

基礎論文

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中原 守勇 北原 格 大田 友一^{*1}Sensory Property in Fusion of Virtual/Haptic Cues
for Perception of Shape by Using Mixed RealityMorio Nakahara Itaru Kitahara and Yuichi Ohta ^{*1}

Abstract – When we recognize objects, multiple sensory information (e.g., visual, auditory, and haptic) is used with fusion. For example, both eyes and hands provide relevant information about an object's shape. We investigate how sensory stimuli interact with each other. For that purpose, we developed a system that gives haptic/visual sensory fusion using a mixed reality technique. Our experiments which focus on the sense of sharpness along with edge regions show that the haptic stimulus seems to be affected by visual stimulus when a discrepancy exists between vision and haptic stimuli.

Keywords : Mixed Reality, Visual Stimuli, Haptic Stimuli, Sensory Integration, Perception of Shape

1 はじめに

複合現実感 (MR: Mixed Reality) とは、コンピュータで生成した仮想世界の映像を、現実世界に重畳して提示することにより、我々が獲得する視覚情報を増強させる技術であり、生産現場における作業支援などへの応用が始まっている [1][2]。近年、作業支援に複合現実感を応用する新たな試みとして、工業製品のデザイン作業が注目されている。従来の工業製品のデザイン行程では、CAD (Computer Aided Design) システムを用いて製品の外見・構成を比較・検討した後、CAD システムでは表現が困難な手触りや質感などを確認するために、モックアップという外観が実際の製品とそっくりな模型を作成する手順をとるのが一般的である。しかし、モックアップ作成には、多くの金銭的・時間的なコストが必要とされるため、“表面の材質を少しだけ変更してみる” というような細かいデザイン変更の度に、モックアップを作成するのは現実的ではない。その結果、デザイナーは、ある程度限られた範囲の中で製品のデザインを強いられることになる。

我々は、図 1 に示すように、複合現実感を用いてモックアップ上に仮想的な製品の外観を重畳することにより、表面の材質などの変更に伴う見え方の変化を再現可能なデザイン作業支援システムの研究開発に取り組んでいる [3][4]。このシステムを実際のデザイン

現場に導入することができれば、モックアップ自体は作り直さなくても、重畳する見え方情報を適宜選択・提示することにより、細かなデザイン変更の良し悪しを確認する事が可能になる。その結果、様々なデザインパターンの中から最終判断を下すことが可能になり、工業製品のデザインに要するコストを現状と同等に保ちながら、製品デザイン・バリエーションの大幅な拡大が期待される。

CG (Computer Graphics) 技術の写実性の向上を背景に、CG 物体の見かけの情報を操作することにより、人間が感じる質感がどのように変化するかを調査する研究が活発に行われている [5]。我々は、このアプローチを、提案するデザイン作業支援システムに適用することにより、上述した本研究のコンセプトをより一層拡張することが可能になると考えている。具体的には、モックアップの実際の形状・材質とは異なる視覚情報を仮想的に生成・重畳することにより、人間がモックアップから受ける印象を“デザイナーの意図する方向に”操作することができれば、製品デザインのバリエーションの幅を維持しながら、モックアップ形状のバリエーションをさらに削減することが可能となり、一層の効率化が実現すると考えられる。

上述した作業支援システムを実現するためには、物体の印象を判断するとき、視覚と触覚がどのように影響しているのかを調査・検討することが重要である。我々は、複合現実感を用いて視覚と触覚の刺激値を定量的に変化させながら、二つの感覚を融合させる感覚提示方式を開発した。本論文では、“角張っている”

^{*1}筑波大学 大学院システム情報工学研究科 知能機能システム専攻

^{*1}Department of Intelligent Interaction Technologies, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

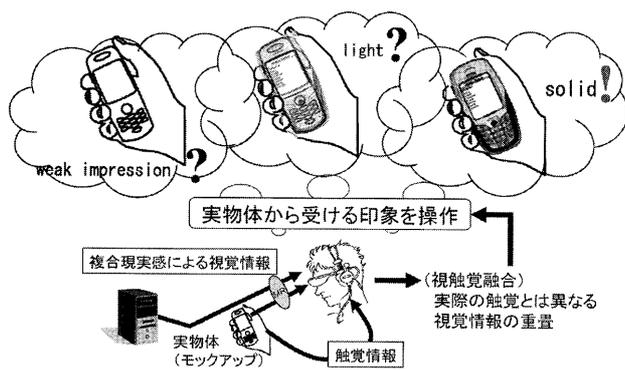


図1 複合現実感を用いた工業製品デザインシステム

Fig.1 An Industrial Products Designing System by Using Mixed Reality

“丸みを帯びている”といった物体形状に関する知覚処理に着目し、提示される触覚と視覚の情報が一致しないとき、各々の感覚が物体形状の知覚にどのように影響し合うのかについて、実験的に検討した結果を報告する。以降、第2章では、感覚統合に関する従来研究の紹介を行い、我々が提案する視覚と触覚の融合提示方式について述べる。第3章では、物体形状知覚における視触覚融合実験的検討を紹介し、最後に第4章でまとめを行う。

2 複合現実感を用いた視覚と触覚の融合

本節では、視覚と触覚の融合の仕組みを調査・検討した従来研究を紹介し、我々が提案する、複合現実感を用いた視覚と触覚の融合提示方式の概要と位置付けに関する説明を行う。

2.1 関連研究

我々人間は、複数の感覚機能から得た情報を統合して、外界の知覚を行う。このことを感覚統合という。腹話術は、視覚と聴覚の感覚統合を利用した身近な例である。人形の巧みに操作し、口から音が出ているという視覚的情報を聴衆に与えることにより、実際には異なる所から音が発せられているにも関わらず、人形が喋っているように知覚させることに成功している。これまで、このような視覚と聴覚の感覚統合について、いくつかの研究がなされてきた。Davidらはペン先で物体の表面をなぞった際の音を変化させることで、表面の硬さの感じ方に影響を及ぼすことを発見している[6]。

視覚と触覚についての感覚統合についても、様々な研究が行われている[7]-[12]。Bioccaらは、Virtual Reality (VR)空間において、視覚が触覚にどのような影響を与えているのかを調べる実験を行った。HMD (Head Mounted Display)によって提示されたVR空間

間を観察している際に、縮んだバネがユーザの仮想の手に飛び込むのを見た被験者は、バネが手に飛び込んできたような触覚を感じると報告している[7]。Rockらは、キューブの大きさを人間が判断するときの触覚に対する視覚の影響について調査している。レンズによってキューブの大きさを変化させながら観察を行うと、キューブに触れたときに感じる大きさが一緒に変化することが示されている[9]。観察物体が手のひらで握れるほどの大きさであれば、物体の形状についても同様に視覚によって触覚が影響を受けることが確認されている[10]。Lendermanらは、サンドペーパーの粗さについて、視覚と触覚のどちらが優勢に働いているかに関する調査を行い、視覚と触覚が同等の影響力で拮抗していることを報告している[11]。

これら従来研究が示唆するように、視覚と触覚は、人間の知覚処理において互いに影響を及ぼしていることがわかる。このプロセスを明らかにすることは、人間の知覚処理を理解し、感覚操作を適切に行うために有益な情報となるであろう。しかし、従来行われてきた視覚と触覚の影響を調査する実験の実施環境は、完全に仮想の世界で構築されたVR空間であったり、実験時に被験者にある程度想像力を働かせてもらう必要があったりと、我々の日常生活における知覚処理の状況とは大きく異なっている。例えば、Rockの実験では、レンズを通してキューブを歪めているため、キューブに触れている被験者の手も歪んで見てしまうという問題が存在し、Lendermanの実験では、被験者は、机の上に置かれたサンドペーパーを観察すると同時に、布の下に置かれた別のサンドペーパーに触れているため、ある程度、被験者に想像力を働かせてもらいながら実験を行う必要がある。この問題を解決するためには、より直感的な実験手順の開発・導入が必要であろう。

我々は、現実と仮想をシームレスに融合する複合現実感技術を用いることにより、現実の世界に近い状態で、視覚・触覚の感覚統合を実現する方式を提案し、視覚と触覚の情報が、我々が物体形状から受ける印象にどのように影響しあうのかについて実験的な検討を行う。これまでにも、複合現実感を用いて視覚と触覚の感覚統合の調査実験が行われているが[13]、CGの描画能力が物体の質感のような微妙な変化を表現可能なレベルに達していないこともあり、我々が目的としているレベルでの視触覚融合を評価する実験は行われていない。

2.2 複合現実感を用いた視触覚融合提示システム

図2に我々が提案する複合現実感を用いた視触覚融合提示システムを示す。本システムは、触覚情報を提示する実物体と、視覚情報を提示するHMDによって構成される。ユーザが実物体に触れるのと同時にHMD

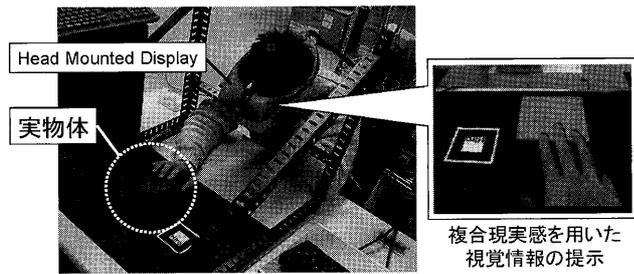


図2 複合現実感を用いた視触覚融合提示システム

Fig. 2 Our Visual/Haptics Display System by Using Mixed Reality

上に実物体とは異なる視覚情報を重畳提示することにより、視覚と触覚によって与えられる情報が一致しない観察状態を作り出すことができる。触っている物体（触覚）と見ている映像（視覚）が別々に提示され、それらを被験者の頭の中で統合する必要があった従来手法に比べ、実際に手で触れる物体の上に仮想の見え方が重畳されるため、触覚と視覚を同時に観察することが可能であり、より直感的な評価が行えるという特長を有する。

3 物体形状知覚における視触覚融合実験

本研究では、視触覚融合が発生するケースとして、物体のエッジに触れたときに感じる鋭さの感覚（物体形状知覚）に注目し、前節で紹介した複合現実感を用いた視触覚提示装置により、触覚と視覚の情報が一致しない状況を作り出す。従来研究では、現実世界では通常一致している視覚と触覚の刺激値を、あえて異なる状態で提示するために、被験者に想像力を働かせてもらう必要がある。しかし、このような観察行為が、現実世界における知覚処理とは大きく異なっていることは明らかである。複合現実感を用いた視触覚提示により、あたかも視覚と触覚の刺激値が異なる物体が実在するかのごとく、被験者に知覚させることが可能になり、従来研究では困難であった“視覚と触覚の間の感覚相互作用そのものに焦点を絞った調査”を実現することができる。

このような状況下において、視覚情報を変化させることにより物体のエッジを触ったときに感じる印象が操作可能なのかに関する実験を行う。例えば、現実よりも鋭い仮想のエッジの視覚情報を複合現実感により提示したとき、人は現実のエッジと比べ鋭く感じるか否かを調べる。その結果から、我々が物体形状を知覚するときに、視覚と触覚がどのように影響し合っているのかについて検討を行う。

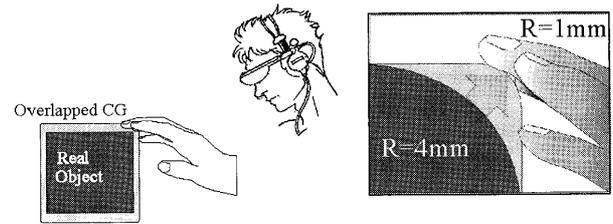


図3 視触覚融合実験の概念図

Fig. 3 A Method of Visual/Haptics Display.

3.1 実験の概要

図3に、物体のエッジにおける視触覚融合実験の概念図を示す。図左のように、被験者にHMDを装着してもらい、CGによって生成された見え方情報が重畳された立方体のエッジ部分を触ってもらう。このとき、CGが表現するエッジの鋭さを様々に変化させることにより、触覚と視覚の情報が一致する状況、一致しない状況の両方を提示する。なお本実験では、エッジの鋭さを、角の曲率半径により定量化する。図右に示すように、視覚情報を実際のエッジよりも鋭い見え方に変化することにより、現実には曲率半径が4mmのエッジが、それ以上に鋭く感じる可能性があるかについて、評価実験を行う。

被験者は、まず評価基準となる基準の曲率半径の感覚刺激を与えられ、次に複数種類の曲率半径の感覚刺激の中から、基準として提示された感覚と同じだと感じるものを一つ選択するマッチング作業を行うよう指示を受けている。基準となる感覚刺激の提示方法とマッチング作業時の提示方法を要因として錯覚量（実際の形状と知覚される形状のズレ）を測定する。

3.2 実験環境

被験者が視点位置を移動させた場合、運動視差により見え方の変化が生じてしまい、視覚刺激の定量的制御提示が困難となる。被験者の視点位置を一定に保つため、本実験では図4に示すように、エッジ部分が目から30cmの距離になるように顎を乗せる台を設置し、被験者には、その台に顎を乗せ頭が固定された状態でキューブのエッジを触るように指示する。

なお、本実験で構築した提示装置では、被験者の視点から30cm離れた空間、つまりキューブが置いてある位置で対象物体の仮想の見え方（CG像）が結像するように、両眼視差・輻輳角を設定してステレオ映像を提示している。

実験試料として、各辺のエッジの曲率半径が0.1mmずつ異なるように造形したキューブを三つ用意した。そのうちの一つを図5に示す。一つ目のキューブは0.0mmから1.1mm、二つ目は1.2mmから2.3mm、三つ目は2.4mmから3.5mmというように、36種類の

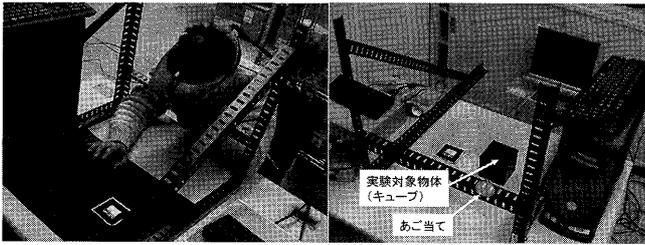


図4 実験装置
Fig. 4 An Experimental System.

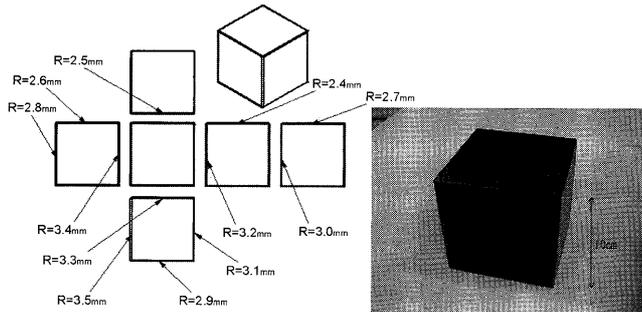


図5 キューブの例
Fig. 5 An Example of a Evaluated Cube.

曲率半径のエッジの触覚刺激を提示することができる。

視覚情報から曲率半径の判定を行うためには、エッジを2本の線として視認できる必要がある。一番小さい0.1 mmの曲率半径を30 cmの距離から観察する場合、図6に示すように0.14 mm離れた2本の線を識別可能な視力が必要となる。近見視力1.0の視力は、0.09 mmの間隔がある2本の線を識別できる視力と規定されている。そこで本実験では、近見視力1.0以上の22歳から27歳の男性10名(平均年齢22.7歳、標準偏差1.57)を被験者として実施した。

本実験では、1280画素×1024画素の高解像度ビデオスルー型HMDを用いて、高画質な複合現実感を実現している。HMD画面上で判別できる視覚刺激の対象単位は、1画素で表現可能な空間分解能であり、本実験で想定している30 cm離れた空間における分解能は0.175 mmである。一方、触覚提示の分解能は、実験用素材生成に使用する工作機械の精度限界に依存し、本実験で使用した機材の工作精度は0.1 mmである。以上の点から、本実験で提示する感覚刺激の最小値は、実験で使用するHMDの表現限界よりも大きく、かつ、触覚刺激の分解能で表現可能な、曲率半径が0.2 mmのエッジとする。

図7に示すキューブに重畳するCGで描画された仮想キューブは青色である。被験者がエッジの断面の見え方を手がかりにして曲率半径を判断するのを防ぐため、エッジの両端部分はエッジが見えないように

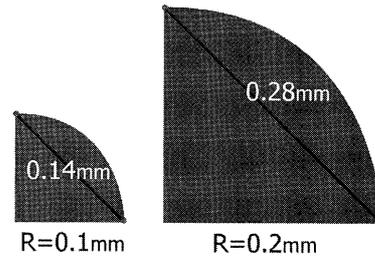


図6 エッジ部の断面図
Fig. 6 A Cut Plane of a Cube's Edge.

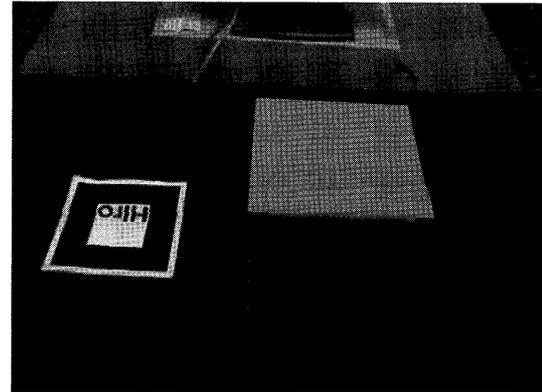


図7 CGを重畳したキューブ
Fig. 7 An Example of an MR cube.

なっている。このCGを描画するときの照明条件は、図8に示すように、キューブから見て被験者と同じ側60度の角度に存在する点光源とする。ARToolkit[14]を用いて、仮想CGキューブを現実のキューブ上に重畳し、複合現実感提示を行う。

オクルージョンの解決手法

図9左側の写真のように、キューブ上に手を移動させると、手の上にCGが重畳されることにより実験試料のキューブに触れている感覚が損なわれてしまう、いわゆるオクルージョン問題が発生する。本実験では、画像中に写りこんだ肌色領域を検出し、その領域にはCGを描画しないようにする、可視領域マスク法により、この問題を解決する[15][16]。

被験者視点から撮影した画像の全面素をRGB色空間のうちR成分とG成分で張られるRG色平面上にプロットした結果を図10に示す。薄い色の点が肌色領域、濃い色の点がそれ以外の領域である。このように肌色領域は、RG色平面上において、クラスタを形成することが知られている[17]。本実験では、図10に示す学習データを用いて、RG色平面上における肌色モデルを予め生成し、評価実験では、準備しておいたモデルを用いて撮影映像中から実時間で肌色領域を分割する。手領域の分割を行った結果を図9右側に示す。CGによるオクルージョン問題が解決され、キューブ

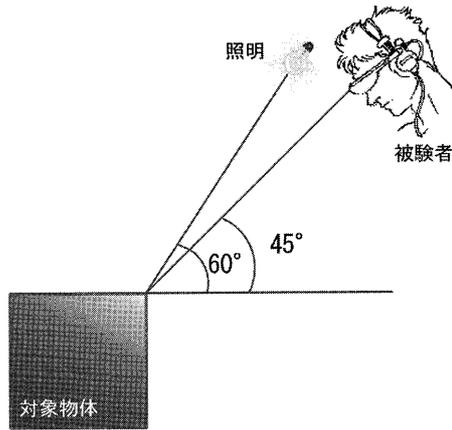


図8 実験における照明状況
Fig.8 A Lighting Condition of Experiences.

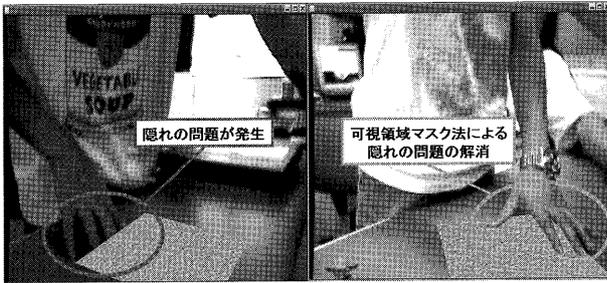


図9 (左) オクルージョンにより発生する問題,
(右) オクルージョンの問題を解決した提示例
Fig.9 (Left)An Example of an Occlusion Problem, (Right)An Improved Appearance.

に触れている感覚を損なわずに、評価実験を実施可能であることが確認できる。

3.3 提示する感覚刺激の設定

マッチング作業に用いる比較用感覚刺激の間の差が大き過ぎる場合、実験の精度が低下してしまう。一方で、差が小さ過ぎると、違いの判別が困難な比較用感覚刺激を繰り返す提示することとなり、冗長な試行が発生し実験効率が低下してしまう。また、図11に示すように、物理世界の刺激と心理世界の感覚の間の対応関係は非線形的であるため、人間が受ける感覚を定量的に変化させながら評価実験を行うためには、その対応関係を考慮にいれた比較用感覚刺激の設定が必要となる。本実験では、視覚、触覚両方について、極限法を用いて、被験者によって検知できる最小の刺激の差異である弁別閾を求めることにより、これらの問題を解決する。

極限法とは、実験者が刺激を一定のステップで徐々に変化させ、1ステップごとに被験者に、今回の変化の判別が可能か否かの判断を求め、判断の切り替わる

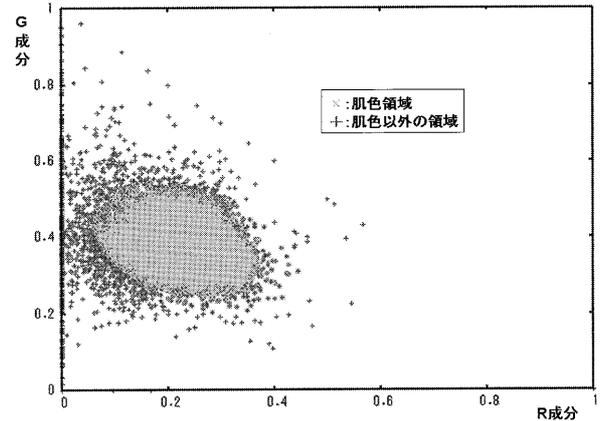


図10 色度平面における肌色領域の分布
Fig.10 Distribution of Skin Color in Chroma(R-G) Space.

点を判別可能な値(弁別閾)として検出する方法である。本実験では、エッジの曲率半径を0.1 mm ずつ変化させ、エッジの鋭さについて弁別閾を調査した。

弁別閾の設定法

基準とする刺激 R_0 と刺激 R を比較したとき、曲率半径の変化量が小さ過ぎるとその変化を知覚することができない。図12に示すように、この場合を“?”, 刺激 R が刺激 R_0 よりも鋭いエッジだと感じた場合を“-”, その逆を“+”とし、被験者にいずれかを選択してもらおう。例えば、刺激 R_0 が0.2 mm のとき、刺激 R として0.4 mm を被験者に提示した結果、“+”という回答が得られた場合、刺激 R を基準刺激よりも大きい曲率半径と判別できているので、刺激 R の曲率半径を更に0.1 mm だけ刺激 R_0 に近づけ、刺激 R を0.3 mm とする。その結果、被験者が“?”を選択すれば、0.4 mm と0.3 mm の間に弁別閾が存在することになる。

弁別閾の設定実験

触覚の弁別閾を求める実験では、被験者は基準となるエッジに目を瞑って触る。エッジは先に紹介した実験用キューブのエッジを利用した。続いて任意のエッジに触れ、基準のエッジと比べどのよう感じたかを“+”, “-”, “?” から選択解答する。“+”または“-”の解答が得られた場合、曲率半径が1ステップ異なるエッジに触れてもらい、基準のエッジとの比較調査を行う。この処理を、被験者が“?”を選択するまで繰り返す。このとき、エッジの曲率半径を変化させる度に、基準のエッジを触わり直すように指示する。それ以外でも、被験者は、いつでも基準のエッジに触って確かめることができる。

視覚の弁別閾を求める実験では、図7のように、HMD から30cm の距離に設置したキューブ上に重畳

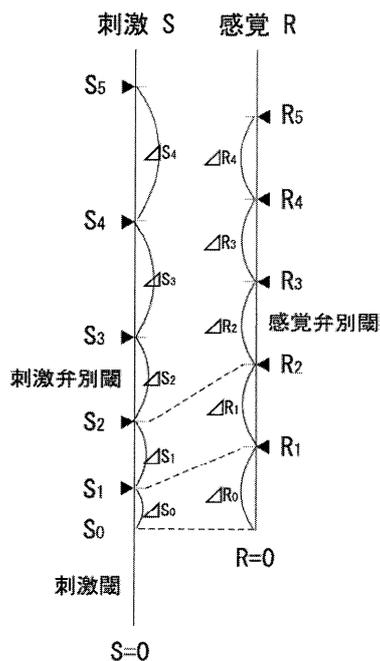


図 11 刺激弁別閾と感覚弁別閾の関係
Fig. 11 Difference between physical and mental stimulus.

されている CG のエッジを手がかりに目測を行い、触覚の実験と同様の手順で調査を進める。

これらの弁別閾の設定実験を、22 歳から 27 歳の 12 人の男性（平均 22.9 歳，標準偏差 1.51）に対して実施する。視覚の弁別閾を求める実験では、被験者の視力が実験結果に大きく影響するため、近見視力 1.0 以上を被験者の条件とする。

弁別閾設定実験の結果

弁別閾設定実験の結果を、表 1（視覚刺激）、表 2（触覚刺激）に示す。視覚刺激では、0.4 mm ずつ等感覚に弁別閾が設定された。一方、触覚刺激の弁別閾は、0.1 mm から 0.3 mm の値に設定された¹。このように、触覚の弁別閾が、刺激が小さい（エッジが鋭い）ほど細かい刻み幅で設定されたのは、鋭いエッジに触れて外傷を負う危険を回避するための、人間の知覚機能によるものと考えられる。

視触覚を融合する際の比較実験を行うためには、視覚と触覚で共通の弁別閾を設定する必要がある。上述したように、触覚の弁別閾は全て 0.4 mm 以下なので、視覚刺激の 0.4 mm 感覚の弁別閾を基準として、感覚刺激を 0.2mm, 0.6 mm, 1.0 mm, 1.4 mm, 1.8 mm, 2.2 mm, 2.6 mm に設定した。

¹触覚刺激については、0.1 mm 以下の刺激に対しても、変化を判別することが可能であったが、キューブを工作する精度の限界から、0.1 mm 以下で曲率半径を変化させることができなかつたため、弁別閾は 0.1 mm としている。

		1	2	3	4	
		↓	↑	↓	↑	
エッジの曲率半径 R	1.1					
	1.0	+				
	0.9	+		+		
	0.8	+		+		
	0.7	?		+		
	0.6			?		
	0.5					
	0.4		?		?	
	0.3		-		-	
	0.2		-		-	
	0.1		-		-	
0.0					平均	
	↓	0.7		0.6		0.65
	↑		0.4		0.4	0.4

図 12 極限法の処理手順の例：図上部の 1,2,3,4 は比較調査の回数を、↑↓の矢印は、比較調査における提示刺激値の変化方向を示す。この場合、増加方向と減少方向に交互に 2 回ずつ比較調査が行われている。

Fig. 12 Definition for Mental Discrimination Threshold.

3.4 実験の手順

実験の手順について説明する。まず被験者は、図 13 に示すように、HMD を装着した状態でキューブの前に座り、複合現実感を用いて実際のエッジの曲率半径（触覚刺激）とは異なる見え方（視覚刺激）を重畳したキューブを基準刺激として観察する。このときの視覚刺激と触覚刺激の組み合わせは、{視覚：2.2 mm，触覚：1.4 mm}，{視覚：1.4 mm，触覚：2.2 mm} の 2 通りとする。この組み合わせの設定法については後述する。感覚刺激の提示は、視覚のみ、触覚のみ、またはその両方の感覚を介して行われる。実験者から「手で触って下さい」と指示を受けた場合、被験者は目を瞑り、手をエッジ上に誘導してもらった後、キューブに触れる。「目で見て下さい」と指示を受けた場合は、手は机上に固定したまま、キューブに重畳されている CG を観察する。「目で見ながら手で触って下さい」と指示を受けた場合は、自ら手をキューブの上に移動させ、キューブに重畳されている CG を観察しながらキューブに触れる。

被験者は、一組の基準刺激を観察した後、上述した 7 種類の比較用感覚刺激の中から、基準刺激と同じよ

表 1 視覚の弁別閾
Table 1 Visual Discrimination Threshold.

基準	上弁別閾	標準偏差	下弁別閾	標準偏差
0.2	0.332	0.07	0.057	0.01
0.6	0.382	0.08	0.078	0.02
1.0	0.395	0.08	0.062	0.02
1.4	0.322	0.07	0.052	0.01
1.8	0.338	0.07	0.045	0.01

表2 触覚の弁別閾

Table 2 Haptic Discrimination Threshold.

基準	上弁別閾	標準偏差	下弁別閾	標準偏差
0.0	0.000	0.00	0.000	0.00
0.1	0.000	0.00	0.000	0.00
0.2	0.000	0.00	0.053	0.01
0.4	0.130	0.03	0.078	0.02
0.7	0.270	0.04	0.049	0.01
1.0	0.237	0.04	0.069	0.02
1.3	0.300	0.07	0.063	0.02
1.6	0.418	0.08	0.095	0.03

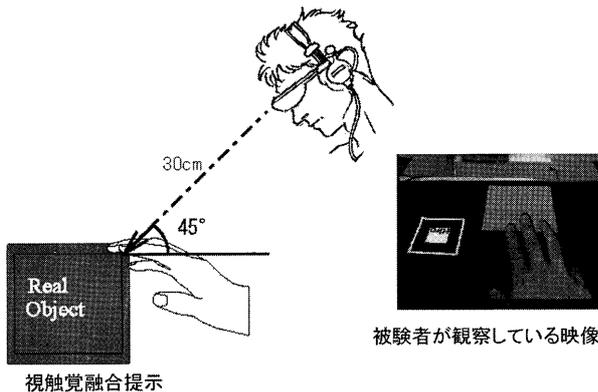


図13 被験者と提示物体の位置関係
Fig. 13 An Overview of Our Experiment.

うに感じる刺激を一つ選択するマッチング作業を行う。この際にも実験者の指示に従い、視覚のみ、触覚のみ、視触覚両方のいずれかの方法で物体を観察する。視触覚両方を用いる場合、両刺激値は同一の曲率半径のエッジの刺激値とする。提示する7種類の比較用感覚刺激は、ランダムに選択・提示される。一つの比較用感覚刺激に対する試行は、被験者が希望する限り継続することが可能である。被験者が次の比較用感覚刺激の提示を要求した場合、15秒後に次の感覚刺激を提示する。なお、基準感覚刺激や比較用感覚刺激は、被験者が実験者に「基準感覚刺激を見せて下さい」、「2番目の比較用感覚刺激を触らせて下さい」などの要求をすれば、いつでも何度でも再提示を行うことが許されている。

基準刺激の提示要因が3水準、マッチング作業における提示方法が3水準の9通りの組み合わせが存在する。これら全ての組み合わせに対して行った評価実験の結果を多変量解析することにより、視触覚融合によって人間の知覚が変化するかを検討する。

7種類用意した感覚刺激全てを組み合わせさせた基準刺激に対して、マッチング作業を行うためには、膨大な手間と時間が必要となり、その結果、被験者の回答精度が低下する可能性がある。一方で、多くの組み合わせでは、一方の感覚刺激による刺激が強く（または弱

く）なり過ぎるため、視触覚融合によって人間の知覚が影響を受けることを示す有意なデータの獲得が困難であることが予想される。そこで我々は、まず少人数の被験者に対して予備実験を行い、視触覚融合が知覚処理に与える影響が観測されやすい基準刺激の組み合わせを設定した。具体的には、全ての視覚刺激と触覚刺激を組み合わせさせた49種類の基準刺激に対して、マッチング作業を行う。マッチング作業の3水準の提示方法によって得られる評価結果に差が生じない場合、視触覚融合による影響がないものと判断し、組み合わせリストから除外する。例えば、触覚刺激が強過ぎる場合、視覚刺激をいくら変化させても視触覚融合時の評価結果は、触覚のみを用いた評価結果と等しくなるため、視触覚融合による影響が出にくい組み合わせと判断される。この予備実験により、{視覚:2.2 mm, 触覚:1.4 mm}、{視覚:1.4 mm, 触覚:2.2 mm}の2通りの視覚刺激と触覚刺激の組み合わせが設定された。この予備実験の実験手段、提示刺激データ、実験結果に関する詳細については、付録にまとめて述べる。

3.5 実験の結果と考察

視覚刺激が2.2 mm、触覚刺激が1.4 mmの組み合わせの基準刺激に対するマッチング作業の結果を図14に示す。縦軸はマッチング作業で選択された感覚刺激（曲率半径の平均）を、横軸はマッチング作業の3水準の提示方法を示している。また、ノードの形状で基準刺激の提示要因の3水準を表す。このマッチング結果に対して分散分析を行ったところ、基準提示要因の自由度が2、この要因の偶然のズレの自由度が18となり、F比は26.694となるため、有意水準5%で帰無仮説が棄却され、基準刺激の提示要因の主効果に有意差が認められる ($F(2, 18) = 26.694, p < 0.05$)²。この結果は、基準刺激の提示の方法の違いが、マッチング作業の結果に影響を与えることを示している。

視覚と触覚が形状知覚処理に与える影響に注目して検討を行う。基準刺激として1.4 mmの触覚刺激のみを提示し、触覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（菱形ノード線上の左端）、1.40 mm（標準偏差0.00）という評価結果を得た。一方、基準刺激として1.4 mmの触覚刺激と2.2 mmの視覚刺激を提示し、同じく触覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノード線の左端）、現実の曲率半径よりも鈍い1.64 mm（標準偏差0.15）という評価結果を得た。

基準刺激として2.2 mmの視覚刺激のみを提示し、視覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（四角形ノード線上の右端）、2.20 mm（標準偏差0.00）という評価結果を得た。一方、基準刺激として1.4 mmの触覚刺激と2.2 mmの視覚刺激を提示し、同じく視

²統計的多重比較法については、[19]を参照されたい

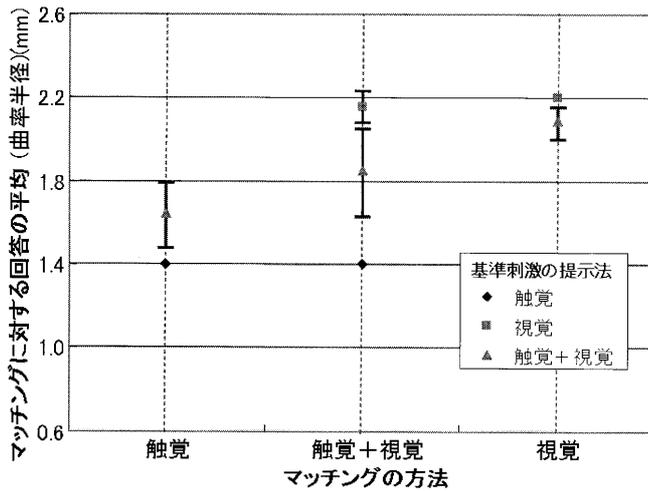


図 14 視覚のみ、触覚のみ、視覚と触覚のマッチングの平均値と標準偏差（視覚の基準 2.2 mm, 触覚の基準 1.4 mm）

Fig. 14 Mean grit sizes and the standard deviations selected as matches for haptic, visual, and haptic/visual standards; subjects touched an object with a 1.4-mm haptic curvature radius and a 2.2-mm vision one.

覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノードの右端），現実の曲率半径よりも鋭い 2.12 mm（標準偏差 0.10）という評価結果を得た。

基準刺激として 2.2 mm の視覚刺激と 1.4 mm の触覚刺激の両方を提示し，視触覚を用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノード線上の中央），視触覚で与えられた刺激値の中間の 1.84 mm（標準偏差 0.20）という評価結果を得た。

以上の結果から，視覚と触覚は互いに影響を及ぼし合いながら，エッジ形状の知覚が行われていることがわかる。なお，以上 3 点の評価結果は，LSD 法を用いた多重比較により有意差があることが確認されている。

次に，視覚刺激と触覚刺激の大小関係を入れ替え，視覚刺激が 1.4 mm，触覚刺激が 2.2 mm の組み合わせの基準刺激に対するマッチング作業を行った。その結果を図 15 に示す。グラフの見方は，図 14 と同じである。この場合も，有意水準 5% で基準刺激の提示要因の主効果による有意差が認められている ($F(2, 18) = 36.394, p < 0.05$)。

基準刺激として 2.2 mm の触覚刺激のみを提示し，触覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（菱形ノード線上の左端），2.18 mm（標準偏差 0.10）という評価結果を得た。一方，基準刺激として 2.2 mm の触覚刺激と 1.4 mm の視覚刺激を提示し，同じく触覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノードの左端），現実の曲率半径よりも鋭い 2.10 mm（標準偏差 0.15）という評価結果を得た。

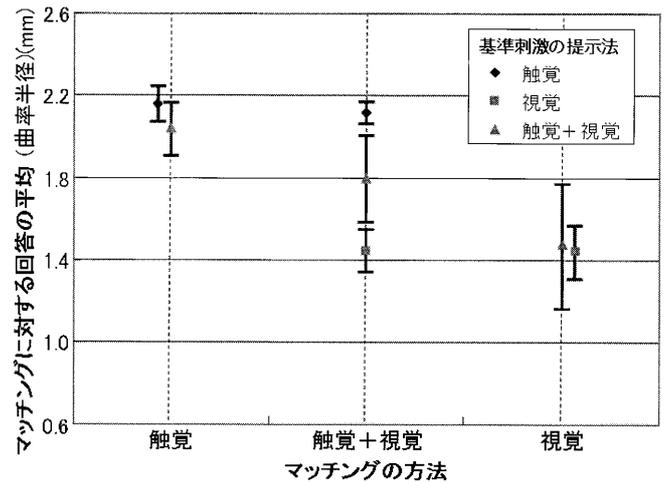


図 15 視覚のみ、触覚のみ、視覚と触覚のマッチングの平均値と標準偏差（視覚の基準 1.4 mm, 触覚の基準 2.2 mm）

Fig. 15 Mean grit sizes and the standard deviations selected as matches for haptic, visual, and haptic/visual standards; subjects touched an object with a 2.2-mm haptic curvature radius and a 1.4-mm vision one.

基準刺激として 1.4 mm の視覚刺激のみを提示し，視覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（四角形ノード線上の右端），1.45 mm（標準偏差 0.15）という評価結果を得た。一方，基準刺激として 2.2 mm の触覚刺激と 1.4 mm の視覚刺激を提示し，同じく視覚のみを用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノードの右端），現実の曲率半径よりも鈍い 1.47 mm（標準偏差 0.30）という評価結果を得た。

基準刺激として 1.4 mm の視覚刺激と 2.2 mm の触覚刺激の両方を提示し，視触覚を用いてマッチング作業を行った場合（三角形ノード線上の中央），視触覚の刺激値の中間の 1.81 mm（標準偏差 0.20）という評価結果を得た。

以上の結果から，視覚刺激と触覚刺激の大小関係を入れ替えた場合でも，視覚と触覚は互いに影響を及ぼし合いながら，エッジ形状の知覚が行われていることが確認できる。1 番目と 3 番目の評価結果では，LSD 法を用いた多重比較により有意差があることが確認されたが，2 番目の評価結果では，優位さを確認するには至らなかった。これは，視覚における刺激量と弁別対象の関係が触覚と等価ではないことにより，触覚によって与えられる影響が，それほど大きくなかったためと考えられる。

2 組の基準刺激提示方法 {触覚:1.4mm, 視覚:2.2mm}, {触覚:2.2mm, 視覚:1.4mm} に対して行った評価結果をもとに，視覚と触覚の感覚統合時における視覚

と触覚の占有率を, Lederman らが行ったのと手法と同じ手順で, 以下の 2 式を用いて求める [11].

$$\text{視覚の占有率} = \frac{VH_{Std} - T_{Std}}{V_{Std} - T_{Std}}$$

$$\text{触覚の占有率} = \frac{-VH_{Std} + V_{Std}}{V_{Std} - T_{Std}}$$

VH_{Std} は, 基準刺激の提示を触覚と視覚により行ったときのマッチング作業の回答の平均を表す。また, V_{Std} は, 視覚情報を用いて基準刺激を提示したときのマッチング作業の回答の平均を, T_{Std} は, 触覚情報を用いて基準刺激を提示したときのマッチング作業の回答の平均を表す。基準刺激提示方法が {触覚: 1.4mm, 視覚: 2.2mm} の感覚統合時の視覚の占有率は 57.1% を示し, 触覚の占有率は 42.9% を示した。{触覚: 2.2mm, 視覚: 1.4mm} のときは, 視覚が 77.8%, 触覚が 22.2% を示した。これら本実験で設定した条件下で得られた結果では, エッジの曲率半径が大きくなり被験者の触覚が鈍感になっていくにつれ, 視覚が知覚処理に与える影響力が大きくなっていく, つまり, 視覚情報を変化させることにより, 物体形状から受ける印象の操作を行える可能性があることが示されている。その場合, 視覚情報が実物体の曲率半径よりも鋭ければ, 現実よりも鋭く感じる。一方, 実物体の曲率半径よりも視覚情報が鋭ければ現実よりも鋭く感じる。このことがわかった。今後は, より多くの視覚と触覚の刺激値の組み合わせについて同様の評価実験を実施することにより, この知見が適用可能な領域を特定し, 現象としての一般化を図ることを考えている。

4 まとめと今後の課題

本論文では, 現実と仮想をシームレスに融合する複合現実感技術を用いることにより, 現実の世界に近い状態で視覚・触覚の感覚統合を実現する方式を提案した。“角張っている”, “丸みを帯びている”といった物体形状に関する知覚処理に着目し, 0.1 mm 間隔でエッジの曲率半径を変化させたキューブを用いて提示される触覚と視覚の情報が一致しない状況を作り出し, 視覚と触覚が物体形状の知覚にどのように影響するかについて, 実験的に検討を行った。評価実験により, 現実のエッジと異なる視覚刺激を重畳提示することにより, エッジから我々が受ける印象を操作することが可能であることを確認した。

これらの結果から, 複合現実感を用いた工業製品のデザイン支援システムにより, モックアップ生成後の微妙なデザイン変更を検討作業ができるようになる可能性を示すことができた。例えば, 工業製品の縁部分を滑らかに, もしくは, 鋭くするなどの変更を, 実際

のモックアップの形状を変化させることなく, 重畳する CG の曲率半径を変更することにより, 実際に物体形状を変更したのと同等の印象をデザイナーに与えることが可能になる。今後は, 視覚刺激と触覚刺激の組み合わせから知覚される物体形状 (曲率半径の値) について, さらに調査を進め, 例えば「曲率半径が 1.4 mm のエッジに 2.2 mm の CG を重畳した場合には, 1.6 mm のエッジに感じる」などの対応表を作成し, デザイナーの意図する物体形状の印象操作を定量化することなどを考えている。

本論文で紹介した実験では, 提示映像上で仮想物体と実物体が重なった場合には, 複合現実感を用いたユーザインタフェイスで広く採用されている可視領域マスク法 ([15][16]) を用いて, 仮想物体の適当な領域を不可視とすることにより, 現実感を損ねない映像提示を実現している。今後は, このような手領域の適切な重畳表示が視触覚融合処理に与える影響と有効性に関する評価実験を通じ, 我々が提案する提示方式の有効性を検証する予定である。また, 可視領域マスク法で切り出した領域に誤差が生じる場合, その結果生じる両眼視差により, 被験者が手と提示物体の位置関係の認識を誤る可能性が考えられる。注目物体の境界領域の透過率を段階的に変化させる (ぼかす) ことにより, 切り出し誤差から知覚する視差を軽減し, 影響を除去する手法が考えられる [20]。今後は, 手領域の切り出し精度が, 被験者の知覚する奥行きに与える影響に関する評価実験を通じ, 上記対策の有効性を検証する予定である。

従来研究で採用されている“手の映像を見せない”, “レンズ等によって拡大・縮小した映像が見えてしまう”など, 視覚と体性感覚が一致していない場合と, 本論文で提案したように視覚と体性感覚が一致する場合において, 視覚と触覚の感覚相互作用の強度に差が生じるか否かに関する調査は, 複合現実感を用いた視触覚融合提示の有効性を示すために重要であり, 今後検討を進めたい。

付録：視覚と触覚の刺激値の設定

ここでは, 第 3 節の評価実験で被験者に提示した視覚と触覚の刺激値の設定を目的とした予備実験について述べる。弁別閾設定実験の結果から, 視覚・触覚各々について, 7 種類 (0.2mm, 0.6 mm, 1.0 mm, 1.4 mm, 1.8 mm, 2.2 mm, 2.6 mm) の刺激値が用意される。予備実験では, 23 歳の男性被験者 2 名に, 視覚のみ, 触覚のみの二通りの提示法で, 全ての視覚と触覚の刺激値を観察してもらい, 視覚と触覚両方を用いたマッチング作業によって知覚情報を報告してもらう³。片

³視覚と触覚の刺激値が同じ値になる組み合わせは除外する

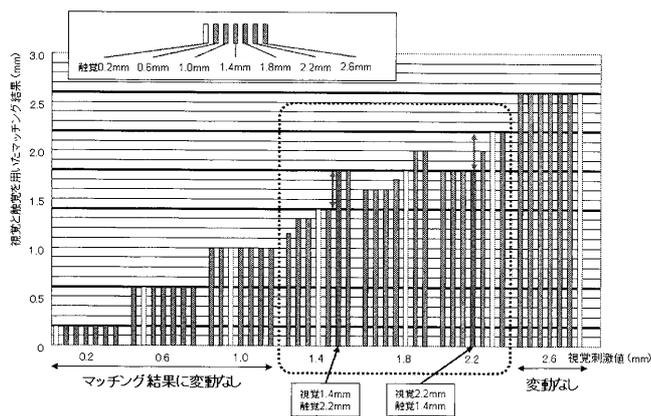


図 16 視覚刺激を変化させた場合の視触覚マッチング結果

Fig.16 Matching results by haptic/visual stimuli with changing visual stimulus

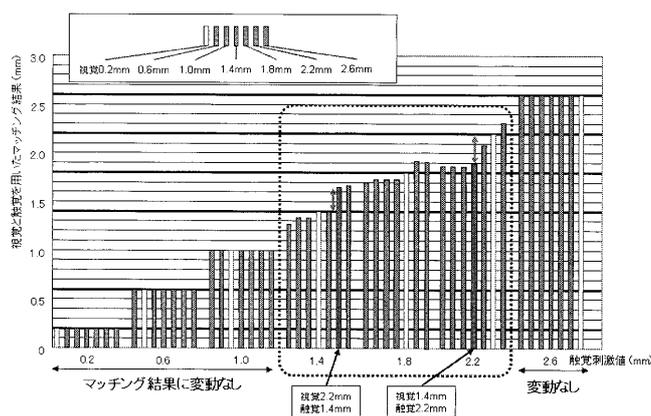


図 17 触覚刺激を変化させた場合の視触覚マッチング結果

Fig.17 Matching results by haptic/visual stimuli with changing haptic stimulus

方の刺激値をいくら変化させても、マッチング結果が変化しない場合、変化させなかった方の刺激値の占有率が高すぎると判断し、実験に用いる提示刺激の組み合わせから除外する。一方、片方の刺激値の変化に伴い、マッチング結果が変動する場合、そのとき変化させなかった方の刺激値を、視触覚融合実験における提示刺激値の候補とし、マッチング結果の変動値を記録する。図 16、図 17 に、予備実験における各提示刺激値の変化とマッチング結果の関係を示す。図 16 は視覚刺激値を、図 17 は触覚刺激値を変化させた場合である。上述したように 0.2mm、0.6 mm、1.0 mm、2.6 mm の刺激値では、視覚／触覚の刺激値を変化させてもマッチング結果の変動がみられないため提示刺激値候補から除外する。

主観評価実験の評価精度を確保するためには、試行回数は可能な限り少なく設定することが望ましい。主観評価実験の試行回数は、各提示刺激値の組み合わせ数で決定するため、なるべく少数の提示刺激値を設定することにより高い実験精度の実現が可能となろう。一方、本実験の目的は、視覚と触覚の相互作用の存在を確認することであるため、視触覚融合の効果が顕著に現れる刺激値の組み合わせを選定することが重要である。図 16、図 17 の予備実験結果に示すように、1.4 mm と 2.2 mm を組み合わせさせた場合、マッチング結果の変動が最も大きく、視触覚融合の相互作用が最もはっきりと現れることがわかる。この結果から、第 3 節の評価実験で被験者に提示する視覚と触覚の刺激値として、1.4 mm と 2.2 mm を選択する。二組の刺激値の組み合わせによって評価実験を実施することができるため、評価精度も確保される。

参考文献

- [1] Yuich Ohta, and Hideyuki Tamura: Mixed Reality -Merging Real and Virtual Worlds- Ohmsha Ltd., (1999)
- [2] Azuma, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality, Presence, The MIT Press, Vol.6, No.4, pp. 355-385, (1997)
- [3] 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聴覚融合による素材感呈示, 電子情報通信学会 2006 年総合大会講演論文集, D-12-25, p.157, (2006)
- [4] Morio Nakahara, Itaru Kitahara and Yuichi Ohta: Sensory Property in Fusion of Visual/Haptic Cues by Using Mixed Reality, The Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2007), pp.565-566, (2007)
- [5] Ganesh Ramannarayanan, James Ferwerda, Bruce Walter and Kavita Bala: Visual Equivalence: Towards a New Standard for Image Fidelity, Proc. of ACM SIGGRAPH 2007, Vol. 26, Issue 2, Paper No.76,(2007)
- [6] David E. DiFranco, G. Lee Beauregard and Mandayam A. Srinivasan: The Effect of Auditory Cues on The Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments, Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division (ASME 1997), Vol.61, (1997)
- [7] Frank Biocca, Jin Kim, and Yung Choi: Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions, Presence, Vol. 10, No3, pp.247-265, (2001)
- [8] 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)
- [9] I. Rock, and C. S. Harris: Vision and touch, Scientific American, Vol.216, pp. 96-104, (1967)
- [10] I. Rock, and J. Victor: Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses, SCIENCE, Vol.143, pp.594-596, (1964)
- [11] Susan J.Lederman, and Susan G. Abbott: Texture Perception: Studies of Intersensory Organization

中原・北原・大田：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

[著者紹介]

- Using a Discrepancy Paradigm, and Visual Versus Tactual Psychophysics, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* Vol. 7, No. 4, pp.902-915, (1981)
- [12] J.M.Hillis, M.O.Ernst, M.S.Banks, M.S.Landy: Combining Sensory Information: Mandatory Fusion Within, but Not Between, Senses, *SCIENCE*, Vol. 298, pp.1627-1630, (2002)
- [13] Yanqing Wang and Christine L. MacKenzie: The Role of Contextual Haptic and Visual Constraints on Object Manipulation in Virtual Environments, *Proc. of the SIGGCHI conference on Human factors in Computing Systems*, pp.532-539, (2000)
- [14] 加藤博一, M. Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol4, No4, pp607-616(1999)
- [15] 神原誠之, 大隈隆史, 竹村治雄, 横矢直和: ビデオシースルー型拡張現実感のための実時間ステレオ画像合成, *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol. J82-D-II, No. 10, pp. 1775-1783 (1999)
- [16] Yuichi Ohta, Yasuyuki Sugaya, Hiroki Igarashi, Toshikazu Ohtsuki, Kaito Taguchi: Share-Z: Client/Server Depth Sensing for See-Through Head-Mounted Displays, *PRESENCE*, The MIT Press, Vol. 11, Issue 2, pp. 176-188 (2002)
- [17] Masatsugu Itoh, Motoyuki Ozeki, Yuichi Nakamura, and Yuichi Ohta: Simple and Robust Tracking of Hands and Objects for Video Indexing, *Proc. of IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp.252-257, (2003)
- [18] 南風原朝和: 心理統計学の基礎—統合的理解のために, 有斐閣, (2002)
- [19] 永田靖, 吉田道弘: 統計的多重比較法の基礎, サイエンス社, (1997)
- [20] Ryota Yasui, Isamu Matsuda, Hideki Kakeya: Combining Volumetric Edge Display and Multi-view Display for Expression of Natural 3D Images, *SPIE proceeding Volume 6055: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*, pp.0Y1-0Y9 (2006)

(2007年9月10日受付)

中原 守勇 (学生会員)



2007年筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻修了。現在、日本IBMに勤務。在学中は、複合現実感における視覚と触覚の融合効果に関する研究に従事。

北原 格 (正会員)



1996年筑波大学大学院理工学研究科修了。同年シャープ(株)入社。2000年筑波大学先端学際領域研究センター助手, 2003年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)研究員, 2005年から筑波大学大学院システム情報工学研究科講師。コンピュータビジョン, 複合現実感に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE会員。IEEE VR2003 Honorable Mention Awardなど受賞。博士(工学)。

大田 友一 (正会員)



1977京都大大学院博士課程了。京都大学情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師, カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員, 筑波大学電子・情報工学系助教授を経て, 1992同教授。2004より, 同大学大学院システム情報工学研究科教授。工博。コンピュータビジョン, 視覚情報メディア, 複合現実感の研究に従事。電子情報通信学会フェロー, 情報処理学会フェロー, 国際パターン認識連盟(IAPR)フェロー。