されている [4]。

そこで本研究では、押し込まれたときに実物体とは異なる凹み方をする仮想物体を重畳描画することで、MR 型視覚刺激による外観変化が硬さ知覚に影響するかどうか確

認する。さらに、MR 型視覚刺激による硬さ知覚の逆転現象が起こりうるかを確認するために、硬い実物体に軟らかい仮想物体を、軟らかい実物体に硬い仮想物体を重畳描画し、硬い実物体をより軟らかく、軟らかい実物体をより硬く感じるかどうか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

視覚情報を改変することで硬さ知覚が変化することを示す研究例はいくつか存在する。例えば、佐々木ら [5] 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。また大西ら [6] 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。MR 環境を利用した例は少ないが、Knorlein ら [7] は触覚情報提示に 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。

しかし、これらの研究は触力覚提示装置の性能向上を目指しており、視覚情報を改変することで硬さ知覚の逆転現象が起こりうるかといった詳細の検討は行われていない。

そこで本研究では、触覚は実物体、視覚は HMD を介して仮想物体を提示し、体験者が自身の手指を見ながら操作

することができるため、より現実世界に近い環境で硬さ知覚実験を行う。

### 3. 実験準備

#### 3.1 実験目的

本研究では、MR 型視覚刺激を提示した場合の人の硬さ知覚に関して以下の 2 つの実験を行う。実験 1 では同一の実物体に対して、凹み方の違う仮想物体を重畳描画する。現実には同じ硬さであるにもかかわらず、触れた人に、より硬く、またはより柔らかく知覚されることがあるのかを検証する。次に実験 2 では、異なる硬さの実物体に対して、それぞれ凹み方が逆になるような MR 型視覚刺激を提示し、硬さ知覚の逆転現象が起こるのかを確認する。具体的には、硬い実物体に対して柔らかい凹み方をする仮想物体を、柔らかい実物体に対して硬い凹み方をする仮想物体を重畳描画する。これにより硬さを逆に知覚することがあるかどうか確認する実験を行う。

#### 3.2 実験対象

実験対象には、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した。幅 210 mm × 奥行 105 mm × 高さ 50 mm で、中指で押して明らかに硬さの異なる 3 種類のウレタンフォーム（株式会社 INOAC 製）を使用した（表 1）。

#### 3.3 実験環境

実験で用いる MR システムの構成は図 1 に示す通りである。被験者は Canon 社製のビデオスルー方式 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 2）。

## 4. 実験 1

### 4.1 実験内容

実験 1 では実物体（ウレタンフォーム）を被験者の目前にひとつ置き、そこに、凹み方の異なる以下の 3 種類の仮想物体を重畳描画する（図 3）。

- (a) 凹み量小：最大 10 mm 沈む（図 4 (a)）
- (b) 凹み量中：最大 20 mm 沈む（図 4 (b)）
- (c) 凹み量大：最大 40 mm 沈む（図 4 (c)）

実物体が押し込まれると、仮想物体の押し込まれた位置に対応する部分が凹み、その周りが反り上がる。被験者は中指でこのウレタンフォームの印の付いた位置を押し込む。凹み方の異なる 2 種類の仮想物体が提示され、それら

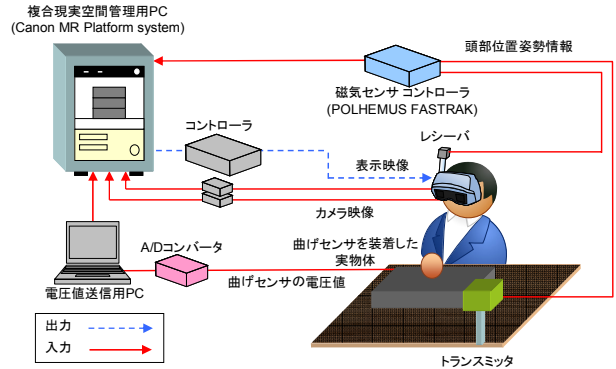


図 1 システム構成

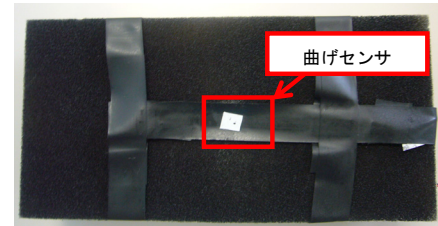


図 2 実験で使ったウレタンフォームの外観

表 1 実験で使ったウレタンフォームの種類

ウレタンフォームの種類	密度	沈み量
硬さ#1	16 ± 1.5 kg / m <sup>3</sup>	26 mm
硬さ#4	35 ± 3.0 kg / m <sup>3</sup>	13 mm
硬さ#5	40 ± 4.0 kg / m <sup>3</sup>	2 mm

沈み量：錘（底面積 35.4 cm<sup>2</sup>、重さ 2.2 kg、円柱型）を載せたときに錘が沈んだ深さ

を比較してどちらがより硬く感じるかを回答する。

この一連の実験は硬さ#1、#4、#5、3 種類のウレタンフォームに対して行い、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。被験者は 20 代の学生 15 名（男性 11 名、女性 4 名）である、実験手順を以下に示す。

- (1) 凹み方の異なる 3 種類の仮想物体の内 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
- (2) 被験者に 1 つ目の仮想物体を提示し、ウレタンフォームを押し込ませる
- (3) 次に 2 つ目の仮想物体を提示し、押し込ませる
- (4) 1 つ目に対して 2 つ目の硬さをどう感じたかを -3（柔らかい）～+3（硬い）の 7 段階で回答させる（被験者が回答できるまで、2 つを交互に提示する）
- (5) 残り 5 組の組合せについて (1)～(4) を繰り返す
- (6) それぞれの硬さのウレタンフォームを使った実験は、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、1 日以上時間を空けて実施する
- (7) 全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

この実験手順はシェッフエの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／柔らかさの心理尺度として求められる。実物体の硬さが異なる場合でも、MR 型視覚刺激が硬さ知覚に何らかの影響を及ぼすのであれば、この心理尺度に偏りがあるはずである。

なお、ウレタンフォームのような弾性物は、強く押し込

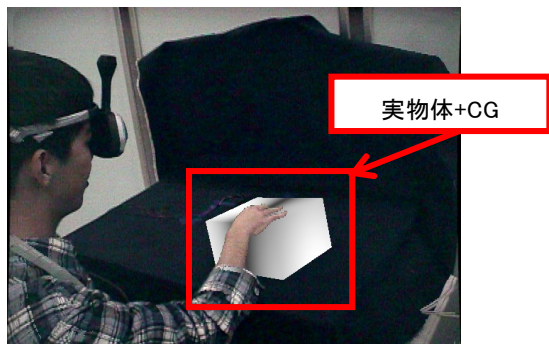


図 3 実験風景

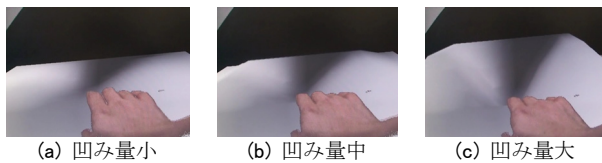


図 4 重畳描画する仮想物体の変形パターン

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、ある深さまでウレタンフォームを押し込むとビーブ音を提示し、被験者にはビーブ音が鳴るまで押し込み、ビーブ音が鳴ったら押すのをやめるよう事前に指示した。

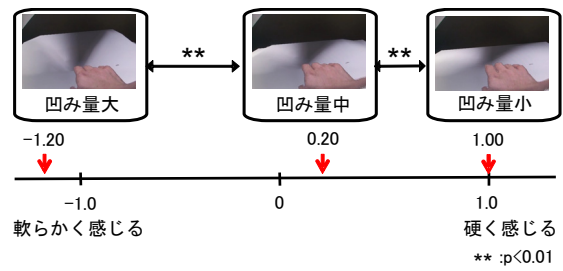
#### 4.2 結果と考察

実験結果を図 5 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、その上に描かれた凹み方をした仮想物体を提示した場合に、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 4 つのことがわかる。

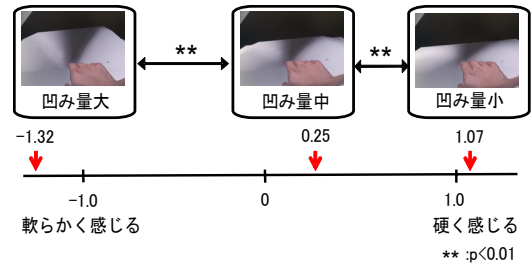
- (a) 3 種類のウレタンフォーム全てにおいて、凹み方の異なる仮想物体を提示した場合の心理尺度間に有意水準 1% の有意差がある
- (b) 3 種類のウレタンフォーム全てにおいて、被験者は仮想物体の凹み量が大きいものほど軟らかく感じている
- (c) 3 種類のウレタンフォーム全てにおいて、凹み量小と中の間よりも、中と大の間の距離の方が大きく離れている
- (d) 3 種類のウレタンフォーム全てにおいて、同様の硬さ知覚の傾向が見られる

(a) より、MR 型視覚刺激は硬さ知覚にも影響を及ぼすことがわかる。また 1% の有意差があることから、ほぼ全ての被験者が影響を受けたことがわかる。

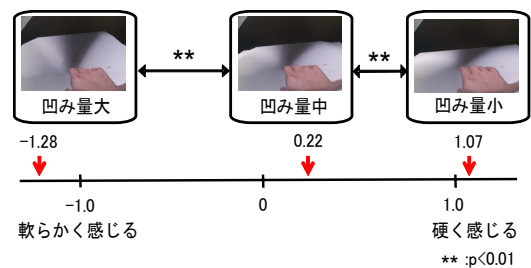
(b) (d) の結果や、被験者の「仮想物体の凹み量の差が大きいほど硬さの違いを感じやすい」「同じ実物体を触っているとわかっていても仮想物体の凹みの大きさで硬さが変わったように感じてしまう」などのコメントから、硬さ知覚における視覚の影響は大きく、今回使用したウレタンフォームでは、MR 型視覚刺激における硬さ知覚に、実物体の硬さの違いがほとんど影響を与えなかった。



(a) 硬さ#1 のウレタンフォームの場合



(b) 硬さ#4 のウレタンフォームの場合



(c) 硬さ#5 のウレタンフォームの場合

図 5 実験 1 の結果

今回提示した 3 種類の仮想物体の最大凹み量は、10, 20, 40mm と等間隔でない。(c) の結果や「凹みが極端に変化の方が硬さの違いを感じやすかった」などのコメントからも、仮想物体の凹み量の差が、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るものの、凹み量が大きい仮想物体を重畳描画したものを硬く感じる被験者や凹み量が小さい仮想物体を重畳描画したものを軟らかく感じる被験者は 1 人もいなかった。

## 5. 実験 2

### 5.1 実験内容

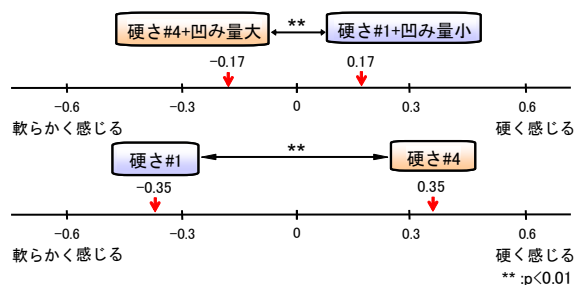
実験 2 では机の上に 2 個のウレタンフォームを併置し、実験 1 同様、各ウレタンフォームに凹み方の異なる同形状の仮想物体 (図 4) を表 2 の組み合わせで重畳描画する。これは硬い実物体に対して、軟らかい物体をイメージする凹み量の大きい仮想物体 (図 4 (c))、軟らかい実物体に対しては、少し硬い物体をイメージする凹み量の小さい仮想物体 (図 4 (a)) を提示する組み合わせとなっている。ウレタンフォームの押し方は、実験 1 と同様で、被験者は 20 代の学生 11 名 (男性 9 名、女性 2 名) である。

以下に実験手順を示す。

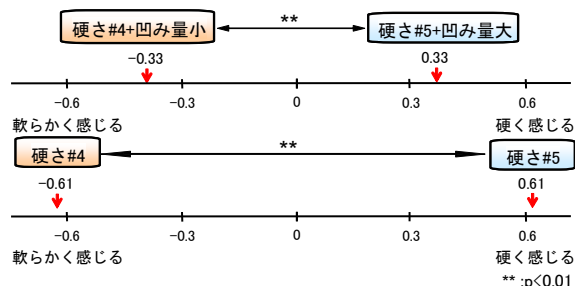
- (1) 表 2 の 3 つの組み合わせに左右の配置位置の違いを考慮した全 6 組の中からランダムに選択

表 2 実験 2 で用いた実物体と仮想物体の組み合わせ

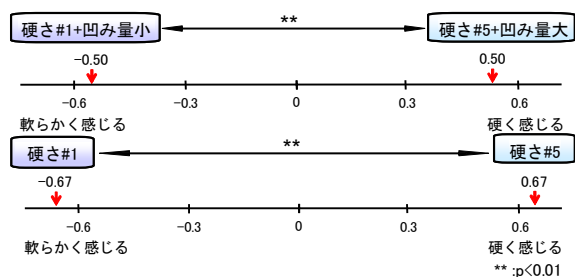
(a)	硬さ#1 + 凹み量小, 硬さ#4 + 凹み量大
(b)	硬さ#1 + 凹み量小, 硬さ#5 + 凹み量大
(c)	硬さ#4 + 凹み量小, 硬さ#5 + 凹み量大



(a) 硬さ#1 と硬さ#4 の場合



(b) 硬さ#4 と硬さ#5 の場合



(c) 硬さ#1 と硬さ#5 の場合

図 6 実験 2 の結果

- (2) 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を押し込ませる
- (3) 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
- (4) 左のものに対し、右のものをどう感じたかを -2 (軟らかい) ~ +2 (硬い) の 5 段階で回答させる (被験者は、回答できるまで 2 つのウレタンフォームを押し比べる)
- (5) 残り 5 組の組合せについて (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

## 5.2 結果と考察

実験結果を図 6 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ときの結果、下が HMD を装着しないで実物体を押し込んだときの結果である。実験の結果、比較的軟らかい硬さ#1 と硬さ#4 の実物体では、

視覚的に軟らかさが逆転するように仮想物体を重畳描画したところ、実際には軟らかい実物体をより硬いと知覚する逆転現象が起きた。一方、硬さ#5 を含む組み合わせでは、逆転現象は起きなかった。

また被験者の「硬さ#5 は硬すぎて視覚的に軟らかくても硬く感じる」や「硬さ#1 と硬さ#4 を比べた際は HMD 越しだと確かに硬さ#1 のほうが硬く感じたが HMD を外して触ると硬さ#1 のほうが軟らかく感じて不思議な気分だった」などのコメントより、物体の硬さが近い場合は逆転現象が起こる可能性があるが、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. むすび

我々は MR 環境における実物体の外観の変化が、触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。具体的には、様々な硬さのウレタンフォームを利用し、これを押し込んだときに実際とは凹み量の異なる仮想物体を重畳描画した。実験では、この凹み量を変えることで、実際よりも硬く/軟らかく錯覚されることや実物体の硬さよりも視覚情報の方が優位に影響する場合があることを確認した。

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などの実験を行い、本研究を進展させて行く。

## 参考文献

- [1] 家崎, 柚田, 木村, 柴田, 田村, “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.
- [2] 鍵本, 木村, 柴田, 田村, “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.
- [3] 柚田, 溝口, 木村, 柴田, 田村, “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.
- [4] 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.
- [5] 佐々木, 藤田, “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.
- [6] 大西, 林, 中村, 望月, “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.
- [7] 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.