基礎論文

複合現実型視覚刺激による触印象への影響

家崎 明子[*1*3], 杣田 明弘[*1], 木村 朝子[*2], 柴田 史久[*1], 田村 秀行[*1]

Psychophysical Influence on Tactual Impression by Mixed-Reality Visual Stimulation

Akiko Iesaki[*1*3], Akihiro Somada[*1], Asako Kimura[*2], Fumihisa Shibata[*1], and Hideyuki Tamura[*1]

Abstract — This paper describes the influence of visual stimulation on tactual sense in mixed reality (MR) environment; i.e. how tactual impression of real object is affected by seeing a superimposed image which is taken from a different kind of material. If the behavior and extent of such an influence, a sort of illusion, are well investigated, the objects whose materials are very limited can be perceived differently. This would greatly come in useful in the field of digital engineering. Thus, we performed various experiments systematically. As the result, we obtained the interesting and promising result: (1) the feeling of texture can be represented by MR visual stimulation if the roughness on the surface of object is visually and tactually similar, and (2) even though the roughness on the object is visually and tactually similar, the feeling of texture cannot be represented because of the hardness when gripping the object.

Keywords: mixed reality, tactual impression, texture perception, digital manufacturing, influence of visual stimulation

1. はじめに

現実世界と仮想世界を違和感なく実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術[1][2]は，これまで視覚的な融合を中心に研究が行われてきた．MR は電子的な情報のみで構成される人工現実感 (Virtual Reality; VR) の拡張であるが，体験する世界のすべてをモデル化し，電子的に表現する必要がない点で VR よりも優れているといえる．すなわち，MR では現実世界に存在するものはそのまま利用し，付加させたい情報だけを電子的に生成し，融合すればよい．このように，MR は VR に比べ空間の設計に関する自由度が大きいことから，新たな研究分野として注目されている[3].

視覚と聴覚に関しては，汎用的なディスプレイが既に存在する．TV モニタやビデオ・プロジェクタ，スピーカやヘッドホンなどがその例である．しかし，触力覚ディスプレイに関してはそうしたものが存在せず，限られた表現能力を持つものしか実現されていない．ここに視覚的な MR の活躍の余地がある．例えば実在の物体を掴んだり，押したりすることで，本物の触感を得て，そこに視覚的にのみ電子的なデータを重ね合わせるという用途が考えられる．実際にこのような試みは既に行われており[4][5]，玩具の銃を手にして CG の敵を倒す戦闘シミュレーションや，ステアリングやシフトレバーを操作しながら運転シミュレーションを行うシステムが実現されている．さらに，[6]ではこのような機能を自動車インテリア・デザインに積極的に取り入れ，その有用性を実証している．

このシステムの機能は**図 1** のように要約される．すなわち，実物体に触れながら，その表面には実際とは異なる CG モデルを重畳描画することによって自動車のインテリア・デザインを検討することができる．また，CG モデルを変更することにより，別

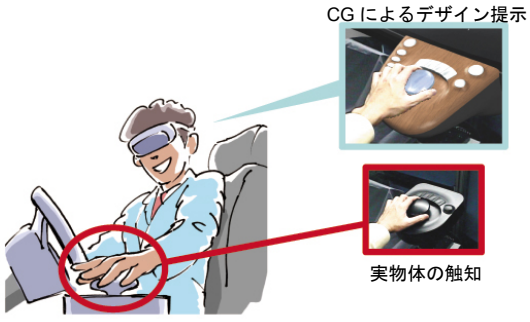


図 1 MR 型視覚刺激の提示
Fig. 1 Presentation of MR visual stimulation

*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 科学技術振興機構 さきがけ
*2 PRESTO, Japan Science and Technology Agency
*3 現在, ボッシュ株式会社
*3 Bosch Corporation

の色や形のデザインについても検討ができ，実物体とは別の材質の CG モデルを重畳描画することで視覚的に材質の変更も可能である．

この時，見ているものと触っているものの材質が違えば，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．また，その程度が既知であり，環境によってはその影響を意図的に利用できるのであれば，それは産業的にも役立つと考えられる．実物体は限られた種類のものだけを用意しておき，異なる材質の視覚刺激によってそれらの材質をもっと多様なものと思わせることができるからである．

我々は以上のような興味から，MR 空間における視覚刺激（以下，MR 型視覚刺激）が触覚にどのような影響を及ぼすかを研究している．触覚から得られる情報には様々な因子が存在するが，本研究ではまず表面粗さ (roughness) に焦点を当て，MR 型視覚刺激による触印象の変化に関して，一連の系統的な実験を行った．本論文では，現時点までに得られた知見に関して報告する．

2. 関連研究

前述のように，我々の研究は，大島らの MR 応用研究[6][7]が既にあることを前提にしている．このシステムでは，実物体に同形状の CG モデルを幾何学的に正確に重畳描画することを達成している．この CG モデルを様々に変更することにより見て触れながらデザインを繰り返し検討することができる．この時，実際に触れたり握ったりする感覚が臨場感の向上に重要であったと記しているが，提示する CG 画像の変更が触覚で受ける印象（触印象）にどのような影響を及ぼしたかについては言及していない．

視覚刺激が触覚に与える影響に関する研究例は既にいくつか存在する．例えば，Lederman ら[8]は，視覚と触覚に異なる粗さのサンドペーパを提示した際，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．Biocca ら[9]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．Rock ら[10]は，被験者が拡大鏡で手に持ったキューブのサイズを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．テクスチャに着目しているという点で，[8]は非常に興味深い結果を示している．しかし，この研究では視覚・触覚刺激共にサンドペーパを用いており，両刺激の材質が異なる場合に触覚にどのような影響が現れるのかは示されていない．

MR 環境での視覚刺激が触印象に与える影響という，我々と類似した発想での研究例には，中原らの報告[11] – [13]がある．特に，[12]では，物体の曲率に着目した実験結果を示している．また[13]では，石，鉄，素焼きの陶器等の実在物体とそれを写真撮影したテクスチャ画像を利用して，視触覚に提示したところ，特定の組み合わせで，見た目と同じ材質と触知されることが報告されている．この一連の研究は，MR 視覚刺激によって触印象に錯覚を起こしうることを示しているが，予め準備された素材内での組み合わせに限られていた．

我々の研究では，これらの研究を参考にしつつ，触覚の対象を限られた素材に限定し，MR 型視覚刺激の援用により，もっと多数の素材であるという触印象（素材感）を与え得る可能性を検討する．これは，工業製品の設計・製造分野で活用されている形状成形装置で扱う素材を主たる対象と考えるためである．具体的には，表面粗さを段階的に変化させた実物体を用い，基礎からの系統的な実験を行なった．

3. 目的と実験準備

3.1 目的と実験対象

MR 型視覚刺激が触覚に与える影響を調査する上で，我々の研究は以下を前提としている．

- CG 技術の発展により，視覚的には極めて豊かな表現が可能となった．それに対し，触覚ディスプレイの表現力は明らかに劣っている．
- 過去の研究から，視覚刺激によって触知覚が影響を受けることが知られている．そこで，この影響を積極的に利用し，表現力の劣る触覚情報を補うことが考えられる．
- MR 型視覚刺激を提示する際，視覚と触覚，どのような組み合わせの場合，どの程度の影響があるかを解明することが必要である．そのために，客観的で系統的な実験を行なう．

以上のような前提を置いてもなお，さらに実験の条件を絞り込む必要がある．触覚から得られる情報には，粗さ，硬さ，温度など様々な因子が存在するからである[14][15]．また，触知方法には撫でる，押す，握るなどがある[14]．このように複数の要因およ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，我々は以下の場合に限って考えることにした．

(1) 実物体と重畳描画する CG モデルの形状は同じとする．また，実物体は触っても変形しない剛体のみを対象とする．
(2) 均質な表面の素材感の違いのみを検討対象とする．物体に重畳描画する CG モデルは，実在する素材の画像（以下，テクスチャ画像）をテクスチャ

マッピングしたものを用いる．

(3)触知方法は，物体の表面を撫でる（手を左右に動かす）こととし，その際感じる表面粗さを研究対象とする．これは，表面粗さが素材感を得る上で最も重要な要因とされているからである[15].

以上のように実験の対象に制約を設けたが，図 1 のような用途には，それでも大いに意義がある．近年，インダストリアル・デザインの大半は Computer Aided Design (CAD) で設計されている．一旦，その幾何形状や表面材質が決まれば，CG 技術によって，設計結果を確認することができる．また，CAD によって作成された幾何形状データから，正確かつ簡便に成形し，物理的な 3 次元オブジェクトが得られるようになった．このプロセスは，ディジタル・マニュファクチャリングにおけるラピッド･プロトタイピング (Rapid Prototyping; RP) 技術と呼ばれている．RP に使用される素材は ABS 樹脂や，ABS ポリカーボネートなどが挙げられる[16]．この技術は年々進化しているが，素材が限られていることは如何ともしがいたい．しかし，MR 技術による視覚的な刺激によって素材感を補うことができるならば図 1 のような用途には大いに意義があると考える．

このような観点の下に研究を進めるため，この実験に用いる実物体には，実際に RP で生成したものを用いる．以下の実験では，まず平面状の実物体を使用し基礎的な実験を始め，後に曲面を有する物体へと発展させる．

3.2 実験準備

［実験環境］

本研究では，ビデオシースルー型の MR システム[17]を採用している．被験者は，2 台のビデオカメラが内蔵されたヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) で MR 空間，すなわち，自分の眼前に CG が重畳描画されたステレオ画像を見ることで，両眼立体視をしながら観察することができる．**図 2** に，本研究実験の実施風景を示す．

被験者の頭部位置姿勢情報は Ascension 社の 3D レーザトラッカ laserBIRD および Polhemus 社の磁気センサ 3SPACE FASTRAK を使用する．いずれを使用するかは後述の実験によって異なる．これにより，被験者は MR 空間の観察中でも自由に頭部を動かすことができる．一見すると，これら頭部位置姿勢情報の取得と両眼立体視は触覚の実験にはあまり重要でないと思えるかもしれない．しかしながら，いま目の前にある物体に自分が触れているという体験をするためには，重要な機能であると言える．

また，MR 空間を提示する際，現実空間からキャプチャした画像に CG を単純に重畳描画したのでは，CG が常に最前面に描かれることになる．その結果，自分の手が CG によって覆い隠されてしまうという問題が生じる．このオクルージョン問題を解決しないと，自分の手で物体を触っているという感覚が得にくくなると考えられる．そこで，我々は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 CG が重畳描画されないようにした．**図 3** にこの処理の結果を示す．

［実験対象］

前述のように，本研究では被験者が触れる実物体として，ABS 樹脂を用いて成形した RP オブジェクトを採用する．実験対象・種類・手順を**表 1** に示す．実験 1.2 を除く全ての実験に RP オブジェクトを使用する．物体の形状は，実験 1.1～2.2 は平面状の物体 (15 × 20 cm) を用い，実験 2.3 以降は杖の把持部を想定した曲面の物体（表 1）を用いる．さらに，実験 2.2 以降を効率的に進めるための準備作業として，別途実験 2.1 を設け，5.1 節にその詳細を述べる．

表面を触った時に，異なる表面粗さを感じるように，RP オブジェクト表面を**図 4** のように加工する．これは CAD データ作成時にモデル表面に同じ大きさの逆円錐を等間隔に配列し，カットする高さを一定量ずつ変化させることで，表面粗さを 4 段階に変えて成形している．「粗さ」の違いを表現するのは色々な方法が考えられるが，ここでは，現状の RP 加工の精度を考慮し，試行錯誤を繰り返して，最も違いを感じやすいパターンと加工法を選んだ．また，4 段階を選んだのは，多過ぎず，かつ被験者が安易に中間を選択しないようにとの配慮からである．

実物体に重畳描画する CG モデルには，**図 5** に示す画像をテクスチャマッピングした．これらはいず

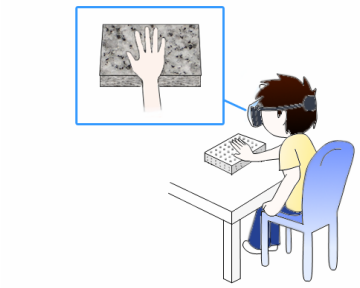
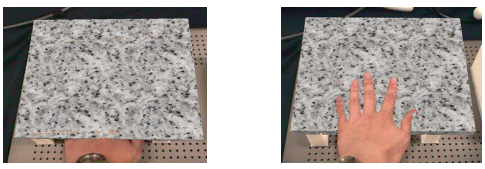


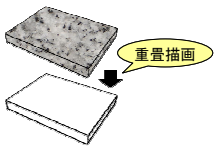
図 2　実験風景
Fig. 2 Experimental Scene

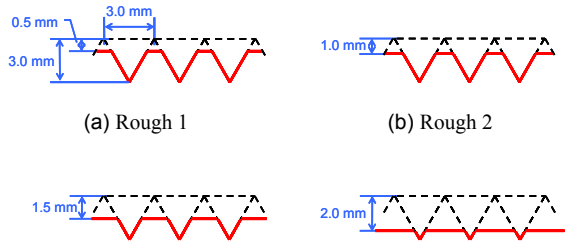


(a) 適用前　　(b) 適用後

図 3　手領域抽出
Fig. 3 Extracting Hand's Area

表 1　実験概要
Table 1 Experimental Overview

	実験 1.1	実験 1.2	実験 1.3	実験 2.1	実験 2.2	実験 2.3	実験 2.4
実物体	RP	RP	布・合皮	RP			
CG	RP	RP	布・合皮	様々な素材			
形状	平面					曲面 *予備知識無し	曲面 *予備知識有り
イメージ							



(a) Rough 1　(b) Rough 2　(c) Rough 3　(d) Rough 4

図 4　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. 4 Artificial Rough Surface

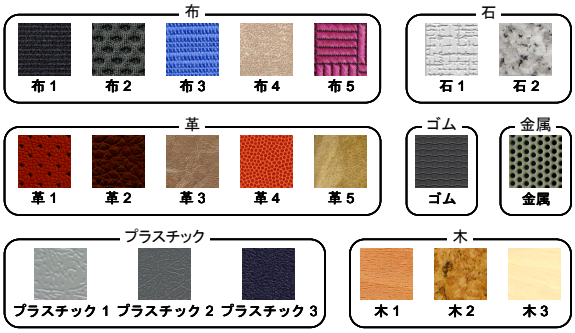


図 5　重畳するテクスチャ
Fig. 5 Texture Presentation

れも実存する素材の表面の写真であり，コンピュータで作成した合成画像ではない．これらを，実験 2 以降の本実験で CG モデルにテクスチャマッピングし，視覚刺激として提示する．予備実験では，さらに限られた画像を使用する．

このテクスチャ画像をいきなり MR 空間で見せたのでは，素材の触感のイメージが伝わりにくいと考える．そのため，図 6 のような用紙を実験前に予め見せておく．すなわち，被験者は裸眼の状態でそれぞれのテクスチャ画像が，どのような場面で使われているかを把握し，その素材と触感を頭の中にイメージしておくことができる．また，図 5 の各画像は，材質名と数字[1]を組み合わせて命名してあるので，その名称からも触感が容易に想像できるものであると考えられる．

[1] 粗さの順序に先入観を与えないよう，数字は無作為に割り当てている．

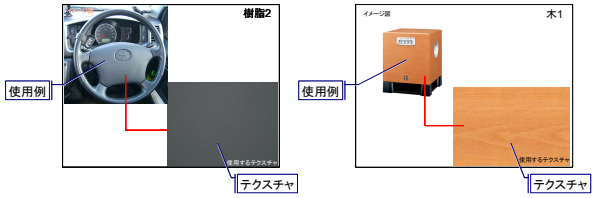


図 6　テクスチャの使用例
Fig. 6 Texture and Example of Use

4. 予備実験

人工的な RP オブジェクトに対し，実際に工業製品に利用されている様々な材質のテクスチャ画像を重畳描画する実験を行う前に，まず表面粗さに関する基礎的な実験を行っておく．触覚刺激の材質と MR 型視覚刺激の材質が異なる場合，どのような要因が作用したか分からなくなる．そこで，まず視覚刺激と触覚刺激の材質を同一にし，視覚刺激の粗さのみを変更することで，触印象にどのような影響を及ぼすか調査する．

4.1 実験 1.1：人工的な表面粗さを用いた実験 1

4.1.1 実験目的

予備実験では以下に示す条件のもとで MR 型視覚刺激が触印象に影響を及ぼすか調査する．

・視覚も触覚も人工的な RP オブジェクトを利用
・表面粗さが明確に段階的に変化しているもの 4 種
・同じ表面粗さを持つ 2 つの RP オブジェクトを併置し，それぞれ異なる表面粗さのテクスチャ画像を重畳描画

4.1.2 実験内容

触覚刺激には前述した段階的に表面粗さが異なる 4 種類の平面状 RP オブジェクトを用いる（図 4）．また，視覚刺激にはこれら 4 種類の RP オブジェクト表面の画像をテクスチャマッピングした CG モデルを用いる．また，触覚刺激は粗いものから順に Rough 1～Rough 4 と呼び，視覚刺激は粗いものから順に CG 1～CG 4 と呼ぶこととする．なお，これらの視覚刺激と触覚刺激の粗さの順位については，被

験者に予備体験させたところ，視覚・触覚のいずれで，全員が我々の期待通りの順序で視覚および触覚それぞれについて粗さの違いを感じていることを確認した．

実験手順はまず，HMD を装着した被験者の眼前に同じ表面粗さを持つ 2 つの RP オブジェクトを配置し，それぞれに対して異なる表面粗さのテクスチャ画像を重畳描画する．HMD にはレーザトラッカのレシーバが搭載されており，これ以降平面を用いる実験についても同様である．

被験者はテクスチャ画像を見ながら RP オブジェクトに触れ，必ず左右どちらをより粗く感じるか回答する．この過程はサーストンの一対比較法の手順に基づいており，被験者が 3 つ以上の選択肢で迷うことなく，かつ最も簡便に心理尺度を構成する方法としてこれを採用した．我々の仮説通り，MR 型視覚刺激によって触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．

試行回数は被験者 1 名あたり ${}_4C_2$（テクスチャ画像の組合せ）×4（実物体の数）= 24 回である．本実験以降，全ての実験において被験者は成人男女 13 名とする．

4.1.3 実験結果と考察

結果を**図 7** に示す. 図中の各線は触覚刺激ごとに，得られた触印象の心理尺度を示している．各数直線上に記された矢印と数値は，その上に書かれた MR 型視覚刺激を実物体に重畳描画した際に得られた粗さの程度を示す．数値が大きくなるにつれて，被験者は実物体を滑らかに感じたことを示している．

この結果より，異なる粗さの MR 型視覚刺激を提示した場合，同じものに触れているにも関わらず，視覚的に粗く感じるものを触覚的にも粗く感じる傾向にあるといえる．即ち，視覚刺激に触印象が影響していることが確認できた．

この実験で，被験者の多くからは，Rough 4 に関してはほとんど違いを感じなかったという意見が得られた．これは，表面粗さが一定水準以下の滑らかな物を触っている場合は，視覚的に粗いものを見ていても，触印象は影響を受けないという仮説が生まれる．ただし，これはまだ客観的に証明された訳ではなく，その一定水準を測るにはさらに膨大な実験を要すると考えるので，ここではその傾向が見られたと記すに留める．

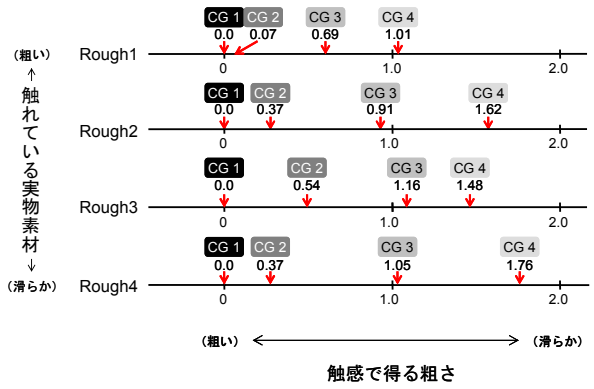


図 7　実験 1.1 結果
Fig. 7 Result of Experiment 1.1

4.2 実験 1.2：人工的な表面粗さを用いた実験 2

4.2.1 実験目的

実験 1.1 では，表面粗さが同じ RP オブジェクトを併置したが，本予備実験では，表面粗さの異なる RP オブジェクトを併置し，これらに CG 1〜CG 4 の視覚刺激を重畳描画し，一対比較を行う．このとき，触感として滑らかな RP オブジェクトを粗い，または同じ粗さと判断したり，粗さの判別に手間取ることがあるかどうか確認する．

4.2.2 実験内容

触覚刺激には実験 1.1 で用いた RP オブジェクトの中の 2 種類（Rough 2 および Rough 3）を用い，視覚刺激には同様に RP オブジェクトのテクスチャ画像 (CG 1〜CG 4) を用いる．なお，提示する触覚刺激を 2 種類に限定したのは，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るためであり，事前の少人数による実験により 2 段階以上粗さが離れた組み合わせでは，触印象が判断を誤る可能性はないことが確信できたためである．

実験手順は実験 1.1 とほぼ同じであるが，本予備実験では，一対比較の結果粗さの違いを判別できない場合に「同じ」という回答を許すことにした．こちらは，事前の試行実験により，視覚・触覚刺激の組合せによって粗さの違いが判断できなくなるという現象が起こったためである．

試行回数は被験者 1 名あたり 4^2（テクスチャの組合せ）×1（実物体の組合せ）= 16 回である．

4.2.3 実験結果と考察

結果を**表 2〜4** に示す．より滑らかな実物体 (Rough 3) に粗いテクスチャ画像を重畳描画したものと，より粗い実物体 (Rough 2) に滑らかなテクスチャ画像を重畳描画したものが併置された場合に，「どちらが粗いかわからない」という回答が得られたり（全回答中 14.1 %），正しく回答したものの回答までに時間を要する（全回答中 12.9 %）といった現象が見られた．また，より滑らかな実物体が「より粗い」と判断されたのは 3.8 %であった．

以上の結果から，MR 型視覚刺激によってより滑らかな実物体を「より粗い」と触知されることはないものの，粗さの差を感じ難くなり，判断までに時間を要するようになる場合があることがわかった．

表 2　Rough 3 が粗いと判断された回答数
Table 2 The Number of the Answers with the Subject Has Tactually Perceived the Rough3 Rougher

	実物体	Rough 3			
実物体	テクスチャ画像	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
Rough 2	CG 1	0	0	0	0
	CG 2	0	1	0	0
	CG 3	2	0	0	0
	CG 4	0	0	1	0

（単位：人）

表 3　粗さの違いがわからないと判断された回答数
Table 3 The Number of the Answers with Non-identified Pairs

	実物体	Rough 3			
実物体	テクスチャ画像	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
Rough 2	CG 1	1	2	0	1
	CG 2	2	1	1	2
	CG 3	1	2	1	2
	CG 4	3	2	1	2

（単位：人）

表 4　粗さの判断に時間を要した回答数
Table 4 The Number of the Answers Subject Took Times to Judge

	実物体	Rough 3			
実物体	テクスチャ画像	CG 1	CG 2	CG 3	CG 4
Rough 2	CG 1	0	0	1	2
	CG 2	1	0	0	1
	CG 3	0	1	0	1
	CG 4	6	1	1	0

（単位：人）

4.3 実験 1.3：人工的でない表面粗さを用いた実験

4.3.1 実験目的

本予備実験では，工業製品で使用され，我々が日頃よく接する素材を用いた場合でも，実験 1.1 と同じ現象が起こるかどうかを確認する．ここでは，下記の対象を選んだ．

- 素材には布と合皮を採用し，それぞれの素材ごとに視覚刺激および触覚刺激として提示する
- それぞれ粗さの異なる 4 種類の材料を選択したが，実験 1.1 で用いた RP オブジェクトとは異なり，粗さの変化は均一ではない（図 8）

4.3.2 実験内容

使用する素材を図 8 に示す．実験 1.1 同様，触覚刺激の粗いものから順に Rough 1～Rough 4，視覚刺激の粗いものから順に CG 1～CG 4 と呼ぶ．評価方法は実験 1.1 同様であり，布および合皮それぞれ独立して評価を行う．なお，粗さの順位は事前に一対比較法を行い，全ての被験者が我々の意図した通りの順序で粗さを感じていることを確認している．

試行回数は被験者 1 名あたり ${}_4C_2$（テクスチャ画像の組合せ）×4（実物体の数）＝24 回である．

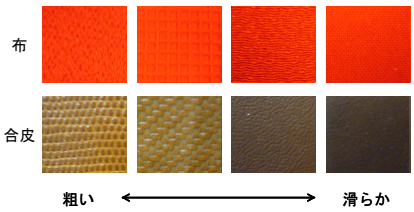
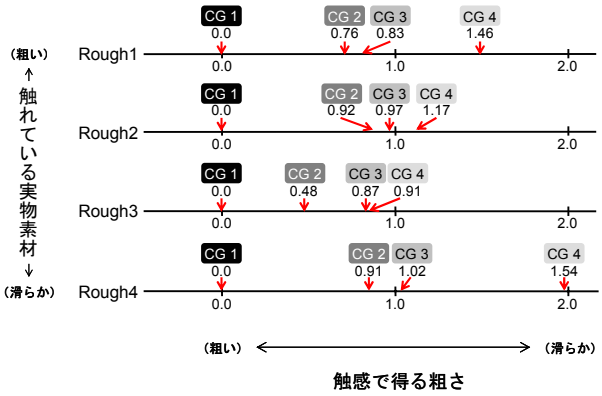
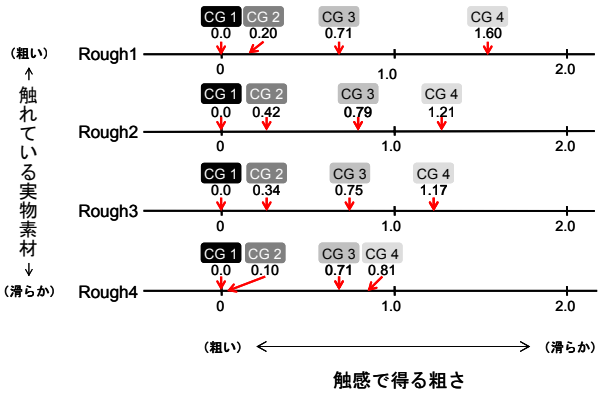


図 8　選択した素材
Fig. 8 Selected Non-artificial Rough Surface



(a) 布についての結果



(b) 合皮についての結果

図 9　実験 1.3: 結果
Fig. 9 Result of Experiment 1.3

4.3.3 実験結果と考察

布に関して行った実験結果を**図 9 (a)** に，合皮に関して行った実験結果を**図 9 (b)** に示す．

結果より，実験 1.1 と同様に同じ表面粗さの物体を触っていても，視覚的に粗いものを触覚的にも粗く感じる傾向が確認できた．ただし，滑らかな実物体に関してはその現象がほとんど現われないという傾向は，実験 1.1 よりも顕著にみられた．これは，自然物には，粗さを強調して作った人工物よりも多様な粗さの判断要素が含まれているために，粗さの

違いが明確に感じられず，触覚が影響されにくかったと考えられる．言い換えれば，粗さの判断要素を少なくするよう，うまく設計した RP オブジェクトを触対象とした場合には，視覚刺激を効果的に用いて触印象に意図的な影響を与えることができる可能性が高いことになる．

5. 実験：MR 型視覚刺激による素材感提示

予備実験により，我々の目的とする MR 型視覚刺激が触印象に影響を与えることが確認できたので，次に本実験を行う．すなわち，図 5 に示す様々な材質の MR 型視覚刺激を人工的な RP オブジェクトに提示する実験である．

5.1 実験 2.1：視覚刺激の素材に近い粗さを持つ実物体の選択

5.1.1 実験目的

次の実験 2.2 では，再び予備実験と同じ 4 段階に粗さの異なる平面状の RP オブジェクトを使う．この 4 種類の実物体に対し，図 5 の各画像を MR 型視覚刺激として提示したのでは，組み合わせの数が膨大になる．よって，各画像から見て，どの粗さの RP オブジェクトが適しているか，すなわち最も視触覚間の印象に違和感が無いかを選択しておき，選ばれた各画像と RP オブジェクトの組み合わせのみを次の実験 2.2 で用いる．

5.1.2 実験手順

全ての素材に対し，被験者ごとに以下の手順で予備実験を行う．

(1)HMD を装着した被験者の眼前に，無作為に選択した，表面粗さの異なる 2 枚の RP オブジェクトを左右に配置する
(2)図 5 から選んだ 1 種類のテクスチャ画像を，左右の RP オブジェクトにそれぞれ重畳描画する
(3)被験者は両方の RP オブジェクトに触れ，どちらの方が，見た目と触感がより近いと感じるかを回答する
(4)RP オブジェクトを無作為に入れ替え，4 種類全ての組合せが提示されるまで (2) から (4) を繰り返す
(5)サーストンの一対比較法を用い，MR 型視覚刺激によって感じる触感と RP オブジェクトの触感の類似度に関する心理尺度を求める

各テクスチャ画像に対し，得られた心理尺度が最も小さい RP オブジェクトを，適する RP オブジェクトとする．

試行回数は被験者 1 名あたり ${}_4C_2$（実物体の組合せ）×20（テクスチャ画像の数）＝120 回である．

5.1.3 実験結果

実験結果を**図 10** に示す．横軸は素材（視覚的な粗さの順に記載），縦軸はプラスチック板の粗さ，グラフ中の四角は粗さが最も近いと判断された組み合わせを示している．なお，テクスチャ画像の粗さ順位は，事前に被験者に図 5 の全ての画像をより粗く感じる順に並び替えさせ，正規化順位法により求めている．

一部のテクスチャ画像について，複数のプラスチック板との類似度に有意差が見られない組合せがあった．これらについては，後述の実験で複数の実物体を提示するものとする．

5.2 実験 2.2：平面の実物体に対する素材感提示

5.2.1 実験目的

本実験では，実物体に異なる様々な材質の MR 型視覚刺激を提示することで，視覚で提示する素材感を触覚からも得ることが可能か調査する．

5.2.2 実験内容

触覚刺激には 4 種類の平面状の RP オブジェクトを，視覚刺激には図 5 で示すテクスチャ画像を用いる．

実験手順はまず，実験 2.1 で選出された 22 通りの視覚・触覚刺激の組み合わせを被験者に提示する．被験者は見た目と触感が合っているかどうか，3 段

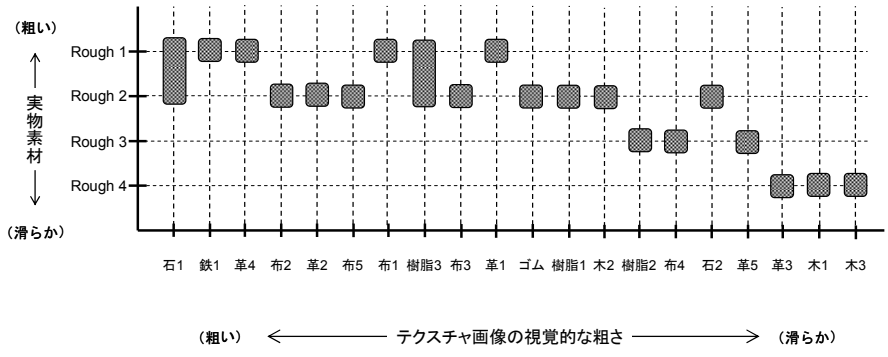


図 10 選択された実物体とテクスチャ画像の組合せ
Fig. 10 Selected Pairs of Real Object and Texture Images

階評価（合っている，少し合っている，違和感がある）で回答する．これを全ての視覚・触覚刺激の組み合わせについて行う．試行回数は被験者 1 名あたり 22 回である．

5.2.3 実験結果

結果を図 11 に示す. 横軸は各回答に対する人数，縦軸は提示された組合せを示す．矩形で囲まれた 11 組は，著者等が素材感提示と判断した組合せである．この組合せに関しては，「合っている」という回答が半数（6 名）以上から得られ，「違和感がある」という回答が 1 名以下であった．

図 12 に，特に評価の高い組合せ（「合っている」という回答が 8 名以上，「違和感がある」という回答が 1 名以下）を図示した．この図の横軸・縦軸には，それぞれ視覚・触覚での粗さの順を示したが，見た目と触感の粗さが対応するもの同士の印象が合致しやすいことが如実に表われている．

また，「違和感がある」と回答した被験者から「表面の凹凸の深さと周期が RP オブジェクトとテクスチャ画像間で極端に異なった場合に違和感を覚える」というコメントが得られた．これにより，MR 型視覚刺激によって素材感提示をするためには，視覚刺激と触覚刺激の凹凸の深さと周期が類似している必要があることがわかった．

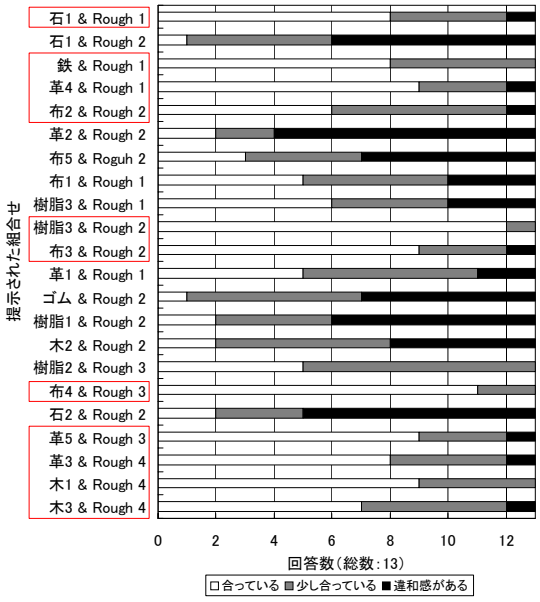


図 11　実験 2.2 結果
Fig. 11 Result of Experiment 2.2

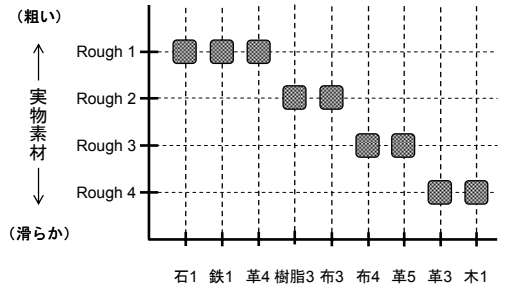


図 12　類似度の高い実物体とテクスチャ画像の組合せ
Fig. 12 Pairs with High Similarity

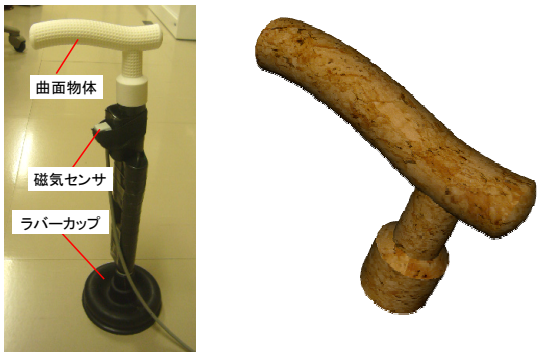
5.3 実験 2.3：曲面物体に対する素材感提示

5.3.1 実験目的

本実験では，物体の形状を平面から曲面へと変更し，MR型視覚刺激による素材感提示を試みる．車のハンドルやレバーなど，工業製品の多くは曲面形状を有している．そこで，曲面でもMR型視覚刺激による素材感提示することが可能かを評価する．

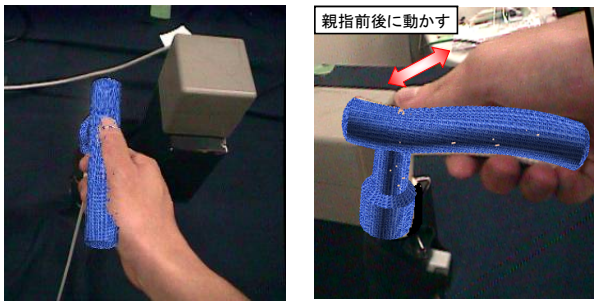
5.3.2 実験内容

視覚刺激・触覚刺激の組合せは，実験 2.2 で使用した 15 組を用いる．ただし，形状が平面から図 13 に示す曲面に変更される．形状の変更により，物体への触れ方が変わると考えられる．また，被験者ごとに物体への触れ方が多様化することが予想され，これは得られる結果に影響を与えかねない. そこで，被験者の物体への触れ方を統一するため，事前に数人の被験者に物体を触らせ，最も一般的な触れ方を採用した（図 14）．さらに，次の実験 2.4 と実験環境を統一するために，図 13 (a) のように物体を設置し，重さを感じない範囲で被験者が前後左右に動かせるようにした．本実験以降は物体及び被験者頭部



(a) RP オブジェクト　(b) テクスチャマッピングの結果

図 13　曲面物体の外観
Fig. 13 View of Curved Surface



(a) 上面からの図　(b) 側面からの図

図 14　実物体への触れ方
Fig. 14 Standardized Touching Method

の位置姿勢取得に磁気センサを用いるものとする．実験手順は実験 2.2 と同様である．

5.3.3 実験結果

結果を**図 15** に示す．図中矩形で囲まれた 6 組について，実験 2.2 同様の結果が得られたために，素材感提示可能と判断した．

材質ごとに見ると，特に革の結果に関して実験 2.2 と比べ，結果が悪化していることがわかる．これに関しては，被験者から「表面粗さは合っているが，見た目と触感の硬さが合っていない」というコメントが得られた．これは，物体の形状が平面から曲面に変化したことにより，物体への触れ方が「撫でる」から図 14 に示すように「握りながら撫でる」へと変わり，物体の硬さをより触知しやすくなったため[5]と考えられる．

5.4 実験 2.4：予備知識を付加した場合の曲面物体に対する素材感提示

5.4.1 実験目的

次に，被験者に触知する実物体の用途・特徴などの予備知識を与えることで，触印象にどのような影響が現れるか調査する．

5.4.2 実験内容

図 13 に示した曲面物体は，「杖の把持部」である．本実験では，まず市販されている杖を被験者に使用させ，RP オブジェクトが「杖の把持部」であることを意識させる．また，杖を実際に使用させることで，RP オブジェクトが「丈夫である」「硬い」という印象を与える．もし，触印象がこれらのような予備知識に影響されるのであれば，実験 2.3 で，革のように見た目の柔らかさの影響によって違和感が強く得られたテクスチャ画像が提示された場合でも，素材の柔らかさの印象が抑えられ，実物体の硬さに違和感を持たなくなるという可能性が考えられる．

本実験で，工業製品の例として「杖の把持部」を選択したのは，把持することに大きな意味をもち，かつ実際に革やプラスチック等の素材が使われているからである．また，単純な形状であるために，その部分だけを見てもその物体が何であるかを推測できず，予備知識による影響を調査する上でも適していると考えたからである．

提示する視覚刺激・触覚刺激の組合せは実験 2.3 と同様で，被験者 1 名あたりの試行数は 15 回である．

5.4.3 実験結果

結果を**図 16** に示す．実験 2.2 同様の基準で素材感提示可能と判断した組合せを図中矩形で示しているが，実験 2.3 との大きな違いは見られなかった．また，被験者からは「テクスチャ画像そのものに対する触感のイメージが強く，相変わらず硬さに違和感を覚えた」というコメントがあった．これにより，形状に対する予備知識は触印象にほとんど影響しないことがわかった．

6. むすび —考察と展望—

本論文では，MR 環境を利用し，触知する実物体とは異なる材質の CG 画像を重畳描画した場合に，視覚刺激が触印象に影響を及ぼすことを系統的に実験した結果を報告した．この結果を考察したところ，以下のような知見が得られた．

(a) 実験 1 より，視覚と触覚に対して同じ材質で粗さが違うものを提示した場合，ある一定以上の粗さを触覚で感じる場合には，触覚的に差がないものも視覚に引きずられて差があるように感じることが実証された．すなわち，適切な視覚刺激を与

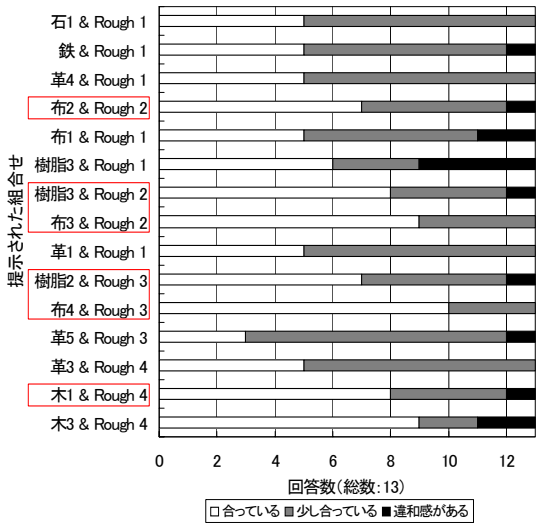


図 15　実験 2.3 結果
Fig. 15 Result of Experiment 2.3

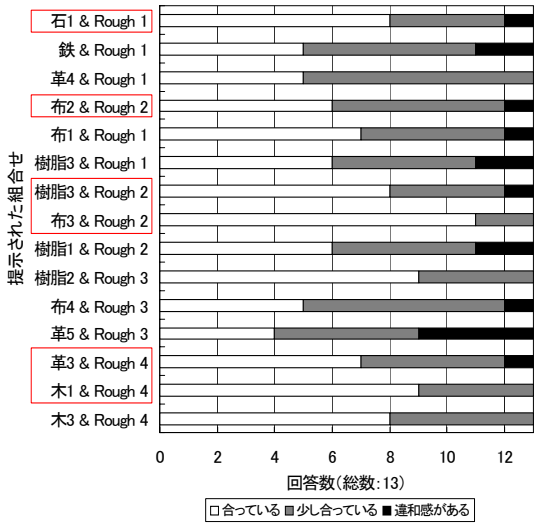


図 16　実験 2.4 結果
Fig. 16 Result of Experiment 2.4

えれば，触印象を変えることが十分可能である．

(b)実験 2.2～2.4 いずれの実験においても，人工的に表面粗さを表現した物体表面に対し，実在する素材の画像を重畳描画した場合，本実験で用いたものの内，約半数の素材は触覚的に違和感を覚えないという結果が得られた．ただし，これは表面の凹凸の深さおよび周期が近い場合に限られるという傾向が見られた．

(c)プラスチックという硬い物体を触りながら，柔らかい素材の画像を重畳表示するのはもともと無理がある．これは実験 2.2 において平面物体に触れる場合は，余り顕著ではなかったが，実験 2.3 および実験 2.4 のように実験対象を曲面物体に変更した場合には，かなり違和感が増す傾向が確認された．

上記の結果は，以下のように解釈できる．人の触覚は単独では空間認識精度があまり高くないとされている[18]．このため，粗さ判断に視覚情報がかなり関与する余地がある．(a) は，従来から指摘されている現象が，我々が MR 環境でも起こることを確認したことを意味している．

視覚刺激を援用した素材感提示は，如何なる実物体についても有効というわけではない．しかし，(b) は，条件が合って，視覚刺激を上手く使えれば，限られた RP オブジェクトで色々な素材感が出せることを示唆している．(c) は，我々の実験で使った杖の把持部という曲面物体では，指腹部で撫でるだけでなく，物体を握るという動作が加わったため生じた不都合である．この種の不都合は，ある意味で予想通りの結果であった．その半面，硬いものを触っているという予備知識を与えても，この不都合（違和感）は減少しなかった．

我々の研究から，いくつか興味深い結果が得られた．我々は，工業製品の設計・製造分野での応用は意識しているが，性急な結論を得られるとは考えてはいない．特に実用性を考慮するならば，より厳密な条件の下で実験を行い，その結果を議論する必要がある．しかしこの種の研究から断定的な結論を導き出すことは容易ではなく，様々に条件を変えながら，慎重に客観的な実験を積み重ねていくことが肝要である．

我々の今後の展開としては，(1) 触知方法の変更と弁別閾に関する考察，(2) 聴覚刺激の付加，(3) シンプルな機構による触覚刺激の付加，の 3 つの方向を計画している．更に，然るべき結果が得られた段階でより一般的な条件を付加することを視野に入れている．

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] Y. Ohta and H. Tamura (eds.): Mixed Reality—Merging Real and Virtual Worlds, Ohm-sha & Springer-Verlag, 1999.

[2] B. MacIntyre and M. A. Livingston (eds.): “(Special Session) Moving Mixed Reality into the Real Worlds,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, No. 6, pp. 22 - 56, 2005.

[3] 清川清，神原誠之，佐藤清秀，伴好弘：“ISMAR03報告：複合現実感研究の最新動向（複合現実感とインタラクション），”電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 103, No. 584, pp. 49 - 56, 2003.

[4] H. Tamura, H. Yamamoto and A. Katayama: “Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds,” ibid, Vol. 21, No. 6, pp. 64 - 70, 2001.

[5] C. E. Hughes and C. B. Stapleton: “Mixed reality in education entertainment, and training,” in [2], pp. 24 - 30, 2005.

[6] 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 ―，”日本VR学会論文誌，Vol. 9，No. 1，pp. 79 - 87，2004.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] I. Rock and C. S. Harris: “Vision and touch,” Scientific American, vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.

[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，”電子情報通信学会総合大会，p. 157，2006.

[12] M. Nakahara, I. Kitahara and Y. Ohta: “Sensory property in fusion of visual/haptic cues by using mixed reality,” Proc. World Haptics 2007, pp. 565 - 566, 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素材感提示に関する実験的検討，”日本VR学会第12回会大会論文集，pp. 103-106, 2007.

[14] S. J. Lederman and R. L. Klatzky: “Extracting object properties through haptic exploration,” Acta Psychologica, 84, pp. 29 - 40, 1993.

[15] H. Shirado and T. Maeno: “Modeling of human texture Perception for tactile displays and sensors,” Proc. World Haptics 2005, pp. 629 - 630, 2005.

[16] Xpress3D, http://www.xpress3d.com/Materials.aspx

[17] S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto and H. Tamura: “MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built,” Proc. 1st IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 02), pp. 246 - 253, 2002.

[18] J. M. Loomis and S. J. Lederman: “Tactual perception,” in Handbook of Perception and Human Performance, Vol. II, John Wiley & Sons, 1986.

（2007 年 12 月 10 日 受付）

［著者紹介］

家崎 明子　（正会員）



2006 年立命館大学理工学部情報学科卒. 2008 年同 大学院理工学研究科博士前期課程修了. 同年 4 月，ボッシュ（株）入社. 2005 年より 2007 年まで複合現実型視覚刺激が触印象に与える影響に関する研究に従事.

杣田 明弘　（学生会員）



2007 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，2003 年立命館大学理工学部助教授, 2004 年同 情報理工学部助教授を経て，2007 年 4 月より科学技術振興機構さきがけ研究員，立命館大学総合理工学研究機構客員教授. 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. 2006 年本学会学術奨励賞等受賞.

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.