

モバイルディスプレイを用いた 直感的なヒューマン・ロボット・インタラクションの提案

細井一弘[†] ダオヴィンニン[†]
森晶洋[†] 杉本雅則[†]

本稿では掃除ロボットのように人間とのインタラクション機能を持たない単機能ロボットを人間が直感的かつ簡単に操作できる操作手法“Mobile Display based Manipulation”を提案する。Mobile Display based Manipulation は、シースルー型のディスプレイを用いてディスプレイ自体を動かすことでロボットを操作する手法である。本稿では提案手法の実装例として、ハンドヘルドディスプレイとプロジェクションディスプレイをそれぞれ用いた2つのロボットナビゲーションシステムについて紹介し、システムの考察から提案手法の可能性について議論する。

Mobile Display Based Manipulation for Human-Robot Interaction

KAZUHIRO HOSOI,[†] VINH NINH DAO,[†] AKIHIRO MORI[†]
and MASANORI SUGIMOTO[†]

In this paper, we propose the *Mobile Display based Manipulation* for simple robot control. By capturing images of robots and moving a mobile display, a user can easily and intuitively manipulate the simple robots such as cleaning robots. For demonstrating our approach, we developed two prototype systems using a *handheld display* and a *projected display*. The preliminary user studies indicated that the proposed technique worked well for supporting users' intuitive manipulation. This paper also describes several issues to be solved in the future work.

1. はじめに

ネットワークロボット³⁾や環境知能化⁹⁾の研究により、ロボット単体を知的で高機能にするのではなく、環境全体と組み合わさることで人間にサービスを提供するロボットの提案がされている。このようなロボットは、アクチュエータ、センサなどが分散配置される。実際に作業を行うアクチュエータのロボットには、自己の移動や特定の作業のみを行えば良いので、人間とのインタラクションを行う機能や指示を理解する機能は持っていない。たとえば、部屋の掃除を行う掃除ロボットや、自走可能なイスやテーブルなどの家具である(図1参照)。本稿ではこのようなロボットを単機能ロボットと呼ぶ。

単機能ロボットは環境中のセンサなどと協調するこ

とで、人間に高度なサービスを提供することが可能である。基本的にはロボットは人間からの簡単な指示により自律して作業を行うが、状況に応じて人間が直接操作を行いたい場合もある。例えば、掃除ロボットに特定の箇所だけを掃除させたい場合や、自走可能な家具を特定の位置に正確に移動させたい場合などがある。しかし、環境中のセンサが常に人間の指示を把握するためには、空間内に死角が生まれないように多数のセンサを配置し、オクルージョンの問題にも対処する必要がある。さらに環境中に多数のカメラを設置する場合には、ユーザのプライバシーの問題も発生する。また、Roomba⁶⁾のような掃除ロボットはプログラムされた行動を実行することで、知能化された環境外でも作業を行うことが可能であるが、人間からの指示に逐次対応することはできない。

以上のことから、我々は単機能ロボットを簡単かつ直感的に直接操作するためのモバイルインターフェースが必要であると考え。従来の遠隔操作支援システムなどで利用されるジョイスティックを用いたインターフェースではなく、ロボットの操作に慣れていな

[†] 東京大学大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, University of
Tokyo

^{††} 東京大学工学部
School of Engineering, University of Tokyo

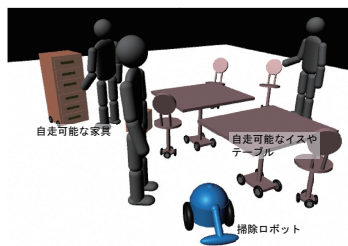


図 1 単機能ロボット
Fig. 1 Simple robot

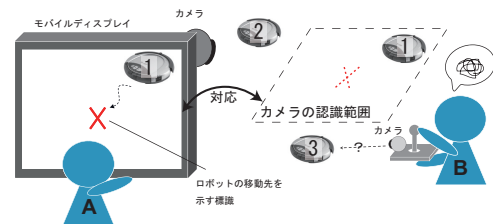


図 2 Mobile Display based Manipulation によるロボット操作の例
Fig. 2 A example of robot control by 'Mobile Display based Manipulation'

い人でも、日常生活の中で簡単にロボットを操作できるインターフェースが必要である。

本稿では、この目的のため単機能ロボットを直感的に操作できる操作手法として Mobile Display based Manipulation を提案する。提案手法は Augmented Reality 技術によりロボットと指示情報とを重ね合わせ、ユーザはそれを見ながらモバイルディスプレイ自体を動かすことでロボットを操作する手法である。モバイルディスプレイの動きにより仮想世界を操作する研究⁸⁾とは異なり、モバイルディスプレイの動きを現実世界のロボットの操作に利用する。また、従来のモバイルデバイスを用いた Augmented Reality システムとは異なり、現実世界に情報を付加するだけでなく、仮想世界の情報に従って現実世界のロボットの状態を変化させるという点で大きく異なる。ディスプレイ上の指示情報を逐次変更するのではなく、ディスプレイ自体を動かすことでロボットと指示情報との相対的な位置関係を変化させることで簡単にロボットを操作できる点が本手法の特徴である。

本稿では提案手法である Mobile Display based Manipulation の特徴を述べ、その考えに基づき開発された2つのシステムについて紹介する。2つのシステムは、それぞれ異なった種類のディスプレイを用いて実装を行った。実装したシステムは、ハンドヘルドディスプレイを用いたロボットナビゲーションシステム：Shepherd⁵⁾とプロジェクションディスプレイを用いたロボットナビゲーションシステム：CoGAME⁴⁾である。これらの実装例を基に Mobile Display based Manipulation の可能性を探るとともに、今後の課題について検討する。

2. Mobile Display based Manipulation

Mobile Display based Manipulation (MDM) とは、ディスプレイそのものを動かすことで、仮想世界の情報を基に現実世界を変化させる操作手法である。

携帯端末などの液晶ディスプレイに Augmented Reality の技術を用いて現実世界のロボットと仮想世界の情報（ロボットへの指示など）を重ね合わせてロボットを操作する。ディスプレイを動かすことで、二つの世界の位置関係が変化し、誰でも簡単かつ直感的にロボットへの指示を逐次変化させて操作することが可能である。Augmented Reality が、現実世界を仮想世界の情報を用いて補強するのに対し、我々の提案する手法は Augmented Reality の技術を用いて仮想世界の情報に従って現実世界の状態を変化させる。例えばロボットが移動していく経路を提示するのではなく、ロボットを移動させたい経路をユーザ側から提示し、それによってロボットをコントロールするのである。

例えば小型のビデオスルー型デバイス（液晶ディスプレイの裏にカメラが固定されているもの）を用いてロボットを操作することを考える（図2参照）。ディスプレイの中央には標識を固定表示しておく。このビデオスルー型デバイスを用いてロボットを撮影すると、ロボットは中央の標識に向かって移動を始める。ディスプレイ上で標識の位置とロボットが重なると、ロボットは停止する。ユーザがロボットを撮影中にビデオスルー型デバイスを動かすと、ロボットと標識との相対的な位置関係が変化する。従ってロボットは移動した標識に追従するように動作を変化させていく。この“ディスプレイを動かす”という操作を利用することで、仮想世界の情報をその都度変更しなくても、簡単にロボットをナビゲーションすることができる。

2.1 MDM の利点

MDM は次の特徴を持つ。

Augmented Reality による視覚的な情報の提示ロボットの状態や周辺の状況を可視化してディスプレイに表示することで、ユーザは視覚的にロボットの状態を把握することができる。また、ロボットに与えた命令とロボットを重ね合わせることでユーザが自分の

指示を確認できるとともに、その指示に従ってロボットが正しく動作しているかを確認することができる。

ディスプレイの指示によるユーザ視点の操作
インターフェースがロボットの状態を推定し、それにユーザの指示を対応付けてロボットを制御するので、ユーザはロボットの視点を考慮することなく、ユーザ視点でコントロールすることができる。特にロボットとユーザが対面している状況ではロボットとユーザとの左右や前後の対応は逆になるので混乱し易い。また、ロボットの向きが分かり難い円盤や円柱状にデザインされたロボットの中には、一目でロボットの前後左右を判断し難いものもある。インターフェースがロボットの状態を判断することで、ユーザの視点でロボットの指示を与えることができるので、誰でも簡単に操作することが可能となる。

ディスプレイをフレームとしてとらえれば、ディスプレイの中にロボットを表示することで、そのロボットがコントロール可能であるか（インターフェースがロボットを認識しているか）をユーザが視覚的に判断することができる。図2のユーザBのようにディスプレイに表示せずにセンサとジョイスティックなどの入力インターフェースとの組み合わせのみでユーザ視点の操作を実現することもできるが、ロボットがセンサの認識範囲内にいるかを判断できないので、操作し難くなる。また、ロボットやインターフェースにランプを設置し、点滅により認識の有無を知らせる場合と比べて、認識範囲の境界を視覚的に提示することができる。

ディスプレイの中に複数のロボットを捕らえることで、任意の状態のロボットを同時に操作することができる。例えば複数の自走可能なイスをディスプレイに表示された配置に従って同時に並べるとも可能であると考えられる。複数の中からひとつだけを移動させたいときは、カメラ（もしくはセンサ）のズーム機能などにより、ロボットの認識範囲を変化させることで特定のものだけを操作することができる。また、あらかじめディスプレイ上で操作したいロボットだけを選択することも可能である。

音声やコマンド入力などによりロボットに直接指示する手法と比較した場合、これらの手法では「右へ移動」「前へ移動」などの表現しやすい方向への指示には対応できても、曖昧な方向や特徴のない場所へ移動を指示するには複雑な命令を行う必要がある。それに対して我々の提案するMDMでは、ディスプレイに表示された標識を移動させたい場所や方向に一致するようにディスプレイ自体を動かすことで簡単に指示する



図3 ハンドヘルドプロジェクタを用いたロボット操作の視覚化
Fig. 3 Visualizing manipulations of robots using a handheld projector

ことができる。

ディスプレイ自体を動かすことによる直感的な操作
ディスプレイ上に移動先や移動方向を表示してロボットを制御するので、ロボットの種類によらず操作方法が統一される。ユーザは事前に表示する標識を決めておき、ロボットの移動に合わせてディスプレイを動かすだけで簡単に操作ができる。全方向移動型ロボットと車輪型ロボットをジョイスティックを使って移動させる場合、前者はジョイスティックを右に入力し続ければ右方向に移動可能だが、後者は右方向への直接移動ができないため、ジョイスティックの右入力を右回転に対応付けられている可能性がある。我々の提案するMDMでは、ロボットの行動中あるいは行動後の状態を指定することで、アクチュエータの機構によらず統一的に操作することができる。

任意の場所で利用可能

MDMでは、インターフェースがロボットの状態を認識するので、環境やロボットにセンサを追加する必要がない。ロボットとの通信を確立すれば、様々な形態のロボットをどこでも操作することが可能である。また、ユーザが保持・装着するインターフェースがロボットを認識するので、ロボットや環境のセンサの認識範囲を考えずに（インターフェースがロボットを認識できる範囲なら）任意の方向からロボットを操作することが可能である。

ロボット操作の共有

ディスプレイに操作命令を表示することで、操作しているユーザ以外の人にもロボットへの命令を確認できる。さらにハンドヘルドプロジェクタから投影される投影画面を“モバイルディスプレイ”として用いれば、より多くの人と操作を共有することができる。この方法を用いればロボットを利用した教育やエンターテインメントへの応用に効果的であると考えられる。

2.2 モバイルディスプレイの種類

MDM を実現するモバイルディスプレイは、現実世界と仮想世界を融合する位置により下記のように分類できる。

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) シースルー型の HMD を用いて、ユーザの目の前に現実世界の映像と仮想世界の情報を重ね合わせることで、広い視野を確保できる。頭部の動きがそのままディスプレイの動きになる。

ハンドヘルドディスプレイ カメラ付携帯電話やデジタルカメラなどのように、携帯端末等の液晶ディスプレイの背面にカメラを取り付けたビデオシースルー型のデバイスを用いる。手で携帯端末を動かすことでロボットを操作できる。

プロジェクションディスプレイ ハンドヘルドプロジェクタからロボット操作の標識となる画像を投影し、ハンドヘルドプロジェクタ自体を動かすことで投影画面 (プロジェクションディスプレイ) を動かすことができる。また、ハンドヘルドプロジェクタにセンサ (主にカメラ) を取り付け、ロボットの状態を認識する。

3. 実装例

本研究では、提案手法の MDM の可能性を探るべく、ハンドヘルドディスプレイを用いたシステム: Shepherd⁵⁾ とプロジェクションディスプレイを用いたシステム: CoGAME⁴⁾ の 2 つの異なるディスプレイを用いたシステムを実装した。

3.1 ハンドヘルドディスプレイを利用したロボット操作

ハンドヘルドディスプレイは、携帯電話や PDA など我々の身近に多数存在する。カメラ付携帯電話やデジタルカメラなどディスプレイとカメラが対になる形で配置されたデバイスが多く、また PDA やモバイル PC においては外部カメラを簡単に取り付けることができるので、ビデオシースルー型デバイスを簡単に作ることができる。そのため、ハンドヘルドディスプレイを用いた AR システムに関する研究¹²⁾⁷⁾¹⁹⁾ も数多く行われている。本稿では、ハンドヘルドディスプレイとしてモバイル PC を用いたナビゲーションシステムについて紹介する。

3.1.1 システム構成

システム構成は、図 4 のとおりである。主にカメラ、PC、ロボットとの通信装置からなる。実装にはモバイル PC として Sony, Vaio Type U を用いる。カメラには Vaio Type U 内蔵の背面カメラを利用し、

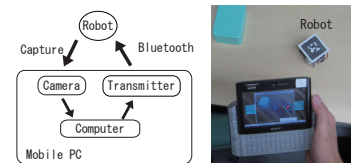


図 4 モバイル PC を用いた Shepherd のシステム構成
Fig. 4 System configuration of Shepherd

内蔵の Bluetooth によりロボットと通信を行う。ロボットには車輪移動ロボットを用いる。ロボットの認識にはあらかじめ形状を記録して、画像処理により認識する手法が考えられるが、認識処理を簡単にするため ARToolKitPlus¹⁸⁾ のマーカを上面に設置する。ARToolKitPlus により、カメラ画像内でのロボットの位置と方向が推定される。この位置と方向をディスプレイ上に表示されている標識 (移動先を示すマークなど) と比較して、その標識に従うように制御する信号をロボットに送信する。

3.1.2 操作方法

Shepherd を用いたロボットのナビゲーション方法は以下の通りである。ディスプレイ上には、図 5 のように移動先を示す点の標識が表示されており、ロボットはこの標識に向かって移動する。ユーザはモバイル PC のカメラでロボットを撮影する。撮影された映像はディスプレイに表示されるので、ロボットと標識との位置関係を確認しながら操作する。例えば、ロボットが標識と重なって静止した後にディスプレイを動かして、ロボットと標識を離して再びロボットを移動させたり、ロボットが標識に到達する前に少しずつロボットと標識の位置が離れるようにディスプレイを動かすなどの方法がある。また、ディスプレイに表示する標識は、図 5(b)(c) のように点の他に矢印や経路なども選択できる。これらの標識はスタイラスペンを用いて矢印の向きを変更したり、経路を自由に描いたりすることも可能である。しかしロボットを実際にナビゲーションするときは標識は変更しないで、ロボットの動きに合わせてディスプレイを回転・移動させる方が簡単な操作を実現できる。ディスプレイを動かしながら操作することで、狭いディスプレイの中に限らず広範囲にわたってロボットを移動させることができる。

3.2 プロジェクションディスプレイを利用したロボット操作

携帯端末の小型化・多機能化に伴い、プロジェクタを搭載した携帯端末の開発が進められている¹⁴⁾。また、携帯端末にプロジェクタが搭載されることを想定して、ハンドヘルドプロジェクタを用いたヒューマンコンピュータインタラクションの研究も盛んに行われ

モバイルディスプレイを用いた直感的なヒューマン・ロボット・インタラクションの提案

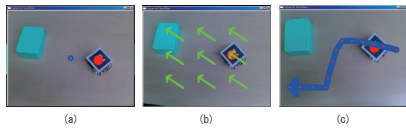


図 5 操作方法: (a) 中央のマルに向かって移動する (b) 矢印の流れに沿って移動する (c) 経路に沿って矢印の方向に移動する.

Fig.5 Manipulation using the Shepherd interface

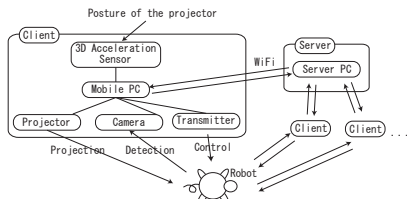


図 6 CoGAME システム
Fig. 6 CoGAME system

ている¹¹⁾¹⁰⁾¹⁶⁾¹⁾。以上の研究からハンドヘルドプロジェクタを利用することで、ユーザが自在に動かすことが可能なプロジェクションディスプレイを作ることが可能であると考えられる。

本研究では、プロジェクションディスプレイによるMDMの手法を用いたシステムとして、マルチユーザによるロボットナビゲーションシステム:CoGAMEを開発した。CoGAMEは、複数のユーザがロボットに向けて道を投影し、それぞれの投影した道を接続することで、ロボットをゴールまで誘導するゲームである。CoGAMEで実装されたMDMのインターフェースの構成は、図6のようになる。ハンドヘルドプロジェクタにはカメラが固定され、プロジェクションディスプレイ全体を撮影することができる。カメラ映像によりロボットを検出し、プロジェクションディスプレイ上での位置に対応付けることでロボットの自動制御を行う。

プロジェクションディスプレイは、投影する方向によって形状が変化してしまうので、投影される文字情報等の可読性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、この問題を解決するためにプロジェクションディスプレイの形状をリアルタイムに補正する必要がある。CoGAMEシステムでは、床面(水平面)のみに投影することを前提として、3軸加速度センサをプロジェクタに搭載することでこの問題を解決した。

3.2.1 システム構成

システムは複数台のクライアント、サーバ、ロボットから構成される。図6に示すように、クライアントはモバイルPC(Sony, Vaio typeU)、ハンドヘルドプロジェクタ(Toshiba, TDP-FF1A¹⁷⁾)、USBカメラ

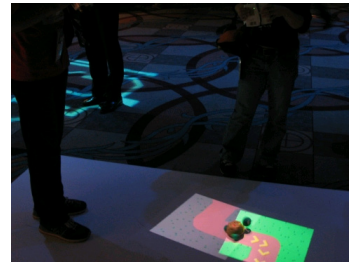


図 7 SIGGRAPH2007 Emerging Technologies での展示の様子

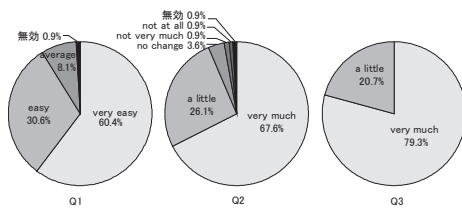
Fig. 7 Exhibition of SIGGRAPH2007 Emerging Technologies

(Logicool, Qcam for Notebooks Pro)、3軸加速度センサ(サンハヤト, MM-2860)から構成される。総重量は約1kgであり、プレイヤーは手に持って簡単に動かすことができる。クライアントは投影画像を生成し、ロボットを検出してそれを制御する機能を備えている。サーバにはノートPC(CPU: Pentium M 1.8GHz, メモリ: 1GB)を使用し、ゲーム中の各クライアントの情報管理とロボットの制御命令の生成を行う。サーバはソフトウェア上の処理のみを行っているため、それをクライアントで処理するようにすれば、サーバを設置する必要はない。しかし、現状ではクライアントの処理能力が低いため、サーバ用に別のPCを用意している。サーバと各クライアントの通信には無線LANを用いる。ロボットは、クライアントからの制御信号にしたがって動作する。

3.3 評価

構築した2つのシステムのうちCoGAMEに関するユーザフィードバックについて簡単に述べる。Shepherdの評価およびCoGAMEの評価の詳細については、それぞれ文献5), 4)を参照されたい。

SIGGRAPH2007 Emerging Technologiesにおいて、CoGAMEシステムの実演展示を行った。子供から大人まで約500人以上の人が、実際にCoGAMEを体験した(図7参照)。この実演では、2台のプロジェクタを2人の体験者、または1人の体験者とスタッフが協力して、ロボットをスタートからゴールまで誘導するゲームを行った。体験者の一部の111人にアンケート調査をして、プロジェクションディスプレイによるロボット操作について評価してもらった。その結果を図8に示す。この結果からほとんどの体験者は、CoGAMEシステムでのロボット操作を簡単に理解することができ、ゲームを楽しむことができたと言える。また、このシステムによって二人のユーザがお互いに協力してロボットをナビゲーションすることができる



- Q1 Was it easy to understand how to use the CoGAME system?
 a) very easy, b) easy ,c) average, d) difficult ,e) very difficult
- Q2 Could you collaborate with your game partner by using this system?
 a) very much, b) a little ,c) no change, d) not very much ,e) not at all
- Q3 Was it fun to see the CoGAME system?
 a) very much , b) a litte , c) no idea , d) not very much , e) not at all

図 8 体験者のアンケート結果 (アンケートに答えた人数: 111 人)
 Fig. 8 Results of Questionnaires

こともわかった。また、多くの体験者が「ロボットが投影画像を認識しているように見える」というコメントをした。このことからロボットがユーザの意図どおり動いていたと考えられる。実際にはロボットはインターフェース側から完全にコントロールされているので、このインターフェースはユーザにとって使いやすいインターフェースだと考えられる。

4. 考 察

実装した2つのシステムはどちらも、ディスプレイ自体を動かすことでロボットを簡単かつ直感的にナビゲーションすることができた。各システムにおける利点・問題点をまとめると以下ようになる。

操作対象への情報提示の可否

ハンドヘルドディスプレイは、液晶ディスプレイ上で実映像とCGを合成するので、基本的には現実世界の任意の場所に情報を付加することが可能である。それに対し、プロジェクションディスプレイの場合は、情報を投影する面が必要であるため、例えば空中に情報を表示することはできない。このため、空中を移動する飛行ロボットやロボットアームをMDMを用いて操作しようとする場合、ハンドヘルドディスプレイを用いた方がロボットの内部情報等を表示できるので適切であると考えられる。

付加情報の変更のしやすさ

MDMは基本的にディスプレイを動かすことで操作するので、ディスプレイに表示されている情報をユーザが頻繁に操作する必要はない。しかし、全く操作しないというわけではなく、状況に応じてロボット操作の

ための標識を変更したり、ロボットの情報表示に制限をかけるなどの操作も必要となってくる。ハンドヘルドディスプレイは文字通りディスプレイを手を持っているので、ディスプレイに表示されている情報をスタイルスペンなどを用いて簡単かつ直感的に変更することが可能である。プロジェクションディスプレイの場合は床面 (CoGAME の場合) に投影するので、直接の操作ができない。マウスカーソルを手元のジョイスティックなどを用いて操作することも考えられるが、現状のプロジェクションディスプレイは解像度が低く、環境光の影響でマウスカーソルなどの細かい表示は見え難い。このような場合は、レーザーポインタにより直接ディスプレイをポインティングする、あるいは音声でディスプレイの変更を指示するなどの入力手法を考える必要がある。

マルチユーザでの情報共有

プロジェクションディスプレイの場合、CoGAMEシステムのデモンストレーションから、複数人でインタラクションをとりながら、ロボットを操作できることが確認できた。ゲームを周りで見ていた人たちは、投影された道画像を見ながら、プロジェクタを持ってロボットを操作している人に様々なアドバイスを行っていた。このようにプロジェクションディスプレイを用いた操作は、他者とのインタラクションをとることが可能である。これに対し、ハンドヘルドディスプレイの場合は、ディスプレイの大きさが小さいのですぐに隣にいる人以外はロボット操作の情報を共有することはできない。1台のロボットを複数人で共有して使う場合を考えると、誰かがロボットを操作していても、別の人がそれに気づかずにそのロボットを操作しようとして、お互いの操作が干渉してしまう可能性がある。これを回避するためには、ロボット自体が特定のユーザによって操作されているかどうかをインターフェース側に知らせる必要がある。

3次元ロボットの操作

今回実装したシステムは、ロボットの二次元平面内での移動操作に特化していた。しかしディスプレイを3次的に動かすことで3次元移動可能なロボットも簡単に操作できると考えられる。そのためには、どのようにして2次元で構成されるディスプレイの中に3次元のディスプレイの動きとロボットの移動をマッピングするかが問題となる。例えば奥行き方向の情報を図5で示した円の大きさで表現し、ディスプレイを手前に引く、押すことで円の大きさを変更する。ロボットはこの円の中に写るように移動をすることでロボットを3次的に移動させることができると考える。し

かしながら、円の大きさと奥行き方向の対応が把握し辛いいため、より直感的な表現方法と操作方法を考える必要がある。

周辺視野について

現状の実装では、2.2 節で採り上げた3つのディスプレイのうち、HMDを用いたMDMによるロボット操作を実現していない。HMDを用いて実装する場合、頭部を動かすことでロボットナビゲーションを行うことが考えられる。HMDはハンドヘルドディスプレイやプロジェクションディスプレイと比べて視野が広いため、頭部を少し動かすだけで広範囲でロボットを移動させることができる。しかし、HMDを装着することでユーザの周辺視野を失うため、周りの状況を確認しながらロボットを操作するのが難しい。周辺を観測するために頭部を動かすと、ロボットの操作にも影響がでるため、ロボットを操作すると同時に周辺環境を観測することができない。これに対し、ハンドヘルドディスプレイやプロジェクションディスプレイは、ディスプレイとユーザの視野が分離されているので、周りの状況とディスプレイの中のロボットの状況を交互に観測しながらロボットを操作することが可能である。またプロジェクションディスプレイにおいては、ディスプレイと周辺環境がシームレスにつながっているため、状況把握が行いやすい。実際にCoGAMEシステムの体験者の多くは、ロボットを導くゴールの位置を確認すると同時にロボットのナビゲーションを行っていた。

以上の考察をまとめると、表4のようになる。今回試作したシステムを考察する限りでは、それぞれのディスプレイは一長一短であり、状況に応じて使い分ける必要がある。しかし、今後の研究において各ディスプレイの問題点を解決していくことで、“Mobile Display based Manipulation”を実現するより良いシステムを構築できる可能性があると考えられる。

5. 関連研究

本研究で提案する Mobile Display based Manipulation は、技術的には Augmented Reality 技術の応用であると考えられる。ロボットの操作やロボットとのインタラクションの研究に Augmented Reality 技術を利用した研究の多くは、ロボットの状態や動作を可視化する、あるいはより豊かな表現にすることを目的としている。Collett ら²⁾の研究では、ロボット開発やロボットプログラミングを容易にするため、AR 技術を用いてロボットのセンサ情報を視覚化するシステムを開発した。Virtual Humanoid プロジェクト¹³⁾で

は、HMD を用いてロボットに人間の外観を合成するシステムを開発している。ロボットに重畳される CG は連動して動くため、体験者はあたかも映像に手を触れて対話しているかのような体験ができる。Young ら²⁰⁾は、カメラ付タブレット PC を通して Roomba を観測し、ディスプレイに表示された Roomba の上に漫画の表情をつけることで、ヒューマンロボットインタラクションを促すシステムを開発した。本研究はこれらの研究と比較して、仮想世界の情報でロボットの状態を表現するだけでなく、現実世界のロボットの状態（位置や行動など）を変化させている点で異なっている。

Augmented Coliseum¹⁵⁾では、プロジェクタや液晶など画像提示装置を計測装置として用いる Display-Based Computing (DBC) という概念を提案している。このシステムでは、移動ロボットの上に特定のパターンを投影することで、高精度に移動ロボットの位置を求めている。DBC はディスプレイ上の情報によりロボットをコントロールするという点で、我々の提案手法と同じである。しかし、DBC はディスプレイ上のパターンを変化させることでロボットを計測・制御するのに対し、我々の提案手法はディスプレイ自体を動かすことでロボットを操作するという操作手法である。ディスプレイ自体を動かすという操作は、ディスプレイ上の表示を変えてロボットを制御するよりも直感的で、場所を選ばずに誰でも簡単に扱えると我々は考える。

6. おわりに

本稿では単機能ロボットを直感的に操作するための操作手法として、Mobile Display based Manipulation を提案した。提案手法では、ディスプレイにロボットを写し、ディスプレイ自体を動かすことで人間とのコミュニケーション機能を持たないロボットでも簡単かつ直感的に動かすことが可能である。本稿では、提案手法の実装例としてハンドヘルドディスプレイを用いたロボットナビゲーションシステムおよび、プロジェクションディスプレイを用いたロボットナビゲーションシステムについて紹介した。実装した2つのシステムを考察することで、提案手法の可能性および問題点を探った。

今後の課題としては考察で述べた各システムの問題点を改善するとともに、提案手法が直感的なロボット操作につながることを示していくことである。また、現状では視覚のディスプレイを用いたシステムの実装のみだが、今後は触覚ディスプレイなどの視覚以外の

表 1 各モバイルディスプレイの特性
Table 1 Characteristics of mobile displays

	ハンドヘルドディスプレイ	プロジェクションディスプレイ	ヘッドマウントディスプレイ
情報の提示場所	任意	投影できる面に限る	任意
情報の変更のし易さ			
マルチユーザ対応	×		×
3次元移動ロボットの操作			
周辺の確認			×

感覚を提示するディスプレイを動かすことでロボット操作するインターフェースについても考えていく。

参 考 文 献

- 1) Cao, X. and Balakrishnan, R.: Interacting with Dynamically Defined Information Spaces using a Handheld Projector and a Pen, *The annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.225–234 (2006).
- 2) Collett, T. H.J. and MacDonald, B.A.: Developer oriented visualisation of a robot program, *the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, pp.49–56 (2005).
- 3) 萩田紀博: ネットワークロボットの将来展望, *日本ロボット学会誌*, Vol.23, No.6, pp.642–643 (2005).
- 4) 細井一弘, ダオヴィンニン, 森 晶洋, 杉本雅則: CoGAME: ハンドヘルドプロジェクタを用いたロボットナビゲーションシステムの試作, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.12, No.3, pp.285–294 (2007).
- 5) 細井一弘, 杉本雅則: Shepherd: ユーザ視点のマルチロボットコントロールを実現するモバイルインターフェイスの試作, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.11, No.2, pp.225–236 (2006).
- 6) iRobot Corporation: Roomba, <http://www.irobot.com/>.
- 7) Mogilev, D., Kiyokawa, K., Billingham, M. and Pair, J.: AR Pad: An Interface for Face-to-face AR Collaboration, *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems 2002*, pp.654–655 (2002).
- 8) Moritani, H., Kawai, Y. and Sawada, H.: Intuitive Manipulation of a Haptic Monitor for the Gestural Human-Computer Interaction, *Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction*, pp.386–398 (2003).
- 9) 大場光太郎, 大原賢一: ユビキタス・ロボティクス, *日本ロボット学会誌*, Vol.25, No.4, pp.505–508 (2007).
- 10) Rapp, S., Michelitsch, G., Osen, M., Williams, J., Barbish, M., Bohan, R., Valsan, Z. and Emel, M.: Spotlight navigation; Interaction with a handheld projection device, *International Conference on Pervasive Computing, Video paper* (2004).
- 11) Raskar, R., van Baar, J., Beardsley, P., Willwacher, T., Rao, S. and Forlines, C.: iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol.22, No.3, pp.809–818 (2003).
- 12) Rekimoto, J.: TransVision: A hand-held augmented reality system for collaborative design, *International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp.85–90 (1996).
- 13) Shoji, M., Miura, K. and Konno, A.: U-Tsu-Shi-O-Mi: The Virtual Humanoid You Can Reach, *SIGGRAPH2006 Emerging Technologies* (2006).
- 14) Siemens: Cell Phone with Builtin Projector, www.physorg.com/news3505.html.
- 15) Sugimoto, M., Kojima, M., Nakamura, A., Kagotani, G., Nii, H. and Inami, M.: Augmented Coliseum: Display-Based Computing for Augmented Reality Inspiration Computing Robot, *SIGGRAPH 2005 Full Conference DVD-ROM Disk1 Emerging Technologies* (2005).
- 16) 杉本雅則, 宮原耕介, 井上博司, 田村晃一: 携帯端末の3次元位置に基づく投影画面の表示と直感的な操作手法の試み, *情報処理学会論文誌*, Vol.47, No.6, pp.1976–1986 (2006).
- 17) Toshiba: TDP-FF1A(J), <http://www.toshiba.co.jp/vis/lineup/portable/ff1/index.html>.
- 18) Wagner, D.: ARToolKitPlus, http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld_ar/artoolkitplus.php.
- 19) Wagner, D., Pintaric, T., Ledermann, F. and Schmalstieg, D.: Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld Device, *Third International Conference on Pervasive Computing*, pp.208–219 (2005).
- 20) Young, J.E., Xin, M. and Sharlin, E.: Robot Expressionism through cartooning, *International conference on Human-robot interaction*, pp.309–316 (2007).