

拡張現実空間における触感覚呈示による 仮想キャラクターとのインタラクションシステム

高瀬 裕史[†] 姜 長安[†] 澤田 秀之[†]

仮想物体とのインタラクションにおいて、仮想物体により高い現実感を持たせるための拡張現実感の研究が盛んに行われている。視覚情報に加え、聴覚や触覚といった感覚を仮想環境に応じて呈示することで、より高い現実感を得られると考えられる。我々は、特に触感覚に着目し、シースルー型の HMD を装着したユーザの手の上に仮想キャラクターを重畳して表示し、そのキャラクターの動きに対応した触感覚を呈示するシステムを構築した。本システムはユーザの手の姿勢を画像処理によってリアルタイムに認識し、動作に応じた仮想キャラクターの触感覚を、触覚グローブを通して呈示することが可能である。本論文では、ユーザが仮想キャラクターに直接触れた際の多感覚へのフィードバック呈示が可能なインタラクションシステムの構築と、ユーザ実験による評価について述べる。

Interaction with a Virtual Character by Displaying Tactile Sensations in Augmented Reality

HIROFUMI TAKASE[†] CHANGAN JIANG[†] HIDEYUKI SAWADA[†]

In the research field of augmented reality, many experimental systems have been introduced so far to provide natural interaction with a virtual character. To introduce a high level interaction, not only visual information but also other human sensations such as auditory information and tactile sensations should be presented to a user. In this research, we pay attention to the tactile sensation in the manipulation of a virtual character. The virtual environment is manipulated by intuitive gestures, and tactile sensations corresponding with the gestural commands are presented to the user to establish visual-tactile interactions. Four subjects tried the system, and significant evaluations were obtained in the interaction between a virtual character and a user.

1. はじめに

拡張現実感(Augmented Reality)は、計算機によって構築された仮想空間や物体、電子情報を現実世界に付加した空間を作る技術である。日常の生活環境の中にコンピュータチップとネットワークが組み込まれ、ユーザがそれを意識することなく計算機の機能を利用できるユビキタスコンピューティングの環境下において、拡張現実感ユーザインタフェースとしての重要な役割を担うと考えられ、近年盛んに研究が行われている^{1), 2)}。拡張現実空間における仮想物体はユーザにそれを意識させないために、高い現実感を求められる場合がある。例えば、実物を模した商品を拡張空間で扱うオンラインショッピングやヴァーチャルペット等が挙げられるが、現在の段階ではそれほど高い現実感を持った拡張空間の構築はされておらず、仮想物体に高い現実感を持たせるためにはユーザとのインタラクションについてより深い検討を行う必要がある。

人は周囲の空間を認識する際、視覚だけでなく聴覚や触覚から得られる情報を意識的、あるいは無意識のうち統合して判断している。例えば、手で本をパラパラとめくる動作においては、送られるページの枚数、指先を離れる紙の音、触感覚などを統合して理解しており、もし間違えて2ページ分めくったとしても、違和感を覚え、すぐに気づくことができる。拡張現実感におけるヒューマンインタフェースにおいても、仮想物体が持っている情報を、複数の感覚へ統合して的確にフィードバックすることで、ユーザがより高い現実感を得られるのではないかと考えられる。

人は触れることのできるものこそ現実に存在していると考えられる傾向が強く、仮想物体の触感覚を呈示することは高い現実感を引き出す上で重要な要素となる。たとえば、拡張現実空間の中でユーザが仮想物体に触れる際には、仮想物体に直接接触をおこなう動作が要求され、マウスやキーボードなどの汎用的なインタフェースを用いて仮想物体を操作するものでは、高い現実感を得ることの妨げとなる。より高い現実感を得るためには、ユーザが仮想物体に直接タッチして、また

[†] 香川大学 工学部

Faculty of Engineering, Kagawa University

その入力に対して、システムが的確に、かつ直感的に理解できる応答を行うことが必要となる。

そこで我々は、ジェスチャ認識に基づく入力と触感覚によるフィードバックから構成されるユーザインタフェースシステムの構築を進めている。我々が日常的に用いる手腕部の動作で仮想物体を直接接触るように操作し、その触感覚を呈示することができれば、拡張現実空間に対する高い現実感を得ることの助けになると考えられる。

ジェスチャを計測する手法は、大きく分けて二種類挙げられる。ひとつはデータグローブなどの接触型センサを装着して計測する方法であり³⁾、もうひとつはカメラを用いた画像処理による計測である⁴⁾。接触型センサを用いる手法は高い精度でジェスチャを計測することが可能であるが、システムの規模が巨大化し、導入コストも大きいという問題がある。一方、画像処理による手法は、精度が落ちるものの利用者の負担が少なく、カメラさえあれば容易に導入可能である。

一方、触覚を呈示する手法には、アレイ状に並べたソレノイドや圧電素子によって振動を生成し、文字や図形パターンの伝達をおこなうものや、電極を使用し、電流によって情報を伝達するもの、ピンを段階的に上下することによって表面形状を形成して呈示するものなどがある。しかし、これらの呈示装置は、静的なパターン呈示を前提として設計されており、動的な触覚情報や「なぞり」といったような触知感覚の呈示は困難である。また、呈示部のアクチュエータおよびその駆動装置の物理的構造の制限により、小型化や、省電力化への課題が多く、携帯型の触覚情報呈示に適しているとは言えない。

本論文では、ユーザが仮想物体に直接接触し、その触感覚がフィードバック呈示されるインタラクシオンシステムを提案する。本システムは仮想物体の現実感の向上を目指し、仮想物体の映像、音、触感覚をそれぞれ、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)、スピーカ、

独自に開発した触覚グローブを通してユーザに呈示する。画像処理によってユーザの手の姿勢をリアルタイムで認識し、手の動作に応じた仮想キャラクタの触感覚を呈示することが可能である。本稿では、ユーザが仮想キャラクタに直接接触した際の多感覚へのフィードバック呈示が可能なインタラクシオンシステムの構築と、ユーザ実験による評価について述べる。

2. システム構成

本拡張現実感呈示システムは、ユーザの手の動作を認識して、映像及び触覚のインタラクシオンを実現する。図1に示すように、本システムは計算機と、2台の Webcam、拡張現実空間を呈示する HMD、スピーカ、及び触覚グローブによって構成される。本研究では、ユーザがリアルタイムでシステムを操作することを目的とし、できる限りシンプルなアルゴリズムの実装を目指した。2台の Webcam は実空間の映像を取得するため、HMD の前面に装着されている。ユーザは、Webcam によって入力された実映像を見ており、その映像に計算機によって構築された立体 CG キャラクタを重畳して表示する。同時に、映像と同期した触感覚と音響が呈示される。

2.1 HMD を用いた 3D 空間の呈示

仮想物体を現実空間に重ねあわせて呈示するために、図2に示すような HMD を構築した。本 HMD の前面には2つの Webcam が装着されており、両目の位置から撮影される異なる観測点の映像を HMD の左右各々に呈示することで、立体映像として表示することができる。これにより、実際にユーザが見ているものと同様のものをリアルタイムに表示することが可能である。また、ユーザが見ている実空間映像に、計算機によって構築される仮想物体の、異なる2つの観測点か

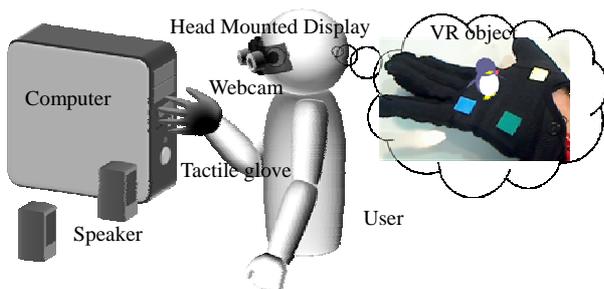


図1 システム構成

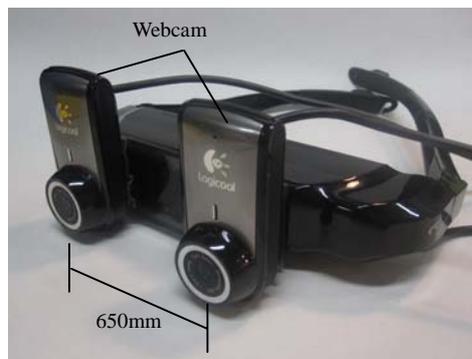


図2 ヘッドマウントディスプレイ

ら得られる映像を HMD の左右の映像に重畳して表示することで、3D 物体として呈示することが可能である。Webcam には Logicool Portable Webcam C905m を用いた。本カメラは、最大解像度 800 万画素のオートフォーカスレンズから構成されている。画像サイズは 640×480 画素、画角 76° 、重量はひとつ 21 グラムとなっている。HMD は Vuzix iWear VR920 を用いた。本 HMD は、PC に VGA 接続し、 640×480 画素で映像を表示することが可能である。映像の視野角は 32° 、重量は 85 グラムである。加えて、本 HMD には 3 軸加速度センサが内蔵されており、ユーザの頭の向きと姿勢を計測することができる。ここで得られる姿勢情報は、拡張空間と仮想物体の空間軸の対応付けに用いる。

2.2 手のひら位置検出

拡張現実空間中の仮想物体の出現位置を決定するために、HMD の前面に取り付けられた Webcam を用いて、視界の中からユーザの手の位置と姿勢を検出する。図 3(a)に示すように、ユーザの手に装着された触覚グローブの手のひら部分には、赤(R)、青(B)、緑(G)、黄色(Y)の 4 色に塗り分けられた 10 mm 四方のマークが、1 辺 60 mm の正方形の頂点の位置に貼り付けられている。このマークを Webcam によって実時間で撮影し、画像処理により、手のひらの位置並びに正方形の面ベクトルを計測する。

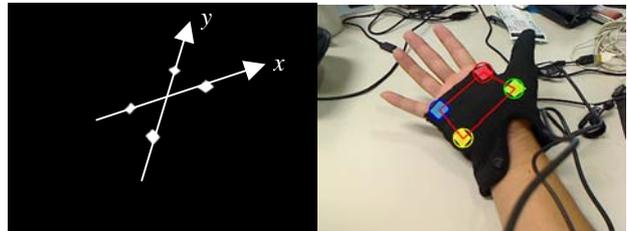
検出のための画像処理を図 3 に示す。まず、Webcam から入力された画像から、各マークの RGB 値でしきい値を設け、色を抽出する。次に、縮小・膨張処理を行うが、収縮を三回、膨張を三回行うことで、小さいノイズを除去することができる。最後に、各色について最大面積を持つ領域の重心位置をそれぞれ計算し、4 つの重心位置を頂点とする四角形を得る。この時、抽出された各マークの面積の大きい側が手前に来るので、面ベクトルの向いている方向が推定できる。抽出された各マークを頂点とする四角形を手のひらと仮定し、その面ベクトルを計算する。面ベクトルは直線 GB と直線 RY をそれぞれ x 軸、 y 軸とし、その交点を通る手のひらの垂線を z 軸とする。 x 、 y 、 z 軸の回転角をそれぞれ θ_x 、 θ_y 、 θ_z で表す。各座標軸に対する回転角は、それぞれ式(1)に従って近似的に求めることができる。また、マークサイズと四角形 RGYB の面積から、目と手との距離が推定できる。以上の計算は、ノート型 PC によって実時間処理が可能である。

$$\left. \begin{aligned} \theta_x &= \cos^{-1} \left(\frac{|RY|}{|GB|} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad [\text{degree}] \\ \theta_y &= \cos^{-1} \left(\frac{|GB|}{|RY|} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad [\text{degree}] \\ \theta_z &= \overrightarrow{RY} \text{の傾き} \quad [\text{degree}] \end{aligned} \right\} (1)$$



(a) 入力画像

(b) マーカの検出



(c) 平面の計算

(d) 手のひら位置の決定

図 3 画像処理の流れ

2.3 触覚グローブ

本研究では、触覚グローブのアクチュエータとして、糸状に加工した形状記憶合金(SMA)を用いる⁵⁾。直径 $50 \mu\text{m}$ 、長さ 5 mm 程度に加工した SMA は、電流を流し蓄熱させることによって 5 %程度長さ方向に収縮し、放熱によって温度が下がると元の長さに戻るといった特性を持っている。この SMA 糸を図 4 に示すようにアーチ状に配置してパルス電流を加えると、パルスの ON/OFF に同期して伸縮運動を繰り返し、最大 300 Hz までの微小振動を生起させることができる。またアクチュエータ 1 個あたりの消費電力は数 mW 程度であり、省電力であることも特徴である。

電光掲示板の流れる文字は視覚の仮現運動を利用したものであるが、このような錯覚は触覚にも存在する。本デバイスは、複数の SMA アクチュエータを特定の条件下で駆動させることにより、触覚の高次知覚と呼ばれる二種類の錯覚を発生させることが可能である。ひとつはファントムセンセーション(PS)と呼ばれる現象で、皮膚上の異なる 2 点を同時に一定以上の周波数で刺激した場合、図 5 に示すように、2 刺激点の間に、

あたかもそこに刺激を受けているかのような感覚を生じるものである。刺激像の出現位置は主に、2 刺激の強度差に依存する。一方の仮現運動(AM)は、皮膚上の 2 点に時間差をもって振動刺激が加えられた場合、刺激像が先に加えられた刺激点から他方へ連続的に移動していくように感じられる現象である(図 6)。

2 つの SMA アクチュエータを用いて、図 7 に示すように、2 つのチャンネルに時間差をつけてパルス信号を送ることにより AM が呈示できる。これによって皮膚上を何かが移動していくような、あるいは何かになぞられているような感覚を生起させることが可能である。

本研究では、この PS および AM を利用して仮想物体の触覚を呈示するため、図 8 に示すような SMA アクチュエータを 9 個、格子状に配列した触覚グローブを構築した。アクチュエータは、グローブの内側に直径 50 μm 、長さ 5 mm の SMA ワイヤがユーザの手のひら側の皮膚に直接触れるように縫いつけられている。PC 上で作成した駆動パルス信号を、個々のアクチュエータに入力することで、各素子の振動を独立に制御することが可能であり、これにより任意に PS や AM を発生させることができる。ユーザは本ディスプレイを手に装着することにより、駆動パルスの条件によって手のひらに様々な触覚感覚を得ることができる。

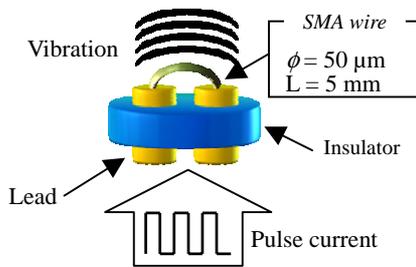


図 4 SMA ワイヤアクチュエータ

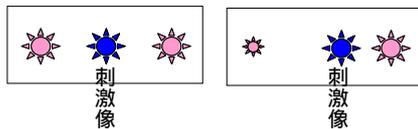


図 5 ファントムセンセーション

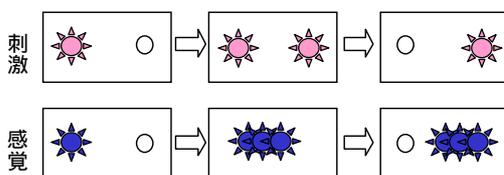


図 6 仮現運動

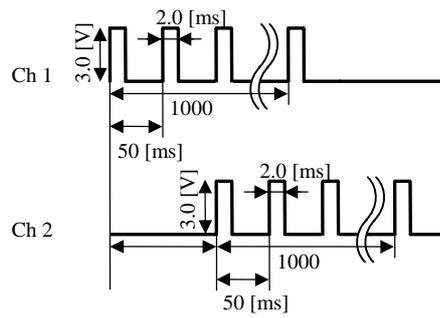


図 7 AM を生起させるパルス信号の例



図 8 触覚グローブ

2.4 仮想空間の音

人の聴覚機能は周囲の状況を認知する機能を有する重要な感覚機能のひとつである。音源位置や種類を特定することで、特に視野の外にある情報を得る際に重要な役割を果たす。また、視野の中であっても、無意識的に音情報と視覚情報を統合して空間を認知している場合があると考えられる。そこで、拡張現実空間内においても、仮想キャラクターが歩く音などといった環境音を再現することで、より現実感の高い空間を構築することができると考えられる。本システムではスピーカを用いて仮想環境音をユーザに呈示する。呈示する音響は事前に録音したものをを用いているが、今後は拡張現実空間中の音源定位に基づく立体音響生成の構築をおこなっていく。

3. 各システムの評価実験

3.1 HMD による映像呈示の評価実験

人の視野角はおよそ 120° とされているが、本システムで用いた Webcam の画角は 76° である。また、映像の描画速度による遅延や、像倍率の違いがユーザに違和感を与えることが想定されたため、実験によりこれらの評価をおこなった。4 名の被験者に対し、1) HMD 非装着の裸眼の条件、2) HMD を装着して右側のカメラからの映像を両眼に呈示した条件、3) HMD

を装着して前面に取り付けた2台のカメラで両眼立体映像を呈示した条件で、図9に示すチェス盤上に、ゲーム開始時の位置に全ての駒を並べる作業をおこなわせて、その時間を計測した。なお被験者は全員1年以上チェス経験があり、また3つの実験の間には30分以上の時間をあけた。

表1に実験結果を示す。HMDから単眼カメラ映像を呈示した条件で最も作業に時間がかかり、HMD非装着条件のおよそ3倍の作業時間を要した。被験者からは、HMDからの映像の解像度不足により駒の識別に時間を要した、配置動作に対する映像のわずかな遅れと単眼視映像による奥行き感の喪失が原因で、作業に違和感を覚えた、という意見が多く聞かれた。一方、ステレオカメラを用いて立体映像を呈示した場合、奥行きが良好に知覚できるため、単眼カメラ条件と比較して作業時間が約25%短縮された。しかし、HMD非装着時と比較して、平均で2倍程度の時間を要することがわかった。依然230 msecの映像遅延と、解像度不足により、視覚のみによって駒の種類を瞬時に識別することが困難で、判別に時間がかかる場合があったため、駒の識別は指先で形状を感じながら判断したという意見も多くみられた。このことから、人が物体を認識したり、周囲の状況を判断したりするには、触覚が大きな役割を担うことが分かる。

3.2 手のひら位置検出実験

画像処理による手のひら部の検出能力を評価するための実験を行った。まず、ユーザがグローブを装着し、

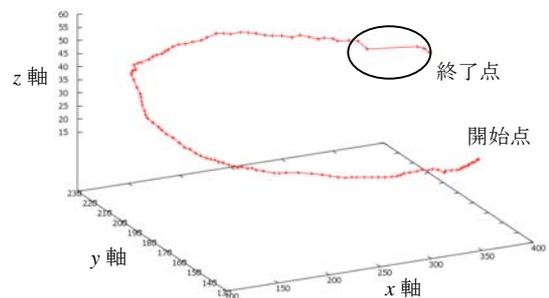


図9 チェス盤と駒

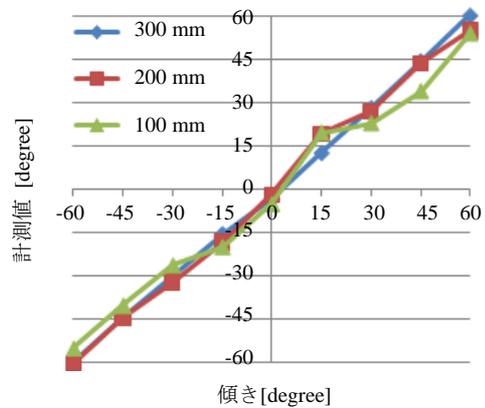
表1 拡張空間内での作業時間の比較 [sec]

条件 被験者	装着無し	HMD+単眼 カメラ	HMD+両眼 カメラ
A	54	100	66
B	48	120	120
C	44	203	135
D	28	135	92
平均時間	43.5	139.5	103.3

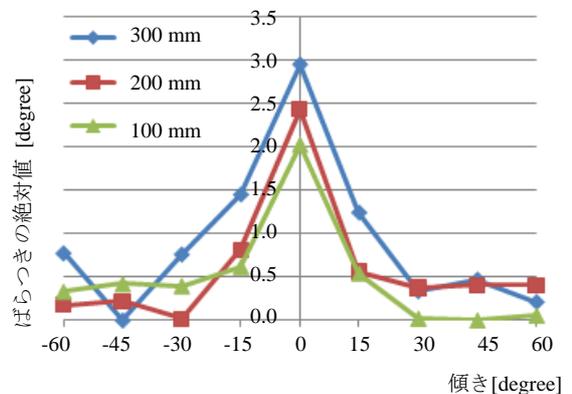
手のひらを垂直に見た状態で、腕を時計回りに円を描く動作を行った。計測結果の例を図10(a)に示す。図におけるz軸は視線と平行となる。x-y平面内の位置及び、4つのマーカから作れる面積の大きさから推定されるz軸上の位置が、良好に計測出来ていることがわかる。図中の丸で囲んだ部分に座標値が急激に変化している箇所があるが、これは手が顔の影に来てしまい、一部のマーカが正しく検出されなかったためである。



(a) 手のひら位置の推定



(b) グローブの傾きの推定



(c) 各計測点における計測データのばらつき

図10 画像処理による計測結果

次に、グローブとカメラの距離を一定にし、グローブを垂直方向から傾けながらその角度の推定をおこなった。グローブとカメラとの距離は 100、200、300 mm の 3 通りとし、グローブが視線と垂直になるときを 0° とした。傾きは -60° から +60° までを 15° 間隔で 10 回ずつ計測をおこなった。計測結果の平均値を図 10(b)に、また各計測点におけるデータのばらつきを図 10(c)に示す。0° 付近では計測値のばらつきが見られるが、複数回計測による平滑化により、良好な結果が得られている。一方傾きが大きくなると最大で 10° 程度の誤差がみられる。これは各マーカの検出が不安定になるためであり、今後、精度向上のための検討をさらに進めていく。

3.3 触覚呈示実験

触覚グローブによって呈示される感覚を評価するため、4名の被験者に対して3つの図形パターンの触覚呈示を呈示し、アンケートによる聞き取り調査を行った。呈示した図形は三角形、四角形、円であり、反時計回りで図形の外周をなぞる刺激をグローブから出力した。刺激出力の例として、図 11 に四角形の呈示の際の各チャンネルの出力を示す。アクチュエータの駆動信号は、パルスの ON-OFF Duty 比を 1:20 で固定し、パルス周波数は 50, 100 Hz の 2 種類で各々の刺激を被験者に呈示して、以下の4つの評価項目について7段階評価で答えさせた。

- A: 図形の明瞭さ B: 振動の強度
- C: なぞり感覚 D: 不快感の無さ

この評価は、点数が高いほど明瞭で、振動強度が強く、なぞり感覚がはっきりと分かり、不快感が少ないものとなる。なお、刺激は被験者が評価を終えるまで繰り返し呈示し続けた。本パラメータは、これまでの研究から、ユーザが触覚呈示をなぞり感覚として知覚しやすい値であるものとして選んだ⁵⁾。

各評価の平均を表 2 に示す。平均を周波数別に見ると、図形の明瞭さ、振動の強さについては 50 Hz での評価値がやや高く、なぞり感覚をよく感じるかや不快感の無さについては、100 Hz での評価値が高かった。このことから、50 Hz よりも 100 Hz での刺激呈示の方が、きめが細かく滑らかな刺激になることがわかった。この理由としては、パルス幅が短くなるために、粗さや凹凸感を感じにくくなっていることが考えられる。また多くの被験者から、100 Hz でなぞり感が虫の這うような感覚として、また 50 Hz で手のひらを軽く叩くような感覚として感じられたという意見を得ら

れた。そこで、図 12 に示すように渦巻の中心に向かってなぞり感覚を呈示したところ、全てのユーザが図形通りの感覚を感じ取ることができた。

4. 拡張現実システム

4.1 仮想キャラクタ呈示システム

仮想物体とのインタラクシオンを評価するために、図 13 に示すような、仮想キャラクタが触覚グローブの上を歩きまわり、その触覚呈示をユーザに呈示するシステムを構築した。この仮想キャラクタは HMD を通してユーザに立体呈示されている。キャラクタは手のひらの上の4つのマーカに囲まれた領域内をランダムに歩きまわり、ユーザは触覚グローブを通してその動きをなぞり感覚で感じることができる。キャラクタの歩く足音はスピーカから出力される。また、ユーザの手の動作によってキャラクタの動きに干渉することができる。例えば、図 13 の(b)に示すように手を傾けて、傾き角度が一定値を超えると、キャラクタが滑り落ちていくといったものや、手を上下に動かすとキャラクタが手の動きに合わせて跳ね回る、といったものである。

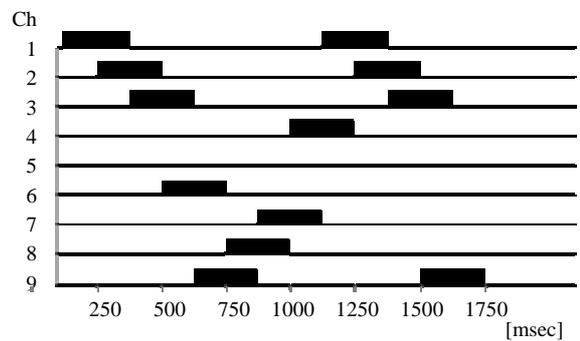


図 11 四角形の呈示における各チャンネルの出力

表 2 触覚呈示の評価

	50 Hz	100 Hz
明瞭さ	4.8	4.0
振動強度	4.5	4.3
なぞり感覚	4.5	5.3
不快感	4.3	5.5

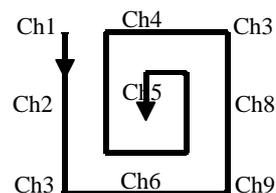


図 12 渦巻きのなぞり感覚呈示



(a) ユーザからの視点映像の例



(b) 動作によるインタラクション

図 13 PengTouch システム

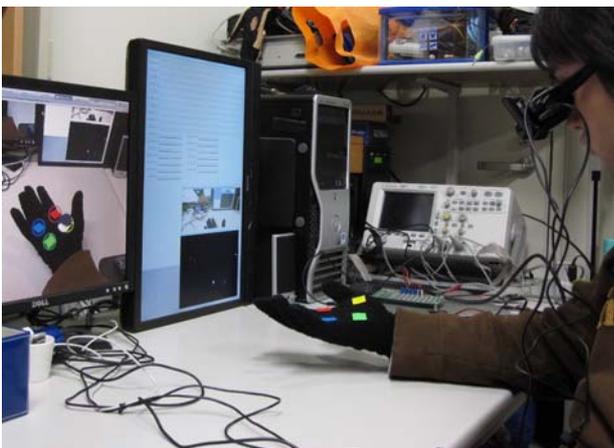


図 14 ユーザ実験の様子

4.2 現実感の評価

拡張現実感における仮想物体の現実感の評価するため、ユーザ実験を行った。図 14 に実験の様子を示すが、PC のディスプレイには、HMD と同じ映像を表示している。4名の被験者に対し、触感覚を呈示する

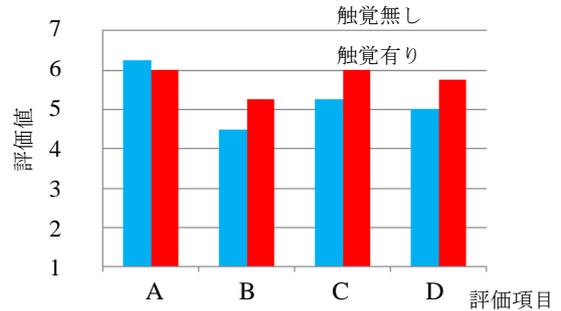


図 15 評価結果

場合としない場合について、各々仮想キャラクタとのインタラクションを行わせ、以下の質問に7段階評価で答えさせた。評価値は7に近いほど肯定的、1に近いほど否定的であり、高いスコアほどインタラクションの評価が高いことを意味する。

- A) システムの動作は分かりやすい
- B) キャラクタが本当に手のひらの上に乗っていると感じる
- C) インタラクションにおける仮想キャラクタの反応に違和感が無い
- D) このシステムをまた使ってみたい

実験結果を図 15 に示す。多くの被験者が、システムに対して好評価を示した。特にシステムの動作の分かりやすさについて高い評価を得た。手袋を装着するのみで、ユーザは直接、仮想物体に触れる感覚を得ることができ、現実感の増強やシステムの面白さについて評価が得られたといえる。

また、被験者のコメントからシステムの課題に関するものを以下に挙げる。

- ・ HMD や触覚グローブを装着することで動きが制限され、煩わしさを感じる
- ・ キャラクタの触感覚を強く感じる場所と感じにくい場所でムラがある
- ・ 両手を使って、キャラクタを撫でたり叩いたり、より多くのインタラクションをおこないたい

本研究で構築した HMD には 21 グラムの Webcam が2つ装着されているため、合計で約 130 グラムとなる。加えて、各々が PC にケーブル接続されているため、動きが制限されてしまうという問題がある。Webcam を直接装着せず、固定カメラによって手の動きや姿勢を検出するという手法も考えられるが、本研究では屋外等、場所を選ばずに利用できる拡張現実シ

システムの構築を進めている。また、触感覚のムラについては、手を動かすことでグローブが伸縮した際に、SMA ワイヤアクチュエータが手のひらに触れない場合があることが原因であると考えられる。これらの課題を踏まえて、今後装着型機器のユーザビリティや、安定性、キャラクタとのより豊かなインタラクシオンについて、さらに評価、検討を行っていく。

5. まとめと今後の展望

本研究では視覚と聴覚、触感覚呈示によるマルチモーダル呈示を行い、画像認識に基づいたインタラクシオンを行う拡張現実感システムを構築した。また応用システムとして、CG キャラクタが手のひらの上を歩きまわり、その足踏みを触感覚呈示するシステムを紹介した。本システムを用いて評価実験を行ったところ、良好な評価を得た。また触感覚を呈示することで、視聴覚のみの情報提示と比較して、より高い現実感や面白さを得られることが分かった。

今後は、装着型機器のユーザビリティや安定性について検討していくと共に、例えばグローブをつけていない方の手の動作を画像処理によって認識することで、より高い仮想キャラクタとのインタラクシオンを実現し、マルチモーダルインタフェースシステムの構築を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 三武裕玄, 青木孝文, 長谷川晶一, 佐藤誠: "視覚・聴覚を持つアクティブバーチャルクリーチャ", 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2010, No.4, pp. 155-158 (2010)
- 2) 大槻麻衣, 杉原賢次, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: "BrushDevice: 絵筆の触感と描き味を活かした描画デバイス", 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2010, No.4, pp. 71-74 (2010)
- 3) 澤田秀之, 橋本周司, 松島俊明: "運動特徴と形状特徴に基づいたジェスチャー認識と手話認識への応用", 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp. 1325-1333(1998)
- 4) 園田智也, 村岡 洋一: "空中での手書き文字入力システム", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.7, pp.1015-1025(2003)
- 5) 水上陽介, 澤田秀之: "形状記憶合金糸を用いた触覚ディスプレイと微小振動の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示", 情報処理学会論文誌 Vol.49, No.12, pp. 3890-3898 (2008)