

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—

鍵本 麻美^{*1} 木村 朝子^{*1} 柴田 史久^{*1} 田村 秀行^{*1}

Psychophysical Influence on Tactual Impression by Mixed-Reality Visual and Audio Stimulation

—Evaluation of Illusions That May Occur in Industrial Application Use—

Mami Kagimoto^{*1}, Asako Kimura^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Hideyuki Tamura^{*1}

Abstract – In mixed reality (MR) environment, a touchable object can be changed its appearance by superimposing a computer generated image (MR visual stimulation) onto it. In this paper, we focus on the “roughness” as one tactual impression, and study the effects of MR visual and audio stimulation on tactual impression with some systematic experiments. We have investigated that MR visual stimulation causes the different tactual impression from a real object. Meanwhile, it has been indicated that touch impression could be also affected by audio stimulation generated stroking the object. Therefore, it would appear that touch impression is more affected by MR visual and audio stimulation. As the result of experiments, MR visual and audio stimulation much more affect it than MR visual stimulation.

Keywords: Mixed Reality, Tactual Impression, Psychophysical Influence, Visual and Audio stimulation.

1. はじめに

現実世界と仮想世界を実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術は、人工現実感 (Virtual Reality; VR) 研究の中で最も活発な分野の1つとなっているが、その研究や応用の大半は視覚的な MR の実現に向けられてきた。我々は、視覚的 MR と聴覚的 MR を同時に達成できる方式[1]を提案・実現するとともに、そこに触力覚的な刺激も積極的に付加する三感融合型の MR システムを研究開発してきた[2]。ここで、視覚と聴覚は現実と仮想の融合という点で対称形をなすが、触力覚に関しては非対称で補助的な役割に留まっている。これは、視覚と聴覚には汎用的なディスプレイが存在するが、触力覚ディスプレイは未だ限られた表現能力をもつものしか実現されていないためである。

その一方で、視・聴・触の三感覚の2つ以上を併用した場合は、相補的な働きをしたり、互いに影響を及ぼし合うことが知られている。であれば、視覚と聴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 型の視覚・聴覚刺激が触印象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いる。

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[3]。この系統的な実験の結果、

- ・同じ粗さの実物体でも、視覚的に粗さを変更すると触覚的に差があるように感じることがある
- ・異なる粗さの実物体でも、視覚的に粗さを変更すると、触覚的な粗さの差を感じないことがある
- ・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。

MR型視覚刺激が触覚に影響を及ぼすというある種の「錯覚」は、事前に予想し期待した現象である。上記の実験結果は、あらゆる場合に起こり得る現象ではないが、適切な視覚刺激と聴覚刺激の組合せを選ぶことによって、工業的用途(例えば、[4][5]などの MR システム)にも十分応用し得るというものであった。即ち、限られた種類の実物体に異なる材質

*1 立命館大学大学院理工学研究科

*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

の視覚刺激を重畳描画することで、それらの材質をもっと多様なものと感じさせること可能であると言える。次なる興味は、提示条件の変更や他の刺激の付加によって、限られた「素材感提示の錯覚」を増すことができるかどうかである。

物体を触知する際には、触れたときに発生する音（以下、接触音）により、聴覚も刺激を受けている。ならば、聴覚刺激も恣意的に変化させることで、触印象への影響（錯覚）を強めることができるのではないかと考えるのが自然である。実際、上記実験の被験者からは、「ここに音を加われば、印象はさらに変わったかも知れない」という意見を得ていた。

本論文では、文献[3]の系統的实验を発展させ、視覚刺激に聴覚刺激を付加することで、触印象への影響がどのように変化するかを実験・検討した結果を報告する。予備実験の結果、実験対象物体（RP オブジェクト）が発する実際の接触音では、実験するに足る聴覚刺激が得られないことが判明した。そこで、視覚から連想される音（強調接触音）を合成することから始め、その合成音を提示する方法で目的とする実験を実行し、その結果を分析した。

2. 本研究の目的と位置づけ

2.1 関連研究

視覚刺激が触覚に及ぼす影響に関する研究の歴史は古く、Lederman ら[6]は、視覚と触覚に異なる粗さのサンドペーパーを提示した際、被験者はその中間の粗さであると知覚したと報告している。一方、Biocca ら[7]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。文献[3]は、こうした先人の研究を踏まえた上で、MR 型視覚刺激に関する実験を行ったものである。本研究もまた同じ研究姿勢を踏襲している。

Lederman ら[8]は、聴覚刺激が触覚に与える影響も研究し、「聴覚刺激のみ」「触覚刺激のみ」「同時に聴覚・触覚刺激」を提示するという3条件下で、凹凸のあるプラスチック板の粗さをそれぞれ回答させ、聴覚・触覚刺激を提示したときの粗さは、聴覚刺激のみ・触覚刺激のみの場合の中間であったと報告している。Jousmäki ら[9]は、掌同士を擦り合わせたときの接触音の高域周波数エネルギーを増幅させて提示すると、被験者はより掌が乾いているように知覚したと報告している。また、Guest ら[10]は、サンドペーパーに触れたときの接触音の高域周波数エネルギーを増幅させて提示すると、触覚的により粗く知覚することを示した。本研究は、文献[9][10]で実際の接触音を加工し実物体から発するものとは異なる音を提示している点に着目して、同様の研究実験方法を

を採用した。

視覚・聴覚・触覚の三感を併用した研究事例としては、Constantinou ら[11]の多感覚手術補助システムが、視覚・触覚に加え、聴覚刺激を提示することでより臨場感が増すとしているが、他にも活用できる客観的な知見を得ている訳ではない。

2.2 本研究の意義と実験対象

本研究は、MR 型の視覚刺激に聴覚刺激を付加して提示した場合に、より触印象への影響が強まるという仮説を立て、それがどのような場合に、どの程度の影響を与えるかを検証しようとするものである。これまでの関連研究からもこの仮説はかなり有力と言えるが、MR 型視覚刺激に聴覚刺激を付加するという条件下での実験例は存在しないため、具体的なMR システムでの系統的实验を実施して評価することにした。

この種の錯覚現象の仮説検証はなるべく、広汎な対象に対して一般的な知見を得ることが好ましいが、あまり条件を広げ過ぎると多様な因子を含み、客観的な事実を引き出すことは難しくなる。そこで、本研究は、あらゆる用途での利用を想定するのではなく、文献[3]と同様な工業製品の設計製造分野での応用を前提とし、その範囲内での確実な知見を得ることに対象を絞っている。即ち、実際に利用し得るMR システムを用いて視覚・聴覚刺激を提示することで、比較的簡便かつ定量的に触印象の修飾が可能であることを実証しようというものである。

3. 提示すべき接触音の生成と評価

3.1 提示する刺激

従来の研究実験[3]との整合性を保つため、視覚・聴覚・触覚刺激のそれぞれで、粗さが段階的に異なる4種類の刺激を利用する(図1)。以下、触覚刺激、MR 型視覚刺激、聴覚刺激をそれぞれ粗いものから順に Rough 1~Rough 4, CG 1~CG 4, Sound 1~Sound 4 と呼ぶ。

触知対象である実物体は、ABS 樹脂を用いて成形したラピッド・プロトタイプング (Rapid Prototyping;

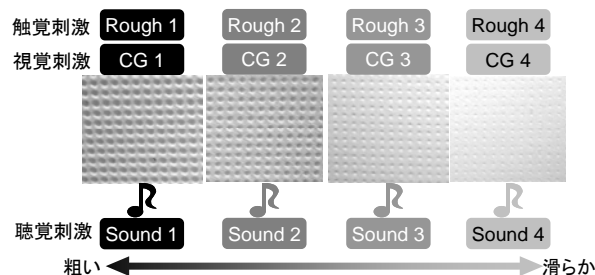


図1 提示する刺激
Fig. 1 Stimuli Presentation

RP) オブジェクトであり[12], 表面を触った時に異なる表面粗さを感じるよう図2のように加工されている. 視覚刺激には, その表面を撮影した画像を用いることも文献[3]と同様である.

聴覚刺激としては, 触覚刺激に使用する RP オブジェクトの接触音をそのまま利用するのが自然な考えである. しかしながら, 実際 Rough 1~4 の RP オブジェクトに掌で触れた際の接触音を録音し比較してみると, 4 種類の音を識別することは全く困難であった. 4 種の RP オブジェクトは, 本研究のため触知して粗さの違いが分かるように加工したが, その加工法は RP 技術の限界があり, 接触音に違いが出ることにまでは考慮していなかった.

そもそも, 実在する物体を実際に触れる場合でも, その接触音から表面の材質や粗さを正しく言い当てられるとは限らない. その種の訓練を積んでいることはなく, 人は視覚から想像する接触音に先入観を持っているに過ぎない. 例えば, 図1の Rough 1 と Rough 4 の実物体を比較すると, 人は Rough 1 のような粗い物体の音は滑らかな Rough 4 よりもざらざらした印象の音を期待することが考えられる. 触印象の修飾可能性を例示しようとする本研究の目的からして, この先入観を強調するような接触音を利用することの方が理にかなっている. 即ち, 実験対象の物体を触れたと感じ, かつその粗さの違いが感じられるような「接触音」を作り上げ, それを聴覚刺激として提示することである. この音を「強調接触音」と呼び, 以下の条件を満足するものとした.

- ・ RP オブジェクトの実際の接触音を加工して作成
- ・ 4 種類の聴覚刺激から物体の表面粗さを区別可能
- ・ RP オブジェクトの接触音として違和感がない

3.2 聴覚刺激の作成と評価

3.2.1 実際の接触音の分析

図2に示すように, 対象物体の表面は窪み部分と平面部分から構成されている. この物体表面を, 掌や爪や別の物体で音が出る程度の強さで擦ると, 窪み部分からは触知媒体が窪みの縁に衝突する音(衝突音)(図3(a)), 平面部分からは触知媒体が平面を

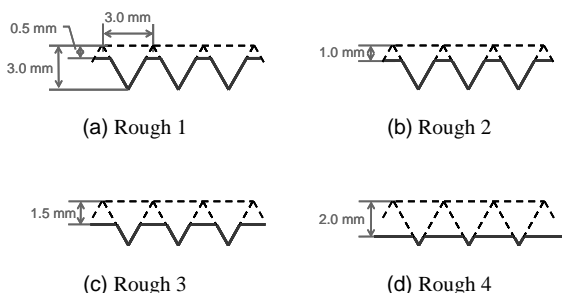


図2 RP オブジェクト表面のデザイン (実線部が物体表面を示す)
Fig. 2 Artificial Rough Surface

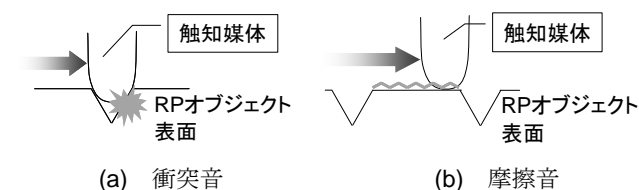


図3 RP オブジェクトから発生する接触音
Fig. 3 Touch Sound Generated from RP Object

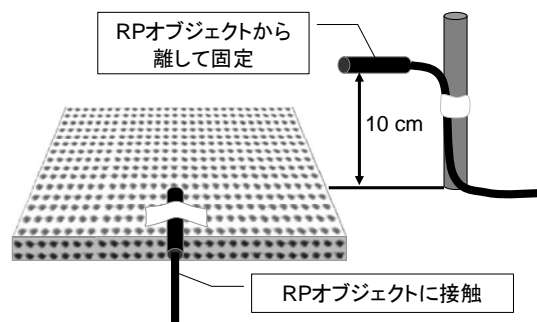
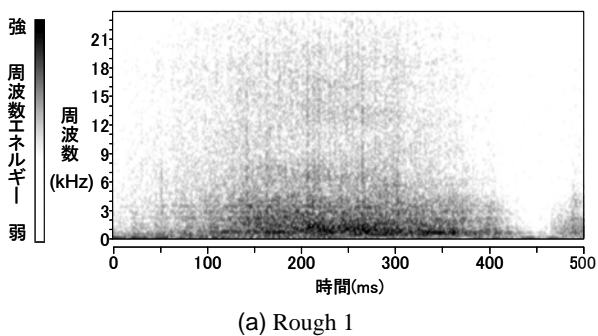


図4 マイクロホンの配置
Fig. 4 Layout of Microphones

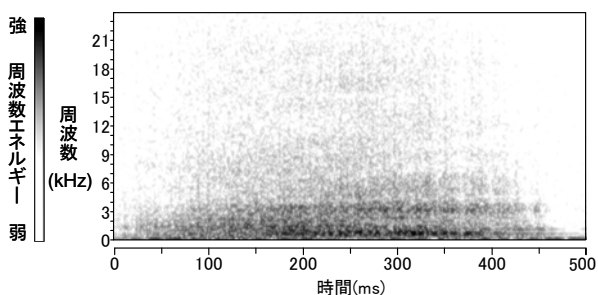
擦る音(摩擦音)が発生する(図3(b)). 表面の粗い物体ほど窪み部分の深さと直径が大きく, 平面部分の面積が小さいため, 表面が粗い物体の接触音には, 衝突音が多く, 摩擦音が少ないと考えられる. 表面が滑らかな物体の場合は, その逆である. この仮定に基づいて, 衝突音と摩擦音の合成比率を工夫することで, 粗さの違いを強調した接触音を生成することが可能であると考えられる.

一方, 同じ RP オブジェクトでも, 触知媒体の硬さ・材質などによって含まれる衝突音と摩擦音のエネルギー量が異なる. 例えば, 爪のような硬く滑らかな触知媒体で撫でた場合, 衝突音ははっきりと聞こえるが摩擦音はほとんど聞こえない. 一方, 指の腹のような軟らかな触知媒体で撫でると衝突音はほとんど吸収され, 摩擦音のみ聞こえる.

実際, 爪と掌で4種類の物体を撫でたときの接触音を録音し, 周波数解析を行った. 撫でる速さは1往復(約30 cm)1秒, 録音時のサンプリング周波数48 kHzである. 録音時の環境を図4に示す. 掌の接触音は, RP オブジェクトに接触させたマイクロホンで録音した. また, 爪の接触音は, 適切な音量となるように RP オブジェクトから離れた位置のマイクロホンで録音した. これらの接触音(半往復分)のスペクトログラムを図5, 図6に示す. 爪で触れた接触音には, 周期的にスペクトルが広がっている部分(図5 筋状部分)があり, 表面が粗いほどそれらのエネルギーが大きくなるという特徴が見られた. 一方, 掌で触れた接触音からは, 粗さを特徴付ける違いは見られなかった(図6).



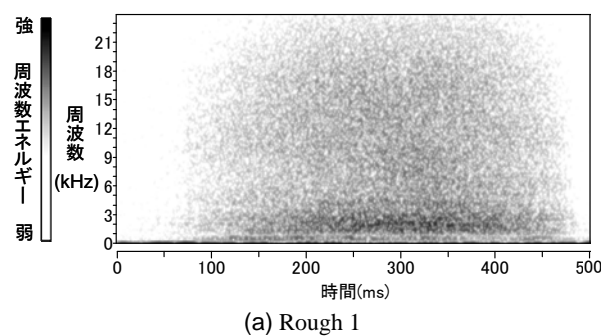
(a) Rough 1



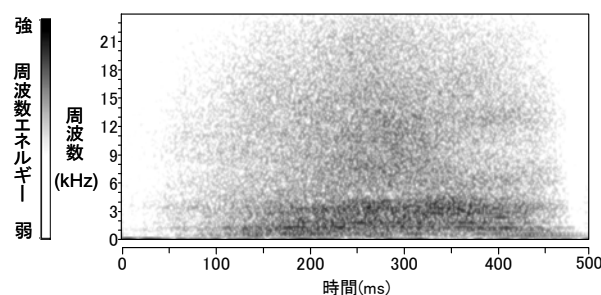
(b) Rough 4

図5 周波数解析結果 (爪の接触音)

Fig. 5 Frequency Analysis Result of the Touch Sound (Fingernail)



(a) Rough 1



(b) Rough 4

図6 周波数解析結果 (掌の接触音)

Fig. 6 Frequency Analysis Result of the Touch Sound (Palm)

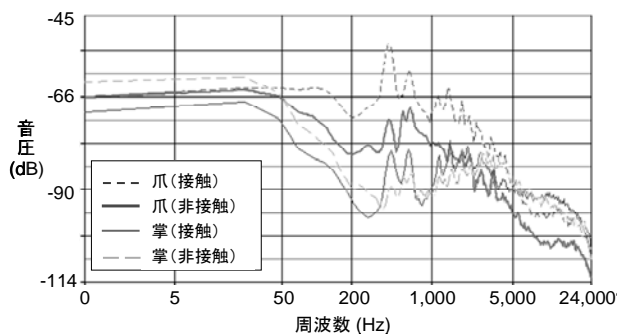


図7 爪と掌の接触音の周波数エネルギーの違い

Fig. 7 Difference of Frequency Energy between Fingernail and Palm Touch Sound

3.2.2 強調接触音の生成

以上の結果から、衝突音を多く含む爪との接触音と摩擦音を多く含む掌との接触音を利用して、以下の方法で強調接触音を生成することにした。

- (i) 全ての粗さの爪と掌の接触音を Rough 1 の RP オブジェクトとの接触音の音量に正規化する。爪と掌による接触音は、それぞれ前項で録音したものから切り出した、同じ周期で往復している1往復分(1秒間)を使用する。
- (ii) 爪による接触音をそのまま利用すると衝突音が強すぎる。そこで、掌の接触音としても違和感のないように、爪の方が掌の接触音よりエネルギーが大きい図7の5 kHz以下の爪の接触音を20 dBだけ減衰する。
- (iii) 衝突音が多い爪の接触音と摩擦音が多い掌の接触音を表1の割合で合成する。ただし、ある粗さの聴覚刺激を作成するときは、対応する実物

表1 作成した聴覚刺激

Table 1 Fabricated Audio Stimulation

		Sound 1	Sound 2	Sound 3	Sound 4
爪の音の割合		1.0	1.0	1.0	1.0
聴覚刺激A	掌の音の割合	0.9	1.0	1.1	1.2
	合成後の振幅増幅率	1.1	1.0	0.9	0.8
聴覚刺激B	掌の音の割合	0.9	1.0	1.1	1.2
	合成後の振幅増幅率	1.2	1.0	0.8	0.6
聴覚刺激C	掌の音の割合	0.8	1.0	1.2	1.4
	合成後の振幅増幅率	1.1	1.0	0.9	0.8
聴覚刺激D	掌の音の割合	0.8	1.0	1.2	1.4
	合成後の振幅増幅率	1.2	1.0	0.8	0.6

原音の振幅: 1.0

体の接触音を利用する。

- (iv) Sound 1~Sound 4で合成後の音量を、それぞれ原音で合成した場合の音量に正規化する。
- (v) より粗い聴覚刺激の音量が大きくなるよう、表1の比率に従って(iv)を増幅する。

3.2.3 評価実験

3.2.2の手順で作成した合成比率と増幅率が異なる4組の聴覚刺激A~D(表1参照)を聞くことで、物体表面の粗さを区別可能かどうか、図2のRPオブジェクトの接触音として違和感がないかを確認する評価実験を行った。聴覚刺激は、1往復1秒の速さで撫でた接触音4往復分である。実験内容は以下の通りで、被験者は正常な聴力を持つ21~24歳の男女16名である。

【実験1】

- (1) 聴覚刺激を無作為に1種類ずつ提示する。1種類

提示した後は、1秒間の無音時間を設ける。被験者は必要に応じてメモを取ることができる。これを被験者が回答するまで要望に応じて繰り返す。

- (2) 全ての音を聞かせたのち、各聴覚刺激の粗さの順位を回答させる

【実験2】

- (1) 4種類のRPオブジェクトを被験者の目前に粗さの順に並べ、それぞれに対応する聴覚刺激(実験1で粗さ順位を正答した聴覚刺激のみ)を順に提示する。提示方法は実験1と同様である
- (2) 被験者に「4種類の音が各RPオブジェクトの外観から連想される接触音であったか」回答させる
実験1の結果、聴覚刺激Dは13名、Bは9名、Cは7名、Aは6名が粗さの順位を正答し、全ての被験者がB、Dどちらかの聴覚刺激の順位を正答した。この結果から、爪と掌の接触音の合成割合、合成後の増幅率を調整することで聴覚刺激の粗さの違いを強調できることがわかる。また、実験2で16名中13名がBまたはDの聴覚刺激を「各RPオブジェクトの外観から連想される接触音である」と回答したことから、本研究では2.1の3つの条件を満足する強調接触音として聴覚刺激B、Dを採用する。

4. 実験1：同一の表面粗さを用いた実験

4.1 実験目的

文献[3]実験1.1では、以下の条件で実験を行うことでMR型視覚刺激が触印象に影響を及ぼすことを確認した。

- ・同じ表面粗さを持つ2つのRPオブジェクトを併置する
- ・それぞれ異なる表面粗さのテクスチャ画像を重畳描画する
- ・一対比較法により、被験者は左右どちらのRPオブジェクトをより粗く感じるか回答する

実験1では、上記実験に聴覚刺激(強調接触音提示)を付加することで、MR型視覚刺激のみの場合よりも、触印象への影響が強まるかどうかを実験・検討する。具体的には、以下の2つの実験を順に行い、結果を比較する。

- (a) 触知する物体とその粗さに対応する聴覚刺激を提示し、視覚刺激のみ異なる粗さのものを重畳描画する(文献[3]実験1.1は自然な接触音を聴かせていた)
- (b) 触知する物体とは異なる粗さの視覚刺激と、その視覚刺激と同じ粗さの聴覚刺激を提示する

4.2 実験環境

実験環境を図8に示す。本実験で使用するMRシステムの構成は文献[3]と同様で、MR空間の観察にはヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted

Display; HMD)、被験者の頭部位置姿勢の計測にはAscension社の3Dレーザトラッカ laserBIRDを用いる。聴覚刺激はサンワサプライ社のインイヤースイヤホン MM-HP106Wを用いて提示し、実際に物体を撫でた時に生じる実際の接触音を完全に遮音するため、上からイヤーマフを装着する。

4.3 実験内容

被験者は、3.2.3の実験2で作成した強調接触音物体の表面外観から連想できると回答した21~24歳の男女13名である。聴覚刺激には、各被験者、2.3.3(2)の実験で粗さを連想できると回答した強調接触音BまたはDを提示する。聴覚刺激の提示時間は、1往復1秒の速さで撫でた接触音6往復分である。実験準備・手順は(a)(b)で同じである。

【実験準備】

- (1) 手の動きを聴覚刺激に同期させて対象物体を撫でる練習をさせる
- (2) 眼前に4種類のMR型視覚刺激を並べて提示し、対応する粗さの聴覚刺激を順に提示することにより、視覚刺激に対応する聴覚刺激の粗さを学習させる

【実験手順】

- (3) ランダムに選出した表面粗さが同じ2枚の物体(RPオブジェクト)を左右に併置する
- (4) 左右で異なる粗さの視覚刺激をランダムに重畳描画する
- (5) 左側の聴覚刺激から順に提示し、聴覚刺激が鳴り始めてから被験者に物体を撫でさせ、どちらの物体の触感をより粗く感じるか回答させる(「区別できない」という回答を許す)。要望に応じて聴覚刺激の提示を繰り返す。
- (6) 物体をランダムに入れ替え、全ての組合せが提示されるまで(3)~(6)を1度ずつ繰り返す
試行回数は、 ${}_4C_2$ ((a)では視覚刺激、(b)では視覚・聴覚刺激の組合せ) $\times 4$ (実物体の数) = 24回である。

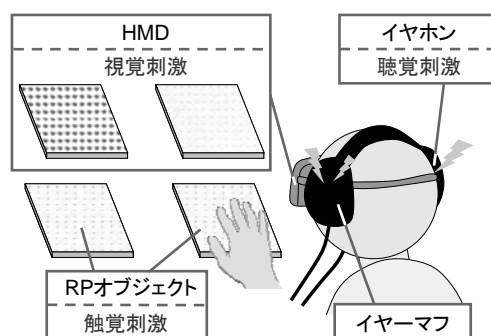


図8 実験環境
Fig.8 Experimental Environment

4.4 結果と考察

実験結果の全体的な傾向を図9に示す。文献[3]の結果と同様 (a) のMR型視覚刺激のみ変更した場合、視覚刺激が粗い方を触覚でも粗いと知覚する傾向にあり、視覚刺激が触印象へ影響を与えていることがこの図からも読み取れる。即ち、視覚によるフェイクで、触覚に錯覚が生じている訳である。また、表面粗さが滑らかな物体 (Rough 3, Rough 4) に関しては、「区別できない」と回答する被験者が多く、表面粗さが粗い方が、視覚刺激の影響をより強く受ける傾向にあるといえる。

一方、(b) の視覚・聴覚刺激両方を変更した場合は、全ての物体において、粗さに差があると感じた回答の割合が、視覚刺激のみを変更した場合の結果に比べて、12~15%増加した。表面粗さが粗い方が視覚刺激の影響をより受けやすい傾向は変わらないものの、Rough 3, Rough 4 についても粗さの差を感じた人数は増加している。また、被験者からも (b) のMR型視覚刺激と聴覚刺激の両方を変更した場合に左右で異なる触印象を受けたという意見を多く得られたことから、視覚刺激と聴覚刺激の両方でフェイクを加えたところ、さらに触印象へ影響（錯覚）が強まることが確認できたといえる。

なお、上記の結果は全体的傾向の概略を示したに過ぎないが、本実験が統計学的な観点からの有意差があるかどうかに関して、個々に綿密な分析を行った。まず、図9において「視覚刺激が粗い方を粗く感じる人数」に対して、2 (視覚のみ/視聴覚同時提示条件) × 4 (触覚刺激の粗さ条件) の分散分析を行ったところ、視覚のみ/視聴覚同時提示条件 ($p < 0.01$), 触覚刺激の粗さ条件 ($p < 0.05$) の主効果が有意であった。触覚刺激の粗さ条件の主効果についてさらに多重比較を行った結果、Rough 1-3間と Rough 1-4間に有意差がみられた ($p < 0.05$)。これらの検定

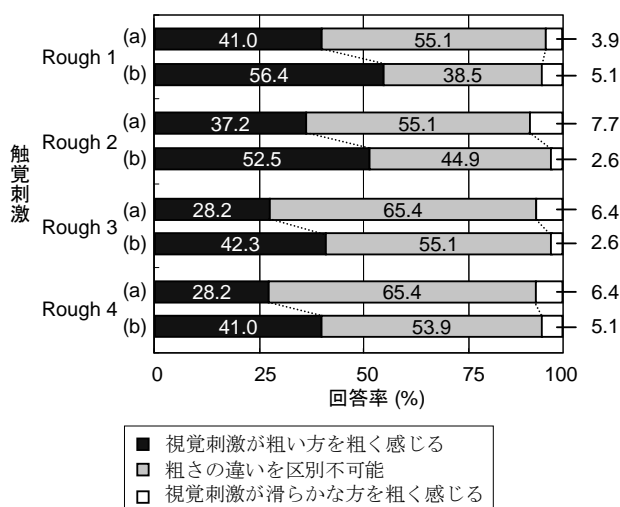


図9 実験1結果
Fig. 9 Result of Experiment 1

結果は、前段落で述べた結果とも一致する。

図10はRough 3に対する一対比較法の結果を図示したものである。これを分散分析した結果、刺激条件が有意となったため、刺激間の距離について差の検定を行ったところ図のような有意差がみられた。この図の(a)と(b)を比較すると、(b)ではCG 1-2間, CG 2-3間, CG 3-4間に有意差が現われていることが読み取れる。表2は、聴覚刺激を与えた場合、「右のRPオブジェクトが粗い」と回答した人数の増減を整理したものである。同表中には、2組の標本に「t検定」を行った結果も併記している。回答数の増減が多かった箇所は、この検定でも「有意差」が出ていることが確認できる。その程度は、図9で予想したものと一致していた。

他のRPオブジェクトについても同様な分析を行ったが、同じような傾向が確認できた。紙幅が限られているので、冗長な記述は避け、本論文では上記Rough 3に関する分析結果のみに留める。

5. 実験2: 異なる表面粗さをを用いた実験

5.1 実験目的

実験1では同じ粗さの2つの物体が、「聴覚刺激の付加により、表面粗さの触印象の影響（錯覚）が強

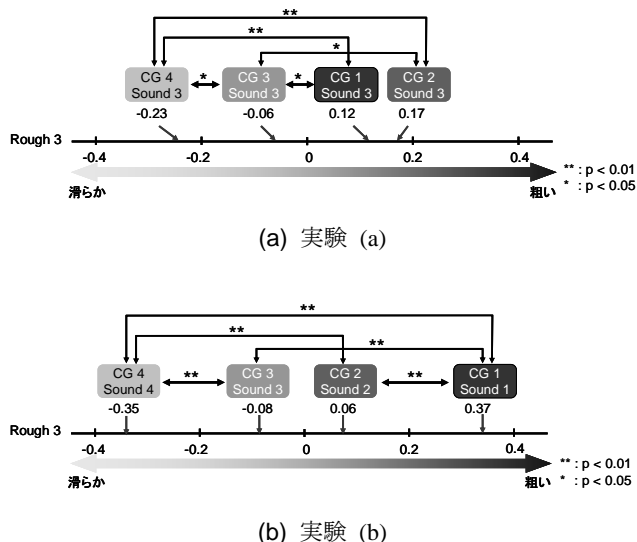


図10 実験1一対比較結果 (Rough 3)
Fig. 10 Result of Pared Comparison in Experiment 1 (Rough 3)

表2 実験1結果 (Rough 3)
右の方が粗いと判断された回答数
Table 2 Result of Experiment 1 (Rough 3)
Number of Subjects Who Perceive Right Object as Rougher

左	右	視覚刺激	聴覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
視覚刺激	聴覚刺激	Sound 1	Sound 2	Sound 3	Sound 4	Sound 3	Sound 4
CG 1	Sound 1						
CG 2	Sound 2	7 (+6)**					
CG 3	Sound 3	6 (+4)*	4 (-1)				
CG 4	Sound 4	6 (+0)	7 (+3)	5 (+1)			

括弧内の数値は、実験(a)からの増減値
*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

まる」という仮説が実証された。実験 2 では、異なった粗さの物体を併置した場合について実験・検討する。具体的には、以下の 2 点について実験する。

- ・表面粗さの異なる 2 つの物体を併置して触らせた場合、実験 1 同様の触印象への影響が見られるか？
- ・表面粗さの異なる物体間で、粗い物体にそれ自身より滑らかな MR 型視覚・聴覚刺激を、滑らかな物体にそれ自身のより粗い MR 型視覚・聴覚刺激を提示した場合、表面粗さの触印象が逆転することがあるか？

5.2 実験内容

実験 1 の (a) (b) と同様の実験を順に、併置する触知物体の粗さを替えて行う。実験環境、被験者、MR 型視覚・聴覚刺激も実験 1 と同じであるが、触知する物体は、2 種類 (Rough 2 および Rough 3) に限定する。これは、全ての組合せについて実験を行うと、試行回数が膨大になり、被験者が疲労を覚え、正しい実験を継続できないためである。

試行回数は、4×4 ((a) では視覚刺激、(b) では視覚・聴覚刺激の組合せ) =16 回である。

表 3 実験 2 (a) 結果
Rough 3 が粗いと判断された回答数
Table 3 Result of Experiment 2 (a)
Number of Subjects Who Perceive Rough 3 as Rougher

		触覚刺激	Rough 3			
		視覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
触覚刺激	視覚刺激	聴覚刺激	Sound 3			
Rough 2	CG 1	Sound 2	0	0	0	0
	CG 2		0	0	0	0
	CG 3		3	1	0	0
	CG 4		3	2	2	0

単位：人
 ■：同じ粗さの視覚・聴覚刺激を提示
 ■：粗い物体に滑らかな刺激、滑らかな物体に粗い刺激を提示

表 5 実験 2 (b) 結果
Rough 3 が粗いと判断された回答数
Table 5 Result of Experiment 2 (b)
Number of Subjects Who Perceive Rough 3 as Rougher

		触覚刺激	Rough 3			
		視覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
触覚刺激	視覚刺激	聴覚刺激	Sound 1	Sound 2	Sound 3	Sound 4
Rough 2	CG 1	Sound 1	0 (+0)	0 (+0)	0 (+0)	0 (+0)
	CG 2	Sound 2	3 (+3)	0 (+0)	0 (+0)	0 (+0)
	CG 3	Sound 3	4 (+1)	1 (+0)	0 (+0)	0 (+0)
	CG 4	Sound 4	4 (+1)	1 (-1)	3 (+1)	0 (+0)

単位：人
 ※ 括弧内の数値は、視覚刺激のみ変化させた結果と比較した増減値
 ■：同じ粗さの視覚・聴覚刺激を提示
 ■：粗い物体に滑らかな刺激、滑らかな物体に粗い刺激を提示

5.3 結果と考察

(a) の MR 型視覚刺激のみ異なった粗さを提示した場合、滑らかな方の実物体 (Rough 3) に対して、「より粗い」という逆転の回答を得たのは全回答中 5.3 % であり (表 3)、「区別できない」という回答は 10.1 % であった (表 4)。

一方、(b) の視覚・聴覚刺激両方でフェイクを与えた場合、視覚刺激のみの場合に比べて、滑らかな物体を「より粗い」とする逆転の回答は全体で 2.4 % (表 5)、「区別できない」とする回答は 6.7 % 増加した (表 6)。しかし、左右で粗さが異なる物体に、左右同じ粗さの視覚・聴覚刺激を提示した場合 (表 5 中太枠部) に着目すると、「区別できない」という回答は平均 46.2 % であり、38.5 % 増加した。

本実験結果に関しても、実験 1 の場合と同様な統計的検定を行った。紙幅の制限から、Rough 2, Rough 3 の粗さが正しく判断された結果は省略するが、検定の結果、最も大きく有意差が出たのは、左右両方の RP オブジェクトに CG 1, Sound 1 を提示した場合と CG 4, Sound 4 を提示した場合のプラス 7 名であった (表 6)。

以上の結果から、MR 型視覚刺激によるフェイク

表 4 実験 2 (a) 結果
粗さの違いを区別できないと判断された回答数
Table 4 Result of Experiment 2 (a)
Number of Subjects Who Perceive the Objects to be Indistinguishable

		触覚刺激	Rough 3			
		視覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
触覚刺激	視覚刺激	聴覚刺激	Sound 3			
Rough 2	CG 1	Sound 2	1	3	0	1
	CG 2		4	2	1	0
	CG 3		1	2	1	0
	CG 4		1	1	2	0

単位：人
 ■：同じ粗さの視覚・聴覚刺激を提示
 ■：粗い物体に滑らかな刺激、滑らかな物体に粗い刺激を提示

表 6 実験 2 (b) 結果
粗さの違いを区別できないと判断された回答数
Table 6 Result of Experiment 2 (b)
Number of Subjects Who Perceive the Objects to be Indistinguishable

		触覚刺激	Rough 3			
		視覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
触覚刺激	視覚刺激	聴覚刺激	Sound 1	Sound 2	Sound 3	Sound 4
Rough 2	CG 1	Sound 1	8 (+7)	2 (-1)	0 (+0)	0 (-1)
	CG 2	Sound 2	1 (-3)	6 (+4)	0 (-1)	0 (+0)
	CG 3	Sound 3	0 (-1)	2 (+0)	3 (+2)	0 (+0)
	CG 4	Sound 4	1 (+0)	2 (+1)	2 (+0)	7 (+7)

単位：人
 ※ 括弧内の数値は、視覚刺激のみ変化させた結果と比較した増減値
 ■：同じ粗さの視覚・聴覚刺激を提示
 ■：粗い物体に滑らかな刺激、滑らかな物体に粗い刺激を提示

に聴覚刺激のフェイクを付加することで、粗さの違いが感じられなくなる場合が明らかに増加していることが分かる。

以上の実験は、併置した2つの物体のいずれが粗いかを答えさせる実験であった。この他に、視覚・聴覚の両フェイクを与えながら、被験者に今触れている物体は、事前に知っている4種類の物体のいずれであるかを当てさせる実験を行った。この実験でも触印象の錯覚が生じている可能性を期待したが、実験の結果は、一部見当違いの回答をする被験者も存在したが、全くフェイクの影響は受けず、正しい回答をした被験者が大半であった。これは、求める回答が左右の粗さ比較ではなく、正答を求めるものであったため、被験者が正しい回答をしようと触知に集中したためであると考えられる。

6. むすび

本研究では、触知する実物体とは異なる粗さのMR型視覚刺激に聴覚刺激を付加して提示した場合に、より触印象へ影響を及ぼすかどうかについての研究実験結果を述べた。実験対象物体を撫でたときに発生する実際の接触音では、実験するに足る聴覚刺激が得られなかったため、視覚から連想される聴覚刺激（強調接触音）を合成し、目的とする系統的かつ客観的な実験を行って、しかるべき知見を得た。

実験の結果、聴覚刺激を付加した場合、以下の場合に、視覚刺激のみ提示の場合と比べ、より触印象に及ぼす影響が強まることが判明した。

- ・同じ粗さの実物体でも、粗さが異なった印象を与える視覚・聴覚的刺激を提示すると、触覚的に差があるように感じる
- ・異なる粗さの実物体でも、視覚・聴覚的に同じ粗さを感じさせる刺激を提示すると、触覚的な粗さの差を感じにくくなる

今回の実験で得た結果は、MR型視覚刺激だけの場合と同様、あらゆる場合に起こる現象ではないが、適切な刺激を提示することで、意図した錯覚を強めることが十分可能であるということを示している。即ち、「音も加えれば、きつともっと印象が変わる（騙されやすくなる）だろう」と漠然と考えていることをMR環境でも実証できた訳である。

その半面、もっと大きな劇的な変化が有ると期待した場合には、期待外れの結果であったかも知れない。そうであったとしても、この実験結果は1つの客観的事実であり、錯覚の度合いを試した資料的価値があるものと考えられる。

「適切な対象と刺激」は、簡単に類別・選択できることではない。しかし、工業製品の試作材料という

対象を限定した実験であっても、こうした客観的な事実があるということは、様々な実用的MRシステムの開発には有用である。例えば、強調した刺激を与え、印象的・効果的な演出を加えることで、体験者により魅力的なMR型情報提示が可能となる。

謝辞

本研究の一部は、科研費・基盤研究A「三感融合型複合現実空間の構成法に関する研究」による。

参考文献

- [1] 比嘉恭太, 西浦敬信, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “視覚・聴覚の現実と仮想を融合する2×2方式複合現実感システムの実現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 227 - 237, 2008.
- [2] 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! - 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] 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”, 同上, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
- [4] 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.
- [5] T. Ohshima, T. Kuroki, H. Yamamoto, and H. Tamura: “A mixed reality system with visual and tangible interaction capability: Application to evaluating automobile interior design,” Proc. 2nd IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 03), pp. 284 - 285, 2003.
- [6] S. J. Lederman and S. G. Abott: “Texture perception: Studies on intersensory organization using a discrepancy paradigm and visual versus textual psychophysics,” *J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 7, pp. 902 - 915, 1981.
- [7] 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.
- [8] S. J. Lederman, R. L. Klatzky, T. Morgan, and C. Hamilton: “Integrating multimodal information about surface texture via a probe: relative contributions of haptic and touch-produced sound sources,” Proc. 11th Annual Haptics Symp. for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 151 - 158, 2002.
- [9] V. Jousmäki and R. Hari: “Parchment-skin illusion: sound-biased touch,” *Current Biology*, Vol. 8, p. 190, 1998.
- [10] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd, and C. Spence: “Audiotactile interactions in roughness perception,” *Experimental Brain Research*, Vol. 146, pp. 161 - 171, 2002.
- [11] C. E. Constantinou, S. Omata, and Y. Murayama: “Multisensory surgical support system incorporating, tactile, visual and auditory perception modalities,” Proc. 4th Int. Conf. on Computer and Information Technology, pp. 870 - 874, 2004.
- [12] Xpress3D, <http://www.xpress3d.com/Materials.aspx>

(2008年12月16日受付)

[著者紹介]

鍵本 麻美 (学生会員)



2008年立命館大学理工学部情報学科卒。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と聴覚刺激が触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。2001年より2002年までMayo ClinicにてSpecial Project Associate。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。現在、University of Central Florida, Media Convergence Lab. 客員研究員。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、キャノン(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。