

応用論文

MR RobotPHONE を用いた 複合現実環境におけるインタラクション

清水 紀芳^{*1} 中村 俊成^{*1} 関口 大陸^{*2} 杉本 麻樹^{*1} 新居 英明^{*1} 稲見 昌彦^{*1*3}

Interaction in Mixed Reality Environment by MR RobotPHONE

Noriyoshi Shimizu^{*1}, Toshinari Nakamura^{*1}, Dairoku Sekiguchi^{*2}, Maki Sugimoto^{*1},
Hideaki Nii^{*1} and Masahiko Inami^{*1*3}

Abstract — A Robotic User Interface (RUI) is part of a concept in which a robot is used as an interface for human behavior. RobotPHONE is a RUI for interpersonal exchanges that uses robots as agents for physical communication. The shape and motion of RobotPHONE is continuously synchronized by a bilateral control method. Using RobotPHONE, users in remote locations can communicate shapes and motion with each other. In this paper, we propose a new type of RobotPHONE (MR RobotPHONE) system using Mixed Reality system. This MR RobotPHONE system enables people to communicate with each other via MR world and directly interact with the mixed reality world.

Keywords : Robotic User Interface, Haptic Feedback, Communication, Physical Avatar, Mixed Reality

1. はじめに

人が情報世界に対してインタラクションを行う手段として、パーソナルコンピュータに見られるような Graphical User Interface (GUI) が広く用いられている。これに対し近年、Tangible bits [1] や NaviCam [2] のように実世界に存在するオブジェクトをインタフェースとして用いることで、人がより直感的にシームレスに情報世界に対して接続することを目指した実世界指向のインタフェースが活発に研究されている。

一方ロボットは、従来の産業用ロボットや極限環境ロボットのような人間の代替を目的としたものではなく、介護ロボットやペットロボット[3]といったような、人間との共生を目的としたロボットが登場しており、人にとって身近なものとなってきている。また、ロボットは身体性を有するコンピュータであると捉えることができ [4], その身体の物理的存在自体が圧倒的な

存在感となると共に、身体による物理的相互作用を通じ、実世界に対して多大な影響を及ぼすことが可能である。このロボットを実世界と情報世界とのインタフェースとして捉えた概念が Robotic User Interface (RUI) [5]である。RUI を用いることで実世界に対する入出力を備えた実世界指向のユーザインタフェース環境の構築が可能であると考えられる。

現在、我々は人と同じ形状を有した人型ロボットを RUI として用いている。人間を規範とした形状・自由度をインタフェースが有しているため、操作者は容易に自己の身体像を RUI に投射でき、自身の体を動かすかのような直感的な操作が可能となる。情報世界内の CG アバタの操作に RUI を用いる場合、RUI とその CG アバタとで形状を同期させる。この RUI と CG アバタとの形状同期により、情報世界への直感的入力が可能となると共に、RUI 自身の動作により情報世界からの出力を得ることも可能となる。

RobotPHONE [6] は、ロボットの持つ身体性に着目し、人型ロボットを入出力のインタフェースとして使用したコミュニケーションデバイスである。RobotPHONE では、互いに離れた場所に存在するロボ

*1: 電気通信大学大学院 電気通信学研究所

*2: 東京大学大学院 情報理工学系研究所

*3: 科学技術振興機構 さきがけ

*1: Graduate School of The University of Electro-Communications

*2: School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

*3: Japan Science and Technology Agency

ットの形や動き等をリアルタイムに同期することで、ロボット同士の動作を交換可能にしている。通常の電話が声という聴覚に対する情報を伝達するためのデバイスであるとする、RobotPHONEでは入出力のインタフェースとして実体を有するロボットを使用しているため、ロボット自身の動作といった視覚情報や、ロボットに触れることで相手の力を感じられるといった力覚情報の伝達も可能である。つまり、RobotPHONEとは、視覚・力覚・聴覚を統合して伝達する新しい種類のコミュニケーションデバイスである。

また、近年注目されている技術として複合現実感 (Mixed Reality: MR) [7] がある。これは、人が生活する物理的な現実世界とコンピュータグラフィックス (CG) によって表現される情報世界とを、実時間においてシームレスに融合する技術である。医療や福祉、建築、都市設計、アート、エンターテインメントなど様々な分野において応用可能な技術として研究が盛んに行われている [8][9][10]。

本研究では、実世界に存在するロボットをMR世界へのインタフェースとして利用することで、自身の体を動かすかのような直感的入力や人の身体形状に合った視覚・力覚情報の提示を可能とし、現実世界と情報世界とをシームレスに融合させたMR環境の構築を目指す。MR環境の構築として、MR技術を追加したRobotPHONE (以下、MR RobotPHONEとする) のシステムの設計、実装を行い、MR RobotPHONEを用いたアプリケーションの実装を行う。今回用いるMR技術としては、カメラで人工的なマーカを認識して3Dオブジェクトをビデオ映像にオーバーレイ表示するARtoolkit [11] を選択した。カメラは操作者視点用のカメラとMR RobotPHONE 頭部に内蔵させたMR RobotPHONE 視点用のカメラの2台を用意し、アプリケーションによって、その2台のカメラを選択して使用する。従来のMR技術を用いたアプリケーションでは、ユーザ視点のカメラを用いたインタラクションが多く用いられているが、MR RobotPHONE 視点のカメラを用いることで、操作者のアバターであるMR RobotPHONE 視点によるMR環境へのインタラクションが可能となる。

以降、2章ではRUIの特徴とMR RobotPHONEの特徴やシステム構成、仕様について述べる、3章、4章、5章においてはMR RobotPHONEを用いたアプリケーションの3つの応用例についてそれぞれ述べ、3章では、MR RobotPHONEを用いた遠隔地のユーザ間におけるMR世界を通じたコミュニケーションシステムに関して、4章ではMR世界に対しての力覚提示を伴う

直接的・直感的なインタラクションを可能とするシステムに関して述べる。5章では、コミュニケーションやインタラクション以外のアプリケーションとして、CGの外観をロボットに重畳するシステムの実装と問題点に関して実験・検討を行う。

2. Mixed Reality 技術を用いた MR RobotPHONE

2.1 Robotic User Interface

Robotic User Interface (RUI) とは、操作者が身体性を有した人型ロボットを手で持ちながらロボットの手足等を操作することで、ロボットを通じて情報世界とインタラクションを行うことが出来るインタフェースである。

表1 GUIとRUI

Table 1 GUI and RUI

	GUI	RUI
入力	マウス・キーボード	ロボットの操作
出力	ディスプレイ・プロジェクタ	ロボット自身の動作・形状変化
アプリケーション	デスクワーク	人の身体動作
メタファ	デスクトップ	人の身体

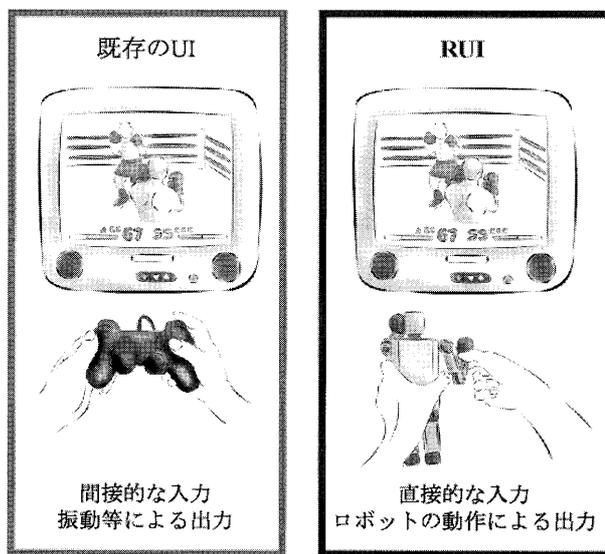


図1 既存のUIとRUIとの対比図

Fig.1 Differences between General UI and RUI

インタフェースとしてRUIとGUIを対比すると表1のようになる。GUIが言語やシンボル操作を主体とした象徴的表象を用いるのに対し、RUIは人間の身体図

式や身体像を用いた動作的表象や映像的表象を主として用いるものであるといえる。

RUI を用いて情報世界に存在する CG アバタを操作する具体的な例として、ボクシングゲームにおける既存のインタフェースと RUI を用いた場合の入出力方法の違いについて以下に説明する。

既存のインタフェースでは、主にボタン等を押すことで CG アバタの移動やパンチ等のアクションを行わせるという間接的な入力方法を使用している。また、情報世界からの出力としては、自身の CG アバタが殴られた時に、その衝撃がインタフェースの振動等を通じて操作者に対して提示される。

一方 RUI を用いた場合、情報世界の CG アバタと実世界のロボットの形状は同期されている。これにより、パンチなどの動作は操作者が直接ロボットを動かすことで直接的に指示入力を行うことが可能である。出力に関しても、CG アバタが殴られた際に、手で持って操作しているロボットの同じ箇所が動作することにより、操作者に対して視覚的な情報だけでなく力覚情報を提示することも可能である。

ロボットを情報世界へのインタフェースとして使用した研究に Swamped! [12] がある。Swamped! と RUI を対比すると、Swamped! はセンサーが搭載された縫いぐるみを現実世界に Tangible User Interface (TUI) として用意し、その縫いぐるみを操作することで、情報世界内に存在する縫いぐるみと同形状の CG アバタに決められた一連の動作を行わせるものである。これは親しみやすいインタフェースであり、インタフェースの操作に似通った動作を CG アバタに対して行わせることが可能である。これに対し RUI では、決められた動作を指示入力するのではなく、各関節を自由に動かし、様々な操作を直接的に行うことが可能である。また、入力だけでなく、ロボットから視覚・力覚情報も得ることが可能である。

また、力覚提示装置としての RUI に着目してみる。PHANToM [13] や SPIDAR [14] など様々な力覚提示装置が存在するが、それらは大別して「装着型」、「把持型」、「遭遇型」に分類される。これに対し RUI は、ユーザが手で持ちながら操作するものであることから「保持型」の力覚提示装置と言える [15]。従来のような人体に対する直接的な力覚提示ではなくロボットを通じた間接的な提示が行われる。また、操作者の身体像が投射された CG アバタに様々なツールを持たせることも可能であり、インタラクション方法が装置の形状に制限されない。

2.2 MR RobotPHONE

MR RobotPHONE とは、身体性を有したインタフェースである RUI に対して Mixed Reality 技術を付加したものである。ARtoolkit のマーカーを認識するカメラとしては、ユーザ視点カメラと、カメラを RUI 頭部に内蔵した RUI 視点カメラの二台を用意した。RUI 視点のカメラにより、従来の RUI では人間の身体を投射するのみであったが、この身体に加えて視覚も RUI に対して投射することが可能になる。また、RUI にカメラを内蔵させることで、インタフェース自身が外界を認識可能になったと考えることが出来る。

本研究では、MR RobotPHONE を用いて MR 世界を通じての遠隔コミュニケーションや MR 世界へのインタラクションに関するシステムを提案する。従来の MR に関する研究では、人の身体や Tangible User Interface (TUI)、PDA などを用いてユーザは MR 世界へのインタラクションを行っている [16][17]。また、その時、MR 世界側からユーザへ提示される情報としては視覚や聴覚に対する情報のみである。これに対し MR RobotPHONE では、実世界にあるロボット自身が直接 MR 世界のオブジェクトに触れることもでき、ユーザに対しての力覚情報の提示も可能となる。

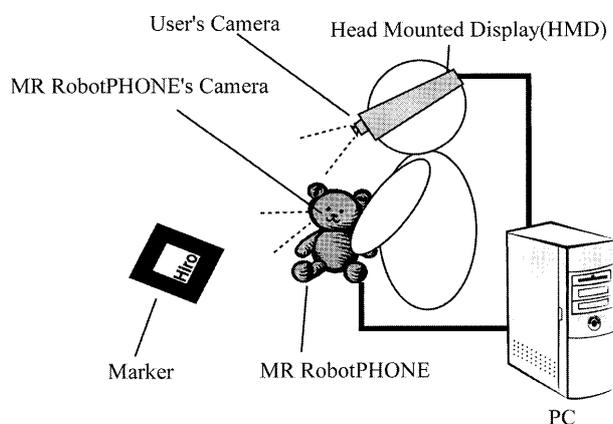


図2 基本システム構成

Fig.2 Basic System Configuration

ロボットと形状同期が成される CG アバタを MR 世界に存在させ、そのアバタ視点での視覚情報をユーザに提示することで、MR によって構築された情報世界に自身を没入させることが可能となる。また、ロボットを操作することによって情報世界を移動して情報世界内のオブジェクトに触れることで、力覚提示を伴うインタラクションも可能となる。情報世界への没入という点では、CAVE [18] や COSMOS [19] を用いることで非常に高い没入感を得ることは出来るが、この場合は

大規模な装置が必要となってしまう。これに対し MR RobotPHONE における CG アバタ視点によるインタラクションシステムでは、さほど多くの装置は必要とせず、身体像が投射されたアバタを通じて身体動作を伴った簡素な没入感を得ることが出来る。

2.3 システム構成

MR RobotPHONE の構成は以下のようになっている。今回、RUI としては IP RobotPHONE (イワヤ株式会社) を使用した。この IP RobotPHONE は上半身のみ自由度を有しており、頭が 2 自由度、腕が各 2 自由度の合計 6 自由度の小型人型ロボットである。頭・腕パーツはサーボモータが搭載されており、各パーツにおける関節角度の取得と関節の動作が可能となっている。また、USB によって PC に接続されるため気軽に使用することができ、ロボット自体にスピーカーとマイクが内蔵されており、音声伝達も可能なハードウェア構成となっている。

IP RobotPHONE の制御には、現在設計が進められている RUI ライブラリを用いている[20]。RUI ライブラリは、C++やC#, BASIC, JAVA などに加え Macromedia 社の Director や Flash などマルチメディアオーサリング環境からも RUI を扱うことが可能である。また、OS に関して Windows だけでなく Linux などのマルチプラットフォームへの対応も進められている。

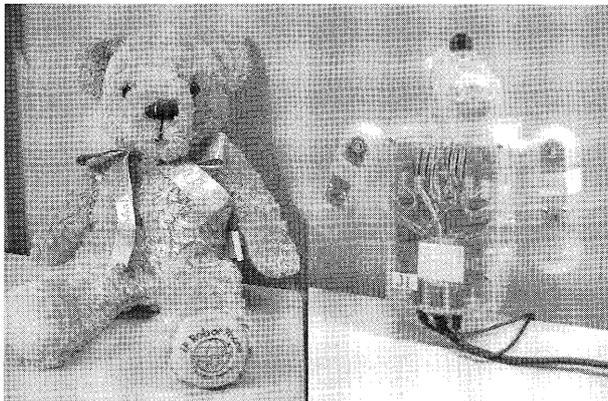


図3 IP RobotPHONE 左-外観 右-内部機構

Fig.3 IP RobotPHONE

カメラは USB カメラ (Creative 社 WCAMNBU) を使用した。RUI への内蔵方法としては、IP RobotPHONE の内部機構の頭部パーツ部分にカメラを固定し、外装である熊のぬいぐるみの鼻の箇所穴をあけ、そこからカメラレンズを出している。

MR RobotPHONE の寸法等の仕様は次の通りである。図4に示すように、腕・頭パーツ長さが 84mm、腕・

頭パーツの回転中心から先端までの長さが 70mm、体の幅が 80mm、両腕を広げた状態での右腕の先端から左腕の先端までの長さが 249mm となっている。重量や腕・頭パーツに用いられているサーボモータの減速比、操作に必要なトルク、提示可能トルクは表2のように求められた。

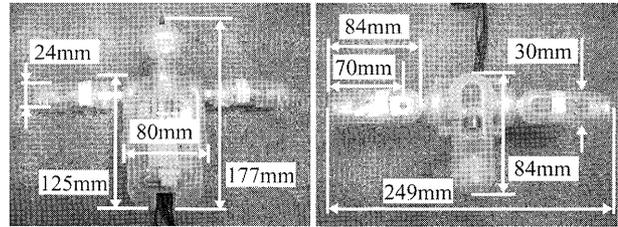


図4 MR RobotPHONE 内部機構寸法

Fig4 Size of MR RobotPHONE

表2 MR RobotPHONE の仕様

Table 2 Specification of MR RobotPHONE

重量 (全重量)	700 [g]
重量 (内部機構+カメラ)	520 [g]
腕・頭パーツのサーボモータの減速比	69 分の 1
操作に必要なトルク	2.0 [mN・m]
提示可能な最大トルク	190 [mN・m]

これらの結果、MR RobotPHONE は大人から子供まで手で持ちながら操作可能な重量かつバックドライブビリティを有するインタフェースであると考えられる。

今回使用する MR RobotPHONE での力覚提示方法としては、ロボットの腕や頭が回転することで操作者に対する提示を行う。このため、ロボットの胴体に対して MR 世界の物体が衝突するといった際の、ロボット自体の並進・回転運動が必要な力覚提示は行えず、ロボットで MR 世界の物体に触れたり、運ぶといったように、手を用いたインタラクションの際や、MR 世界で手や頭に対して作用が行われた場合に力覚提示を行うものとなっている。

3. MR RobotPHONE を用いたコミュニケーションシステム

3.1 システム設計

RobotPHONE を用いた場合でのコミュニケーション方法は、遠隔地にあるロボット同士の形状同期により、ユーザ同士がロボットの動作や音声通話を通じて、視覚・力覚・聴覚情報の伝達を行うものである。この時、ユーザが操作しているロボットは自身の身体像を投射

したアバタであり、もう一方の遠隔地にいるユーザのアバタでもあるという二つの役割を同時に果たしている。

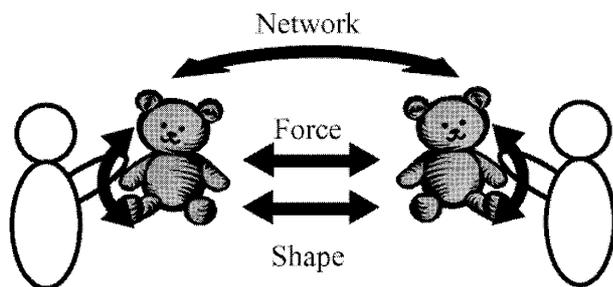


図5 RobotPHONE システム構成

Fig.5 System Configuration of RobotPHONE

これに対しMR RobotPHONE では、形状同期を行わせるものは実世界に存在するロボット同士ではなく、実世界のロボットとMR世界のCGアバタとで形状同期を行わせる。MR RobotPHONE を用いた遠隔地のユーザとコミュニケーションを行うためのシステムとして、以下のようなインタラクション方法が異なる2種類のシステムを用意した。

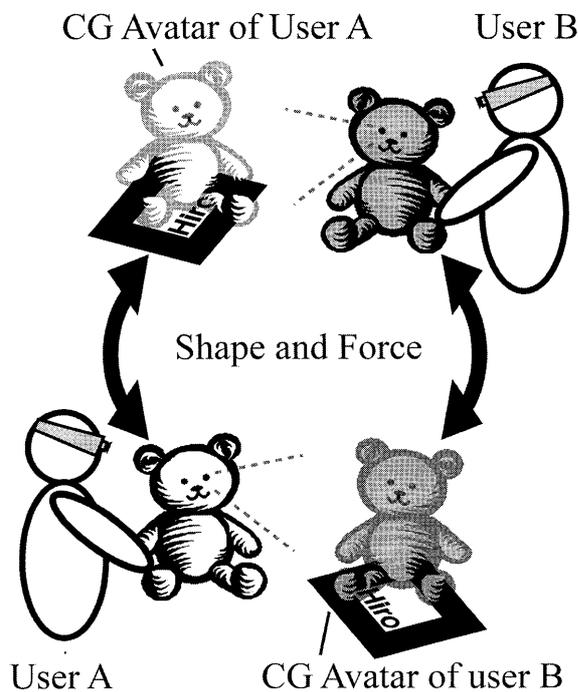


図6 MR RobotPHONE システム構成

(MR RobotPHONE—CG 間でのインタラクション)

Fig.6 System Configuration of MR RobotPHONE

(Interaction between MR RobotPHONE and CG)

一つ目として、図6に示すシステムが考えられる。このシステムは、ユーザが操作する実世界に存在する

ロボットとマーカー上に現れる遠隔地側のCGアバタとの間でインタラクションを行うシステムである。

説明のため遠隔地にいるユーザ2人をそれぞれユーザA、Bとし、各ユーザが操作しているMR RobotPHONEをRobotA、Bとする。

ユーザAがRobotA視点カメラを通じてマーカーを見ると、ARtoolkitによって生成されたCGアバタが見られる。このCGアバタはRobotBと形状同期が成されている。逆に、ユーザBがRobotB視点カメラを通じて見ることで出来るCGアバタはRobotAと形状同期が成されている。つまり、2人のユーザが操作しているMR RobotPHONEは、それぞれの遠隔地側ユーザが見ているCGアバタと形状同期が成されている。通常のRobotPHONEでは互いのRobotPHONEの動作が一体のロボットに混在していたが、このMR RobotPHONEのシステムを用いることでロボットの動作を個別に分別して互いに伝達することが出来る。

また、この時のMR RobotPHONE視点カメラの画像には、図7の画像の手前側に見られるように、MR RobotPHONEの両腕の動きと同期した、腕のCGモデルを表示している。ユーザはそのMR RobotPHONEの腕のCGモデルで遠隔地のユーザのCGアバタに対して近づいて触れることで、遠隔地ユーザ間において互いに力覚情報を伝達することが可能である。

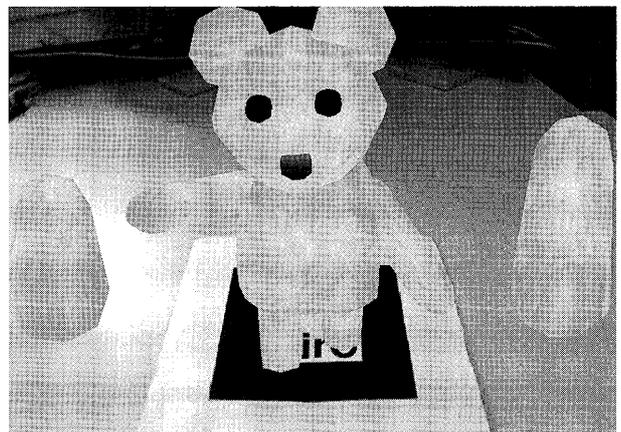


図7 CGアバタとのインタラクション

Fig.7 Interaction with CG Avatar in Robot's Camera View

この提案するシステムにおいては、ユーザは手で抱えているMR RobotPHONEをユーザ自身の分身として操作する。分身として扱うため、MR RobotPHONE自体を直接CGアバタに近づかせて触れるといった際に、ユーザ本人が直接CGアバタに触れるという感覚提示が可能となる。つまり、このシステムでは人型のロボットを用いることで、直感的な入出力や直接的なイン

タラクションを伴うコミュニケーションを可能とする。

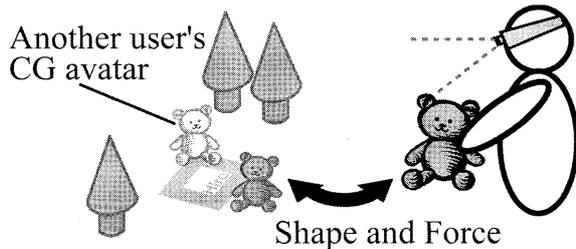


図8 MR RobotPHONE システム構成
(CG-CG 間でのインタラクション)

Fig.8 System Configuration of MR RobotPHONE
(Interaction between CG and CG)

もう一つのシステムとしては図8に示すコミュニケーションシステムが考えられる。これは、ユーザ視点カメラにおいてマーカを認識すると、その認識したマーカに従った情報世界がマーカ上に構築される。その情報世界内にユーザが操作する MR RobotPHONE と形状同期がなされた CG アバタや、遠隔地ユーザが操作する MR RobotPHONE に対応する CG アバタ、その他の CG オブジェクトが存在する。ユーザは手で持っている MR RobotPHONE を操作し、情報世界内の CG アバタを通じて遠隔地ユーザの CG アバタや、その他の CG オブジェクトに対してインタラクションを行うことで、力覚情報の伝達やジェスチャを用いたコミュニケーションを可能とする。つまり、このシステムは情報世界内において CG アバタや CG オブジェクト間でインタラクションを行うものである。

このシステムでユーザに提示される画像情報としては、ユーザ視点カメラによる画像と、情報世界内の CG アバタ視点での画像の2種類を、ユーザが自由に選択することが出来る。ユーザ視点での画像では、ユーザが自身の身体像を投射した CG アバタを Exocentric な視点で操作することができ、CG アバタ視点では Egocentric な視点で操作することができる。Egocentric な視点において操作者は、自身のアバタ視点での視覚情報を得られるだけでなく、身体性を有したインタフェースによる身体動作を利用した移動や、力覚を伴う情報世界へのインタラクションが可能である。この点で、ユーザがディスプレイや HMD 等による視覚情報のみを用いて情報世界とインタラクションを行うシステムと比べ、情報世界に対する没入感はより高く得られると考えられる。

ユーザが CG アバタを用いてインタラクションを行うことが可能な対象は、遠隔地ユーザの CG アバタのみではなく、情報世界に設置されているオブジェクト

も含む。情報世界内のオブジェクトは、各オブジェクトに対応するマーカを用意し、それらマーカをユーザが交換・配置することで変更が可能であり、変更後の情報世界の環境を遠隔地のユーザと共有することが出来る。また、自身の CG アバタの色や形なども対応するマーカにより変更可能である。

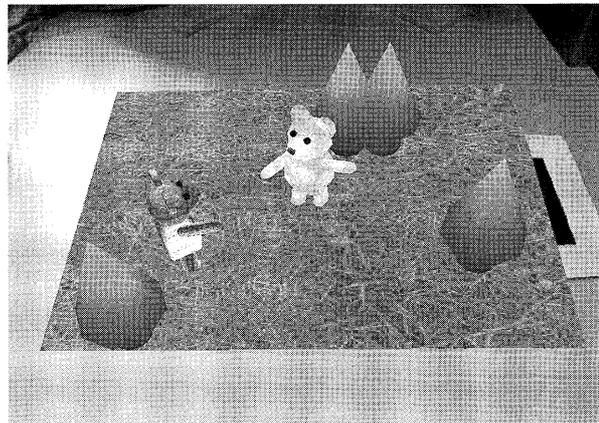


図9 Exocentric 視点でのインタラクション
Fig.9 Interaction in Exocentric View

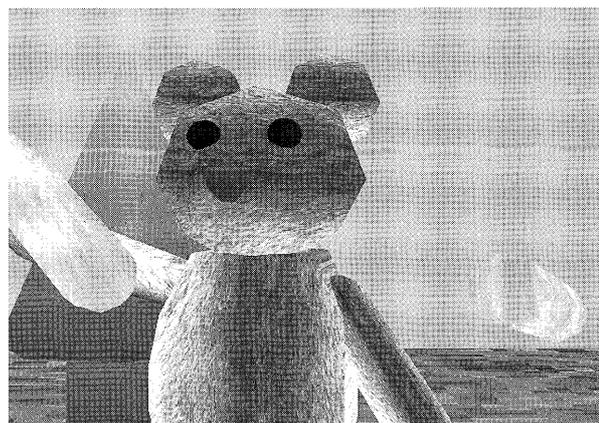


図10 Egocentric 視点でのインタラクション
Fig.10 Interaction in Egocentric View

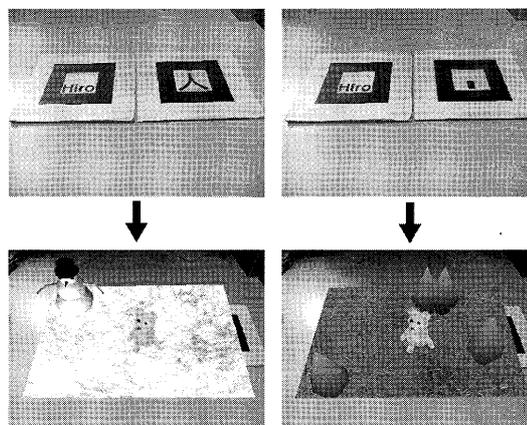


図11 マーカを用いた情報世界環境の構築
Fig.11 Construction of information world environment
with marker

また、RobotPHONE におけるコミュニケーションは 1対1のものであったが、このシステムでは、対応する CG アバタを情報世界内に増やすことで、複数人の間での CG アバタを用いた視覚・力覚・聴覚を用いたコミュニケーションが可能となる。

情報世界内における CG アバタの移動方法としては、ロボットの頭を一定速度以上で前後に揺らすと CG アバタが前方に歩行を行うものとした。ロボットという身体性を有したインタフェースを用いていることから人間の足を前後に動かすという歩行動作を模倣すべきである。しかし、今回使用した IP RobotPHONE は上半身のみの自由度を有したロボットであり、下半身の自由度は0である。そこで、IP RobotPHONE と同様に下半身に自由度を持たず身体性を有したものとしてハンドパペット（手袋型人形）に着目した。このハンドパペットを用いた人形劇などでは、その移動表現として、人形を上下に揺らすか頭を前後に揺らしながら動かすという方法が用いられている。このハンドパペットの移動の表現と、人が現実世界で力覚的なインタラクションを行う場合は主に手を用いるということを踏まえ、今回はロボットの頭の自由度を利用した移動手段を用いた。そして、CG アバタの旋回動作には、MR RobotPHONE の頭を体の正面方向から左右方向へ一定角度以上一定時間以上曲げることで左右へ CG アバタが旋回するという方法を用いた。

情報空間内においてインタラクションを行うこのシステムでは、ユーザは人型ロボットである MR RobotPHONE を用いて直感的に情報空間内の CG アバタの操作を行い、遠隔地ユーザとのインタラクションを行う。このシステムでは、ユーザにとっては間接的なインタラクションとなるが、遠隔地ユーザの CG アバタに対してだけでなく、情報世界内のその他の CG オブジェクトに対してのインタラクションも伴うコミュニケーションを可能とする。

3.2 検証

実装した MR RobotPHONE を用いた二つのコミュニケーションシステムを、図 5 にある通常の RobotPHONE を用いたコミュニケーションシステムの経験がある 20 代男子 4 名に体験してもらった。

体験した被験者からは次のような意見を得た。

MR RobotPHONE と CG アバタ間でインタラクションを行うシステムに関しては、RobotPHONE でのコミュニケーションでは、手で持って操作しているロボットで自分の動作の入力を行うが、同時にそのロボットは相手の動きの出力も行うため、自分と相手が同時に

動かした場合に相手側の動作が妨げとなり、自分の動きが伝えにくい。MR RobotPHONE では入力と出力が分離しており、お互いの動作を自由に伝達することが可能であるため、ジェスチャを用いたコミュニケーションは行いやすい。しかし、力の伝達に関しては MR RobotPHONE では CG アバタに近づいて触れた時のみ提示されるため、相手が近づいて触れているのかが分からず、提示のタイミングが分かりづらい。というものであった。

情報空間内において CG アバタ同士でインタラクションを行うシステムに関しては、俯瞰視点での操作が可能であるため、お互いの CG アバタとの位置関係が分かりやすい。しかし、CG アバタの移動に頭の自由度を用いているため、首を左右に振る、上下に傾く、といったジェスチャが行えない。また、移動手段としてはやはり足を前後に振るといった動作を用いた方が直感的である、といった意見があった。

これらの意見より、MR RobotPHONE では、直感的な入出力を利用した互いの動作の伝達手段においての有効性があると考えられる。また、MR RobotPHONE と CG アバタ間でのインタラクションを用いたシステムでは、互いの位置関係の提示が可能となるようなシステムへの改良が必要であると考えられる。情報空間内での CG アバタ同士でのインタラクションを行うシステムにおいては、足関節を有するロボットを用いての検証が必要であると考えられる。

4. MR 世界へのインタラクションシステム

4.1 システム設計

MR RobotPHONE では、MR 世界への直感的なインタラクションが可能である。従来の MR 世界に対するインタラクションを行う手段としては、PC や PDA を用いる方法があるがこれらは直感的ではない。人の身体を用いた方法は直感的、直接的ではあるが、力覚的な情報を得ることは出来ない。力覚情報を得られるようにする場合には力覚提示装置をシステムに含める必要がある。これらに対して TUI を用いる方法は、人の身体を用いて実世界にある物体を利用するため、直感的な操作が可能となると共に、TUI 自体を持つ手に力覚情報が得られるという点で優れている。しかし、TUI がパドルの形状であれば、オブジェクトをすくい上げて移動させるといったように、MR 世界へのインタラクション方法が TUI の形状に制限されてしまう。この点においては、人の身体を用いてオブジェクトを操作する方法に対して直接性は劣る。

身体性を持ち、人の身体像を投射して操作可能である MR RobotPHONE を MR 世界へのインタフェースとして用いると、MR RobotPHONE の両手で MR 世界のオブジェクトを持ち上げて移動させるといった、人にとって直感的で直接的に、力覚情報を得られつつインタラクションを行うことが可能となる。更に、MR RobotPHONE の CG の腕に様々なツールを持たせることも可能であり、TUI のようにインタフェース自体の形状に制限されず、アプリケーションに対して汎用的に対応することが可能である。

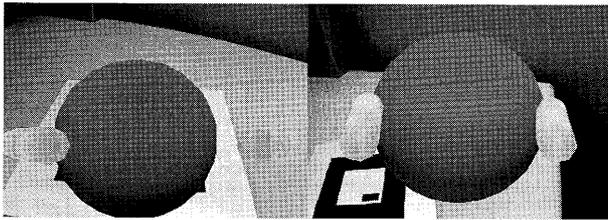


図 1 2 情報世界の物体への直感的インタラクション
Fig.12 Intuitive Interaction to Object in Information World

4.2 検証

実装した MR 世界へのインタラクションシステムを、MR RobotPHONE を用いたコミュニケーションシステムと同じ 20 代男子の被験者 4 名に体験してもらった。体験の内容としては、図 1 2 のように MR RobotPHONE に内蔵したカメラ視点で、マーカー上に存在する球体を MR RobotPHONE の両手を用いて挟んで持ち上げ、その後マーカー上に戻すというものである。

被験者の意見としては、人型の MR RobotPHONE の両手を手で持って操作しているため、MR RobotPHONE の手で球体を挟むという動作の際、自分の手で直接挟んで持ち上げるという感覚を得ることが出来る、というものであった。このことから、MR 世界への直感的なインタラクション方法として、本システムは有効であると考えられる。

しかし、被験者の体験の様子を観察すると、MR RobotPHONE の両手で球体を挟もうとする時に、球体との距離感覚をうまく掴めずに球体を両手で挟めない様子が見られた。これは、MR RobotPHONE に内蔵されているカメラは一つであり、また、カメラから得られる画像の視野角などのパラメータ、MR RobotPHONE の腕の長さといったものが、人と異なるものであったため生じた問題だと考えられる。

この問題に対しては MR RobotPHONE に 2 台のカメラを内蔵させ、ユーザに対してのステレオ画像の提示

や、MR RobotPHONE の腕の長さの調節といったことが必要であると考えられる。

5. RUI に対する視覚情報重畳システム

5.1 システム設計

MR RobotPHONE の基本システムは、実世界のロボットと、MR 世界に存在する同形状の CG モデルとで形状同期を行わせるものである。この MR RobotPHONE のシステムは次のようなシステムへの利用も考えられる。

今までの RUI では、身体性をより強く持たせるために、内部機構に対して外装として人の身体形状に似た縫いぐるみを着せるという方法を用いている。そのため、ユーザが RUI の外観を変更したい場合は実際に RUI に着せるための縫いぐるみを用意しなければならない。しかし、MR RobotPHONE のシステムにおいて、マーカーを RUI の内部機構の表面上に用意する。そのマーカーをユーザ視点カメラで見ると、RUI の内部機構に重なるように CG モデルが表示される。この CG モデルは RUI と形状が同期されているため、RUI を操作しても CG モデルは常に内部機構に重なって手表示される。つまり、RUI の内部機構に対して CG のきぐるみを着させるということが可能となる。これにより、ユーザが好みの CG モデルと対応マーカーを用意することで、RUI の外観の変更を容易に行うことが出来る。

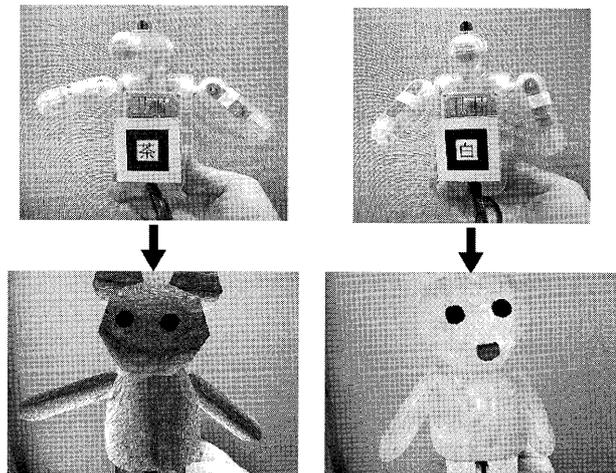


図 1 3 RUI に対する視覚情報の重畳
Fig.13 Overlay of Visual Information to RUI

また、拡張現実感システムにおいては実世界と情報世界との幾何学的整合性が重要であり、位置関係の欠如はユーザに違和感を与える要因となる[21]。通常のカメラ画像を取得して CG 画像をオーバーレイする拡張現実感システムにおいては、前後関係の整合性に関

する問題が生じる。これはカメラから得られた画像には奥行き情報が含まれないためであり、オーバーレイされた情報世界の CG オブジェクトに対してユーザが手や体を使ってインタラクションを行う際には、実世界の手や体に対する奥行き情報が無いため、本来は CG の奥に在るべき手が CG の手前に見えてしまうといった遮蔽問題が発生する。

この問題に対して MR RobotPHONE のシステムを用いると、ユーザは情報世界の CG オブジェクトに対して実世界に存在する MR RobotPHONE を用いてインタラクションを行うことになるが、この時、MR RobotPHONE のマーカーを用いて CG 画像を重畳することで、MR RobotPHONE の機構部を CG で隠すと同時に、マーカーによってカメラ画像内での奥行き情報を得ることが出来る。これより、MR RobotPHONE を持っているユーザの手に関する遮蔽問題は残るものの、CG オブジェクトに接触する MR RobotPHONE の手と CG 画像との間の遮蔽問題は容易に解決できると考えられる。

RUI に対して CG のきぐるみを着せると言えるこのシステムのロボット分野における応用例として、ロボットの外装デザインの面で役に立つのではないかと考えられる。ロボットが人にとって身近なものになるにつれ、ロボットの外観の作業環境への適応状況や、外観が人に対して及ぼす心理的影響などが考慮されるようになり、外装デザインの重要性が増している。ロボットの製作過程では、デザインはまず 2 次元の図面におこされ、その後、3D シミュレーションやモックアップを製作してデザインの検討を行う。このデザインを検討する過程において、簡素な骨格部分とロボットの外装の CG モデルを用意し、MR RobotPHONE のシステムを利用して骨格部に対して形状が同期した CG モデルを重畳する。実際の模型に比べるとリアルさは損なわれるものの、CG モデルを変更するだけで容易に様々な外装デザインの検討が可能となる。また、ロボットが静止した状態だけでなく、実際に稼働させた場合におけるロボットの動作とデザインの兼ね合いといった点に関する検討も可能となる。

5.2 実験

提案した RUI に対する視覚情報重畳システムを実装したところ、図 1 4 のように実際の RUI と RUI に重ね合わせた CG モデルの表示との間にずれが生じることがあった。

ずれが生じた要因は本システムの処理の流れにある。処理の流れとしては、まずカメラからの画像を取得し、

画像内のマーカーを検出すると、その位置計測等のマーカー関連の処理を行い、その後マーカー上に CG モデルをオーバーレイしたものを画面に表示する。CG モデルの関節角度は、最終的に描画が行われる直前に RUI から取得している。取得したカメラ画像から最終的な描画までに若干の時間が経過してしまうことで、過去の画像に対して描画直前の RUI と同期が成された CG モデルが重畳されることになりずれが生じた。

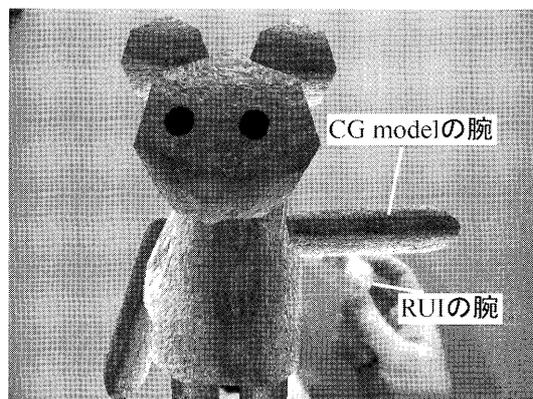


図 1 4 RUI と CG モデルとのずれ
Fig.14 Gap between RUI and CG model

RUI と CG モデルの表示のずれを無くすためには、カメラから画像を取得すると同時に RUI から関節角度情報を取得し、その関節角度に従った CG モデルを重ね合わせるという手段がある。しかし、この手段はリアルタイム性を損ねてしまい、ユーザが操作時に違和感を覚える可能性がある。

リアルタイムに CG モデルと RUI とで形状同期を行わせながらずれを生じさせない手段としては、CG モデルを実際の RUI よりもある程度拡大して重ねる、という方法が考えられる。CG モデルを拡大することで、実際はずれている RUI を CG モデルで隠すという手段である。しかしこの手段も、CG モデルの拡大にも限度があり、RUI の腕のある一定速度以上に早く動かしてしまうと、CG モデルで RUI を隠しきれずにずれが生じてしまう。これより、実際の RUI に対する CG モデルの拡大率や、RUI の腕の角速度、カメラ画像取得から描画までの時間には相関性があると考えられる。

図 1 5 は、RUI の腕を水平方向から上方向へ回転した場合に、拡大した CG モデルの腕によって遅延画像内の RUI の腕が隠れており、これ以上 CG モデルの腕が回転していると RUI の腕が見えてしまう、という状況を表したものである。RUI の腕の幅が a 、CG モデルの腕の幅が b 、RUI の腕の回転中心から先端までの長さが r 、腕の回転の角速度が ω 、CG モデルの腕の回転角度が θ となっている。

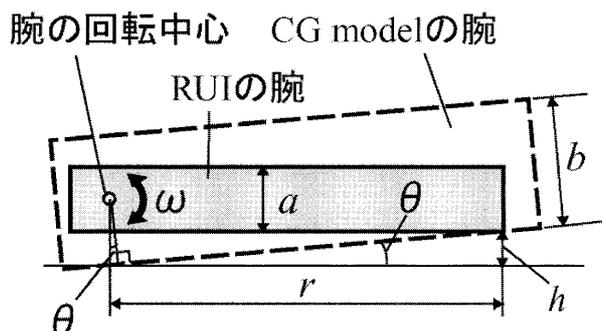


図15 RUIとCGモデルの遮蔽関係

Fig.15 Cover relation between RUI and CG model

また、カメラ画像取得から描画にかかる時間を dt 、RUIの腕の幅に対するCGモデルの腕の幅の拡大率を s とする。この時成り立つ関係式は以下ようになる。

$$r \tan(\theta) = \frac{b}{2 \cos(\theta)} - \frac{a}{2} \quad (1)$$

$$\theta = \omega \times dt \quad (2)$$

$$b = a \times s \quad (3)$$

式(1)~(3)より、CGモデルが遅延画像内のRUIの腕を隠すことの出来る条件式は式(4)ようになる。

$$2r \sin(\omega dt) + a \cos(\omega dt) \leq as \quad (4)$$

実装したシステムにおいて dt を求め、その値を元にCGモデルの拡大率 s と許容可能な最大の角速度 ω を設定する実験を行った。実験に用いたPCの仕様は、CPU: Pentium M 1.5GHZ, メモリ: 768MB, グラフィックアクセラレータ: ATI Mobility Radeon 9600, であり、USBカメラは 640×480 のカラー画像を 30fps でキャプチャを行うように指示をした。この結果 $dt = 29.5$ [ms] という値が得られた。また、システム実行時のカメラのキャプチャのフレームレートは平均 21~22[fps], 描画のフレームレートは平均 24~25[fps] であった。RUIに用いたIP RobotPHONEの腕の幅 a は 30[mm], RUIの腕の回転中心から先端までの長さ r は 70[mm] であり、これらの値を用いて、本システムにおける拡大率 s と角速度 ω の最大値の関係を求めると表3のようになる。

表3 拡大率 s と角速度 ω の関係Table 3 Relation between enlargement rate s and angular velocity ω

s	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
ω [rad/s]	0.0	1.46	2.93	4.43	5.95	7.50

RUIで行うタスクによって、人が入力時にRUIの腕を動かす速度や、出力時にRUI自身が動作する速度に対して要求される値は異なる。この要求される速度に応じてCGモデルの拡大率を設定すればよく、逆に、CGモデルのサイズが先に要求される場合は、そのサイズに応じた速度以下で関節が動くように制御を行うことで、RUIの腕に対して常にCGモデルを重ね合わせて表示することが可能である。

6. まとめ

本研究では、RUIを遠隔地のユーザ同士でのコミュニケーションに利用したRobotPHONEのシステムに対して、MR技術を付加したMR RobotPHONEシステムを提案した。

MR技術としてARtoolkitを用い、通常のMR技術で用いられるようなユーザ視点のカメラだけでなく、インタフェースであるロボット自身にカメラを内蔵することで、ロボット視点でのインタラクションも可能とするシステムを提案した。これら二つのカメラによる異なる視点や、身体性を有したロボットに対して自己の身体像の投射を利用することで、Egocentricな視点やExocentricな視点でのMR世界を通じた遠隔地のユーザ同士のコミュニケーションシステム的设计を行った。また、MR RobotPHONEを使用することで、MR世界に対して身体動作を用いた直接的・直感的な入力を行い、力覚を伴う出力も得られるインタラクションシステムを設計した。最後に、MR世界を通じたコミュニケーションやMR世界へのインタラクションシステム以外への応用例として、ロボットの外装としてCGのきぐるみを重畳して表示させるシステムの提案を行い、そのシステムにおいて画像処理にかかる時間とRUIに対するCGモデルの大きさ、RUIの関節動作速度の関連性を求め、各パラメータの設定方法を検証した。

本論文では、提案するMR技術を付加したMR RobotPHONEシステムにおいて、MR RobotPHONEを用いたコミュニケーションシステム、MR世界へのインタラクションシステムに関して、実際に被験者に体験してもらうことで有用性の検証を行った。また、RUIに対する視覚情報重畳システムに関しては、CGモデルをRUIに重ね合わせてずれの内容に表示させるための実験を行った。しかし、提案するシステムの有用性に関する検証はまだ不十分であり、今後は、今回得られた被験者の意見を基にしたシステムの改良や検証実験を引き続き行っていく予定である。

RUIにカメラを内蔵することで、操作者の身体像の

みではなく視覚をもインタフェースに対して投射することが可能となった。インタフェース自身が外界を認識することが可能になることで、様々な分野においてカメラを内蔵したRUIは応用できるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] Ishii, H. and Ullmer, B, Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, Proceedings of CHI '97, pp.234-241, ACM Press, 1997.
- [2] Jun Rekimoto, NaviCam: A Magnifying Glass Approach to Augmented Reality Systems, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4 pp.399-412, MIT Press, 1997.
- [3] M. Fujita and H. Kitano. Development of an Autonomous Quadruped Robot for Robot Entertainment, Autonomous Robots vol.5, pp.7-8, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [4] 岡田美智雄, 三嶋博之, 佐々木正人編, bit 別冊: 身体性とコンピュータ, 共立出版, 2000.
- [5] 関口大陸, 稲見昌彦, 舘 暲, オブジェクト指向型レイグジスタンスによるロボティックユーザインタフェース -形状共有システムの提案と試験的実装-, インタラクティブシステムとソフトウェア VIII: 日本ソフトウェア科学会 WISS 2000, 近代科学社, pp. 51-56, 2000.
- [6] 稲見昌彦, 関口大陸, 川上直樹, 舘 暲, RobotPHONE による物体共有型コミュニケーション, 第 95 回ヒューマンインタフェース研究会論文集, 2001.
- [7] Milgram, P. and F. Kishino, A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Trans, on Information Systems, Vol.E77-D, No.12, pp.1321-1329, 1994.
- [8] A. State, M. A. Livingston, W. F. Garrett, G. Hirota, M. C. Whitton, E. D. Pisano, and H. Fuchs, Technologies for Augmented Reality Systems: Realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies, Proceedings of SIGGRAPH 96, 1996.
- [9] Feiner, S., MacIntyre, B., and Seligmann, D. , Knowledge-Based Augmented Reality, Communications of the ACM, Vol. 36, No.7, pp. 53-62, 1993.
- [10] Y. Okuno, H. Kakuta, and T Takayama, Jellyfish Party: Blowing Soap Bubbles in Mixed Reality Space, Proceedings of ISMAR03, pp.358-359, 2003.
- [11] H. Kato and M. Billinghurst, Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. IEEE International Workshop on Augmented Reality, pp. 85-94, 1999.
- [12] M.P. Johnson, A. Wilson, B. Blumberg, C. Kline, and A. Bobick, Sympathetic Interfaces: Using Plush Toys to Direct Synthetic Characters", Proceedings of CHI99, pp. 152-158, 1999.
- [13] Thomas H. Massie, J. K. Salisbury: The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, IL, Nov. 1994.
- [14] 佐藤誠, 平田幸広, 川原田弘, 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌 D- II, J74-D- II-7, pp887-894, 1992.
- [15] 清水紀芳, 小泉直也, 杉本麻樹, 新居英明, 関口大陸, 稲見昌彦, 保持型ロボティックユーザインタフェースの研究, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.17, No.2, pp.212-221, 2005.
- [16] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, and K. Tachibana, Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.111-119, 2000.
- [17] Wagner, D., Pintaric, T., Ledermann, F., Schmalstieg, D., Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld Devices, Proceedings of the Third International Conference on Pervasive Computing, 2005.
- [18] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and Defanti, T. A., Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality, Proceedings of SIGGRAPH'93, pp.135-142, 1993
- [19] 山田俊郎, 棚橋英樹, 小木哲郎, 廣瀬通孝, 完全没入型 6 面ディスプレイ COSMOS の開発と空間ナビゲーションにおける効果, 日本バーチャルリアリティ学論誌, Vol.4, No.3, pp.531-538, 1999.
- [20] 関口大陸, 稲見昌彦, 舘 暲, RobotPHONE の開発 (第 5 報) -RUI ライブラリの設計, SICE SI 部門講演会 SI2004, 2004.
- [21] 田村秀行, 大田友一, 複合現実感, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.266-272, 1998.

[22] 舘 暲, ロボット入門, 筑摩書房, 2002.

[23] 舘 暲, バーチャルリアリティ入門, 筑摩書房, 2002.

(2006年1月4日受付)

[著者紹介]

清水 紀芳

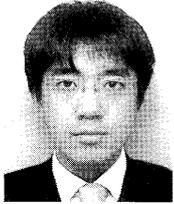
(学生会員)



2004年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業. 2006年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻修了. 同年, 同大学大学院電気通信学研究科博士後期課程知能機械工学専攻に入学, 現在に至る. ヒューマンインタフェースに関する研究に従事. 日本学術振興会特別研究員, 日本バーチャルリアリティ学会学生会員.

中村 俊成

(学生会員)



2006年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業. 現在, 同大学大学院電気通信学研究科博士前期課程知能機械工学専攻在籍. 画像提示装置を用いた計測の研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会学生会員.

関口 大陸

(正会員)



2001年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 博士(工学). 同年より科学技術振興事業団研究員. 2002年から2006年3月まで東京大学大学院情報理工学系研究科 助手として勤務. 現在は株式会社 ビュープラスに所属. ネットワークロボティクスおよびトレイグジスタンスに関する研究に従事.

杉本 麻樹

(学生会員)



2000年千葉工業大学工学部電子工学科卒業. 2002年同大学大学院工学研究科博士前期課程情報工学専攻修了. 同年から2003年まで科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業「協調と制御」領域グループメンバー. 2003年10月から電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻. 主に非言語情報を利用したヒューマンインタフェースに関する研究に従事. 日本学術振興会特別研究員, 日本バーチャルリアリティ学会会員.

新居 英明

(学生会員)



1993年東京工業大学制御工学科卒業. 1995年同大学大学院理工学研究科博士課程前期課程制御工学専攻修了. 同年(株)トキメック入社. 2003年4月同社退社後(株)テックエキスパーツ入社. 2003年10月電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻に入学, 現在に至る. 主に光を利用した通信やヒューマンインタフェースに関する研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会学生会員.

稲見 昌彦

(正会員)



1999年東京大学大学院工学研究科博士課程修了. 博士(工学). 東京大学リサーチ・アソシエイト, 同大学助手, 電気通信大学講師, 同大学助教授, マサチューセッツ工科大学コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者を経て, '06年4月より電気通信大学知能機械工学科教授. 科学技術振興機構さきがけ研究者を兼任. 複合現実感, ロボットなどインタラクティブシステムに関する研究に従事. 日本VR学会学術奨励賞, 論文賞, IEEE Virtual Reality Best Paper Award, 米「TIME」誌 Coolest Inventions など各賞授賞. 本学会, ヒューマンインタフェース学会等会員.