

複合現実型視覚刺激による触印象への影響 (3)

— 聴覚刺激の付加による新しい知見 —

Psychophysical Influence on Tactual Impression by Mixed-Reality Visual Stimulation (3) --- New Observation by Addition of Audio Stimulation ---

鍵本麻美¹⁾, 木村朝子²⁾, 柴田史久¹⁾, 田村秀行¹⁾
Mami Kagimoto, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

1) 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)

2) 独立行政法人 科学技術振興機構 さきがけ
(〒332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8)

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 has 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.

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

1. はじめに

我々は、複合現実感 (Mixed Reality; MR) の基礎研究の1つとして、視覚・聴覚・触覚の相互作用や補完現象を分析・検討する研究を行っている。その第1段階として、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」が触印象に与える影響を実験・分析した[1]。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もある
- ・ 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可能である

なる知見を得た。

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。実験結果は、あらゆる場合に起こり得る現象ではないが、適切な視覚刺激と触覚刺激の組合せを選ぶことによって、十分工業的用途にも応用し得るというものであった。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。であれば、聴覚刺激も恣意的に変化させることにより、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られる。既に、聴覚刺激が触印象に影響を及ぼした研究例[2][3]が存在し、物体を擦り合わせた時に発生する接触音の周波数エネルギーを変えて提示すると、触覚的な粗さに差がある

と感ずることが報告されている。

我々は、従来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・検討することにした。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ので、視覚から連想される聴覚刺激(強調接触音)を合成することから始めた。そうして得た一連の強調接触音をもとに、当初目的の実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験準備

2.1 提示する刺激

従来の研究実験[1]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; RP) オブジェクトであり、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[1]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

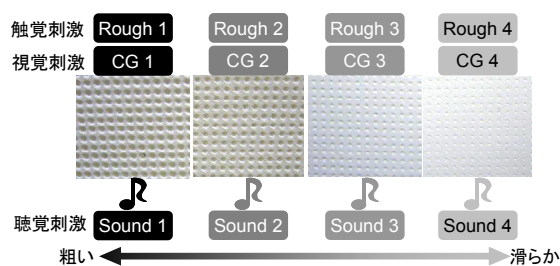


図1 提示する刺激

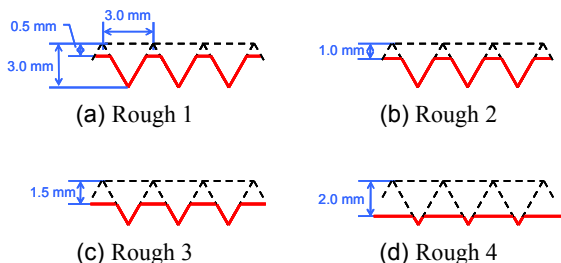


図2 RP オブジェクト表面のデザイン (実線部が物体表面を示す)

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。本研究では、ある種の「錯覚」の存在を実証することにあるのだから、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、実験対象の物体に触れたと感じ、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する
- ・ 4 種類の聴覚刺激から物体の表面粗さを区別できる
- ・ RP オブジェクトの接触音として違和感がない

2.2 聴覚刺激の作成と評価

2.2.1 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中には、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

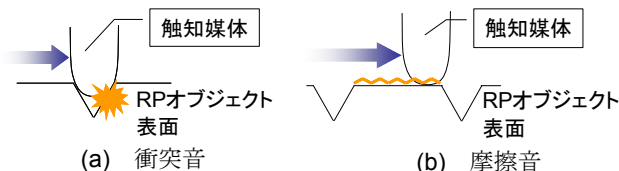


図3 RP オブジェクトから発生する接触音

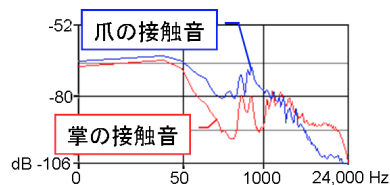


図4 爪と掌の接触音の周波数エネルギーの違い

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1往復（約30 cm）1秒の速さで撫でたときの接触音を録音し、周波数解析を行ったところ、爪で触れた接触音には周期的に周波数エネルギーが大きき部分があり、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。

2.2.2 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。

- 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を使用する。
- 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4の5 kHz以下の爪の接触音を20 dBだけ減衰する。
- 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、対応する実物体の接触音を利用する。
- Sound 1～Sound 4で合成後の音量を正規化する。
- 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。

2.2.3 評価実験

2.2.2の手順で作成した4組の聴覚刺激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。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。

- 聴覚刺激を無作為に1種類ずつ提示し、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
- 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 ((1)の実験で粗さ順位を正答した聴覚刺激のみ) を順に聞かせたのち、被験者に「4種類の音が各 RP オブジェクトの外観から連

表 1 作成した聴覚刺激

		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
	合成後の増幅率	1.2	1.0	0.8	0.6

原音の音量:1.0

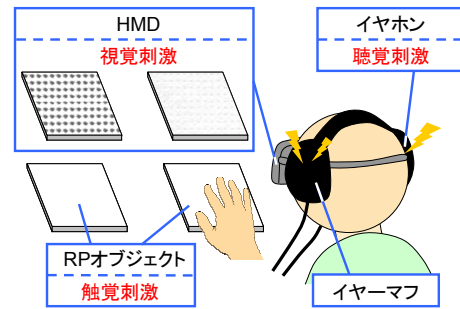


図 5 実験環境

想される接触音であったか」回答させる

(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、(2) の実験で、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。

3. 実験 1

3.1 実験目的

文献[1]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
- ・それぞれ異なる表面粗さのテクスチャ画像を重畳描画
- ・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

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 つの実験を行い、結果を比較する。

- 触知する物体とその粗さに対応する聴覚刺激を提示し、MR 型視覚刺激のみ異なる粗さのものを重畳描画する（文献[1]実験 1.1 は自然な接触音を聴かせていた）
- 触知する物体とは異なる粗さの MR 型視覚刺激と、その視覚刺激と同じ粗さの聴覚刺激を提示する

3.2 実験環境

実験環境を図 5 に示す。本実験で使用する MR システムの構成は、文献[1]と同様である。聴覚刺激はサンワサプライ社のインイヤースイヤーホン 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。

3.3 実験内容

被験者は、2.3.3 の評価実験 (2) で作成した強調接触音が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)

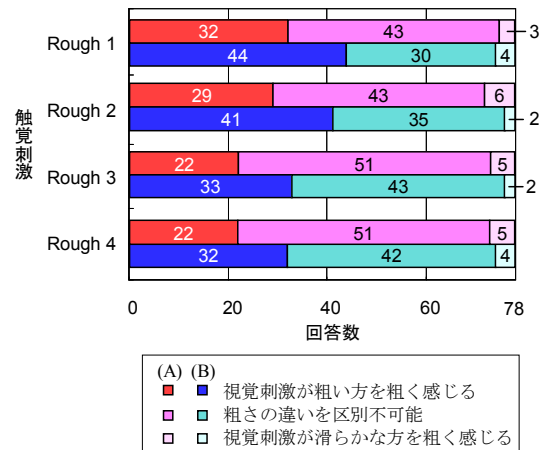


図 6 実験 1 結果

と同じである。

【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で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) 左右で異なる表面粗さの視覚刺激を重畳描画する
- (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、全ての組み合わせが提示されるまで (3)~(6) を繰り返す

3.4 結果と考察

実験結果を図 6 に示す。文献[1]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判る。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 に関し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が多かったことから、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。

4. 実験 2

4.1 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？

4.2 実験内容

実験 1 の (a) (b) と同様の実験を、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。

4.3 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、「区別できない」という回答は 10.1 % であった。文献[1]の結果と同様、視覚刺激によるフェイクを与えても、粗さを逆転して感じることはまずないが、粗さの差を感じていない場合がかなりあることが分かる。

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 %、「区別できない」とする回答は 6.7 % 増加した (表 2)。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 2 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 % も増加した。

以上の結果から、MR 型視覚刺激によるフェイク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

表 2 視覚・聴覚刺激の両方を変更した場合、粗さの違いを区別できないと判断した人数

		触覚刺激		Rough 3			
		視覚刺激	聴覚刺激	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
Rough 2	視覚刺激						
	聴覚刺激						
	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)		

※ 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

単位：人

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。

5. 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検討した。実験の結果、聴覚刺激を付加した場合、以下の点において、視覚刺激のみの場合と比べ、より触印象に及ぼす影響が強まることがわかった。

- ・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。

次の段階として、今後は実物体とは異なる素材の視覚刺激に聴覚刺激を付加した場合、(1) 触覚へ素材感を提示することが可能か、(2) 素材感提示可能な素材が増えるか、の 2 点について検討することを計画している。

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] 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”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
- [2] V. Jousmaki and R. Hari: “Parchment-skin illusion: Sound-biased touch,” Current Biology, Vol. 8, p. 190, 1998.
- [3] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd and C. Spence: “Audiotactile interactions in roughness perception,” Experimental Brain Research, Vol. 146, pp. 161 - 171, 2002.