

# TouchMe: CG 重畳表示を用いたロボットの直接操作手法

橋本 直<sup>†1</sup>

石田 明彦<sup>†2</sup>

稲見 昌彦<sup>†1,†3</sup>

五十嵐 健夫<sup>†1,†4</sup>

ロボットの操作デバイスとして、ジョイスティックやゲームパッドが広く受け入れられている。しかし、これらのデバイスはボタンとロボットの動きの対応関係が直感的でないため、初心者が自由自在に操作を行うのは難しい。この問題を解決するため、我々は CG 重畳表示を用いたロボットの遠隔操作インタフェース「TouchMe」を提案する。TouchMe では、操作対象の作業空間を三人称視点で捉えたカメラ映像がタッチスクリーン上に映し出される。ユーザは、ロボットの操作したい部位に直接指を触れることによってロボットを操作することができる。我々のシステムはユーザに直感的な操作を提供し、少ない時間で操作を習得することができる。本論文では、TouchMe の概要および実装したプロトタイプについて説明する。また、3 種類のタッチインタラクションの手法を提案し、ユーザスタディにおいてそれらを比較した結果を報告する。

## TouchMe: Direct Manipulation for Robot Based on Augmented Reality

SUNAO HASHIMOTO<sup>†1</sup>

AKIHIKO ISHIDA<sup>†2</sup>

MASAHIKO INAMI<sup>†1,†3</sup>

TAKEO IGARASHI<sup>†1,†4</sup>

The most popular remote control method for robot is a joystick and a gamepad. However, these methods are difficult for inexperienced users because the mapping between the user input and resulting robot motion is not always intuitive. To solve this problem, we propose an augmented reality based interface for remotely controlling a robot from a third-person view, which is called “TouchMe”. This system allows the user to manipulate each part of the robot by directly touching it on a view of the world as seen by a camera looking at the robot from a third-person view. Our system provides intuitive operation, and the user can use our system with minimal user training. In this paper we describe the overview of TouchMe and its prototype implementation. We also introduce three touch interaction methods for controlling the robot in response to user’s manipulation and report on the results of empirical comparisons of these methods.

### 1. はじめに

人間が作業を行うのが困難な環境として、水中、高所、高温または低温の環境、毒物や放射性物質が充満した環境などが上げられる。このような危険環境において、人間に代わって作業を行うさまざまなロボットが提案されている。そのようなロボットは、理想的には完全自律型で運用されることが望まれるが、一般物体認識や状況認識の点で課題が残っており、実現はまだ遠い。この問題を軽減する方法として、物体認識用のタグや、事前に作成した対象空間のモデルを利用する方法が提案されているが、これらの方法は未知環境では使用できない。以上の理由から、人間によるロボ

ットの遠隔操作は依然として行われている。

人間に代わって物体を把持したり運んだりするロボットは一般的に多自由度の構造を持っているが、そのようなロボットの遠隔操作は初心者にとって簡単なものではない。例えば、ロボットアームは一般的に4から6の自由度を持つ。また、そのようなロボットアームが移動台車の上に固定されていると、自由度はさらに増加する。ロボットの遠隔操作には、一般的にジョイスティックやゲームパッドが広く利用されている。しかし、これらの入力デバイスでは、操作可能な自由度の数はボタンや軸の数に制限される。複数のボタンを同時押しすることによって操作可能な自由度の数を増やす工夫もたびたび行われるが、それは操作をより複雑にし、習得により多くの時間を要する。多関節のロボットの操作を簡単にする方法として、IK (Inverse Kinematics : 逆運動学) が広く用いられている。IK を用いた一般的なロボットアームの操作では、手先の位置の操作がジョイスティックにマッピングされ、手先の動きに応じて腕や肘の関節の角度は自動的に計算されるようになっている。しかし、一般的なジョイスティックベースのコントローラでは、スティックを傾け

†1 科学技術振興機構 ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

Japan Science and Technology Agency, ERATO, IGARASHI Design Interface Project

†2 東京理科大学

Science University of Tokyo

†3 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

Graduate School of Media Design, Keio University

†4 東京大学大学院情報理工学系研究科

Department of Computer Science, The University of Tokyo

た量に比例した運動速度およびスティックを傾けている時間に比例した移動量が与えられる仕組みになっているため、ユーザが思い通りの位置に手先を移動させられるようになるためにはある程度の訓練を要する。

我々は、CG (Computer Graphics) の重畳表示を用いてロボットを直感的に操作することができるシステム「TouchMe」を提案する。TouchMe によってロボットの遠隔操作を行っている様子を図1に示す。このシステムでは入力デバイスとしてタッチスクリーンを使用する。画面上には、操作対象のロボットを三人称視点から捉えたカメラ画像が表示される。ユーザは画面に表示されているロボットの操作したい部位に直接触れ、ドラッグすることによって、ロボットを任意の位置・姿勢にすることができる。カメラ画像中のロボットの上には、実物のロボットと同じ外見のCGが重畳表示される。このCGはユーザの入力に同期して動き、ロボットがどのように動くかの予測をユーザに提示する。Poserに代表されるCGキャラクターのポージングツールでは、操作したい部位を直接マウスでドラッグするという操作手法が用いられているが、我々のシステムはこれをAR (Augmented Reality : 拡張現実感) の技法によって実世界のロボットの制御に応用するものである。

典型的なロボットの遠隔操作では、ロボットに搭載された主観視点のカメラ映像を頼りに操作を行う。これに対し、我々のシステムでは、作業空間全体の様子を把握しやすい三人称視点のカメラを用いる。我々は、三人称視点のカメラを、固定カメラ、空撮カメラ、他のロボットの視点の3種類に分類し、それぞれの長所と短所について議論する。

本論文では、TouchMeの概要とプロトタイプの実装について説明する。また、タッチインタラクションの手法としてMove-after-touch, Move-during-touch, Move-during-and-after-touchの3種類を提案し、ユーザテストにおける比較実験の結果を報告する。

## 2. 関連研究

ロボットや家電をコントロールするためのビデオベースのインタフェースにはさまざまなものが提案されている。Taniらは、カメラ画像を通して画面に映っている実物体とインタラクションを行う手法を提案している[1]。彼らは対象物を2次元でモデル化する手法と、3次元でモデル化する手法の2種類を提案し、前者の方法で、発電所の様子をモニタリングしながら画面に映っている装置を遠隔操作するHyperPlantと

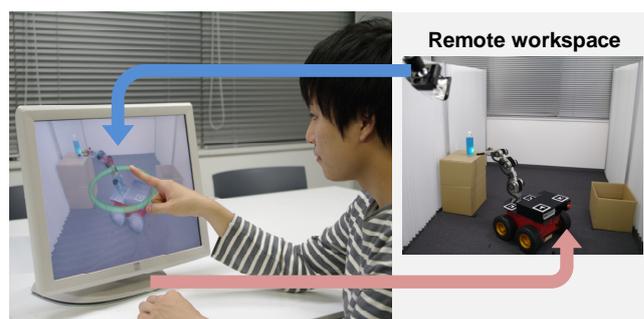


図1 TouchMeによるロボットの操作風景

いうシステムを開発した。CRISTAL[2]では、リビングルームを撮影したカメラ画像がマルチタッチのテーブルトップディスプレイ上に表示され、ユーザは画面上に表示された家電に直接触れることによってそれらを操作することができる。我々のシステムは、カメラ画像を通して実世界の物体を操作するという点でこれらの研究と共通しているが、多自由度の構造を持つロボットの遠隔操作を目的とし、単純な装置のOn/Offではなく、ロボットによる複雑なタスクの達成を目標としているという点で異なる。

Sakamotoらは、天井に設置されたカメラの映像をタブレットPCに表示し、その画面上で移動経路をスタイラスペンでスケッチすることによって掃除ロボットの移動を指示するシステムを提案した[3]。Katoらは、天井カメラの映像をマルチタッチのディスプレイに表示し、タッチ操作で画面上の空間にバクトル場を与えることによって同時に複数のロボットを制御する手法を提案した[4]。Guoらは、天井カメラの映像が表示された大型のテーブル型ディスプレイ上に操作対象のロボットに外見が似た人形を置き、それを操作することによってロボットを制御するシステムを提案した[5]。これらの研究は、天井からのトップダウンビューが2次元平面上でのロボットの移動の指示に適していることを示しているが、本研究で扱うような3次元方向の自由度を持つロボットに対しては適さない。

ロボット視点を利用したGUI (Graphical User Interface) も提案されている。Sekimotoらは、移動ロボットに搭載されたカメラの映像をタッチスクリーンに表示し、その画面上でタッチすることによってロボットに目的地を指示することができるシステムを提案した[6]。Fongらは同様のシステムを携帯端末(PDA)上で実現した[7]。Correaらは、自動制御のフォークリフトへの指示を行うモバイルタブレットインタフェースを提案した[8]。このシステムでは音声

認識と画面に表示されたロボット視点の映像に対するスケッチジェスチャによって指示を行うことができる。

ロボット視点の画像から三人称視点を生成し、その画像にロボットの CG を重畳表示する Time follower's vision[9]では、三人称視点でのロボットの操縦が初心者に対して効果的であることを示している。鈴木らは、三人称視点のカメラ映像とタッチスクリーンを用いてロボットの移動を遠隔で指示する AR インタフェース [10]を提案している。我々の研究は、2 次元の移動制御だけではなく、アームを搭載した移動台車のような、より複雑な自由度を持つロボットの操作を目標としている点で異なる。

AR を用いたロボット操作インタフェースとして、以下のようなものが挙げられる。Nawab らは、色分けされた座標軸をロボットアームの手先に重畳表示し、アームとジョイスティックのキーマップをわかりやすくする手法を提案した[11]。Kobayashi らは、ヒューマノイドロボットがセンシングした情報やパスプランニングの結果を AR の技法によってロボットの周辺に重畳表示する手法を提案した[12]。Chen らは、実物体とバーチャルな物体を使ってロボットのシミュレーションを行う AR システムを提案した[13]。現実のロボットの上に、バーチャルなポインタやワイヤフレーム、あるいはロボットと同じ CG を重畳表示し、現実のロボットを操作する AR インタフェースとして、Drascic らの ARGOS[14]や Xiong らのシステム[15]がある。これらと同様のコンセプトが我々の研究でも用いられているが、我々は、タッチスクリーンベースのインタフェースを提案し、そのタッチインタラクションについて議論するという点で異なる。

### 3. TouchMe の概要

TouchMe はロボットの遠隔操作のための AR インタフェースである。システムの構成を図 2 に示す。システムは、作業空間内の画像をリアルタイムで取得し、それにロボットの CG を重畳表示したものをタッチスクリーン上に表示する。CG は実物のロボットの画像の上に半透明で重畳され、あたかもロボットの幽霊が憑依したような表示になる。CG は実物と同じ自由度を持ち、ユーザが重畳された CG に触れてドラッグ操作を行うと、CG の位置・姿勢は変化する。CG は実物のロボットに対する目標値として機能する。ユーザは、動かしたい部位に触れ、それをドラッグすることにより、ロボットに位置と姿勢を指示することができる。例えば、ロボットを特定の場所に移動させたいと

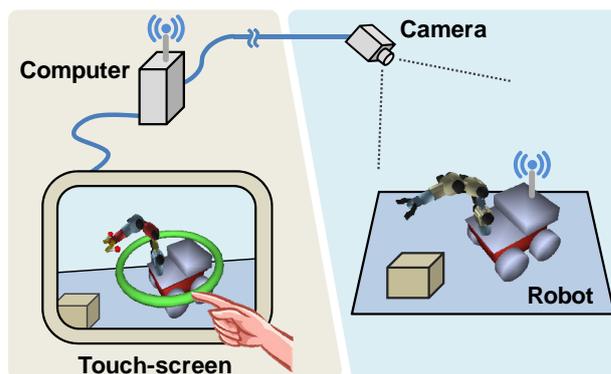


図2 システム構成

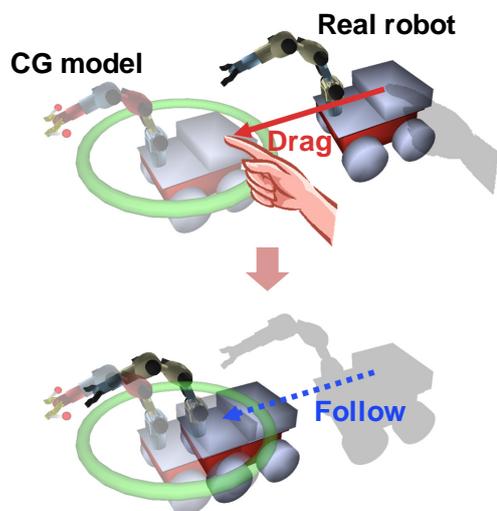


図3 CG のビジュアライゼーション

きは、ロボットの本体部分に触れ、目的の場所までドラッグする。また、物体を把持するべくアームを伸ばしたいときは、アームの先端部分に触れてドラッグを行う。これらの操作は、3次元CGのポージングツールで行われるような、2次元のディスプレイ平面上での3次元物体の操作と同様のものである。

CGのビジュアライゼーションについて図3を用いて説明する。ユーザがCGをドラッグすると、CGはロボットに先行して動き、ロボットが幽体離脱をしたような表示が行われる。その後、ロボットはCGが示す位置と姿勢を目標値として追従動作を行う。CGによって動きの予測ができるため、ユーザはロボットと障害物との位置関係を把握することができる。ロボットが追従を開始するタイミングについては後述する。

#### 3.1 三人称視点カメラ

典型的なロボットの遠隔操作では、ロボットに搭載されたカメラからの得られた主観視点の映像を頼りに操作が行われているが、この方法では、ロボットが回転または後進する際に、ロボットの側方や後方にある

障害物の回避を行うのが難しい。そこで我々は、ロボット、障害物、目標物体を含む作業空間全体の状況把握を容易にするために、三人称視点のカメラを利用する。我々は三人称視点のカメラを3種類に分類し、以下にその長所と短所をまとめる。

**固定カメラ：**一般的に運用されている固定カメラとして監視カメラがある。監視カメラは、道路、公園、駅、博物館、工場、学校、商店、住宅などさまざまな場所にセキュリティや記録の目的で設置されている。監視カメラは高い場所に設置され、俯瞰視点を提供する。固定された監視カメラの利点は、作業環境の状況把握をするために安定した視界が得られることだが、カメラの動きはパン、チルト、ズームに限られ、対象空間に遮蔽が生じた場合はそれを解消するのが難しい。

**空撮カメラ：**無線制御の小型のヘリコプターや飛行船など、さまざまな UAV (Unmanned Aerial Vehicle) が開発されている。UAV に搭載されたカメラ (空撮カメラ) も俯瞰視点を提供するが、固定監視カメラと違い、空間内を自由に移動することができる。空撮カメラは 3D モデリングツールで行われるような視点操作を実世界において行うことができる。さらに、操作対象のロボットを常に視界内におさめるように自動追従させることも可能である。空撮カメラは、3D アクションゲームで使われているような、プレイヤーの背後から追従するような三人称視点を提供することができる。しかし、そのような視点を提供するためには、UAV の制御を非常に安定かつ正確に行う必要がある。

**他ロボットの視点：**作業空間内に 2 台以上のロボットが存在し、かつ一方のロボットがカメラを持つとき、そのロボットの視点を借りて、三人称視点でもう 1 台のロボットを操作することができる。すべてのロボットがカメラを持っていれば、ユーザは主観視点と三人称視点を自由に切り替えて作業を行うことができる。例えば、ロボットのハンドを使った作業を行うときは、そのロボットの主観視点を利用して手元の視界を得ながら作業を行い、そのロボットを別な場所に移動させるときは、他のロボットの視点をを用いて障害物を回避しながら移動を行う。

視点の操作は、画面内のロボット以外の領域 (背景) をタッチするか、視点操作のアイコンをタッチすることによって行う。また、作業を行うのに良好な視界を得るためにカメラが自動的に移動する方法も考えられる。本論文では、固定された監視カメラの映像を用いたシステムを実装し、検証を行う。

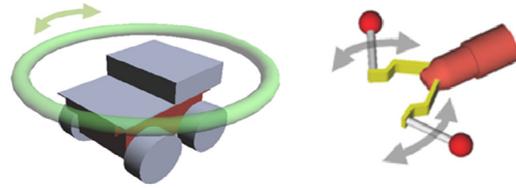


図4 バーチャルハンドル。ロボットの巡回操作作用のリングタイプ (左) と、ハンドの開閉操作作用のレバータイプ (右)。

### 3.2 バーチャルハンドル

バーチャルハンドルは、CG の操作を支援するために付与される GUI である。バーチャルハンドルは、小さな可動部位の操作を容易にしたり、パーツの可動方向を可視化するために用いられる。2 種類のバーチャルハンドルを図 4 に示す。リングタイプは、回転部位 (本体やアームの関節) の操作に用いられる。レバータイプは手先などの小さな部位に取り付けられる。これらのアイデアは CG モデリングのソフトウェアにおいて広く用いられている [16]。我々はそれを AR の技法を用いて実世界のロボットに適用する。

### 3.3 IK による多関節制御

提案手法では、多関節ロボットの制御を簡単にするために、IK を適用する。複数の関節を持つリンクの 1 点を操作した際、その操作に連動して各関節の角度は自動的に計算される。例えば、ロボットアームの手首部分をひっぱった場合、肘関節や肩関節 (あるいは本体) は連動して動く。2 次元ディスプレイ平面における 3 次元多関節物体の操作は、一般的なバーチャルヒューマンの 3 次元ポージングツールで用いられる IK のアルゴリズムを利用する。

## 4. タッチインタラクション

ロボットの動作速度には物理的な限界があるため、ユーザによって操作される CG に遅れなくロボットを一致させることは難しい。我々のシステムでは、遅れがあることを前提としたタッチインタラクションを 3 種類提案する。

**Move-after-touch：**ユーザが画面に触れて CG を操作している間はロボットは動かない。ユーザが画面から指を離すと、その時点の CG の状態がロボットの目標位置・姿勢となり、それに一致するべくロボットが動き始める。ロボットの位置と姿勢が CG に一致すると、ロボットは停止する。この手法を図 5 に示す。

**Move-during-touch：**ユーザが画面に指に触れて CG を操作し始めると同時にロボットは CG への追従を開

始する。ユーザが CG を操作している間は、ロボットの目標位置・姿勢は CG の現在の状態によって更新され、ロボットはそれに追従するように動く。ユーザが画面から指を離すと、ロボットは CG に一致しているかどうかに関わらずすぐに停止し、CG は現在のロボットの状態と一致するように更新される。この手法を図 6 に示す。

**Move-during-and-after-touch** : この方法は前述の 2 つの方法を組み合わせたものである。ユーザが画面に触れて CG を操作し始めると同時にロボットは動作を開始し、CG が操作されている間は、ロボットは CG に追従するように動作する。ユーザが画面から指を離してもロボットは CG に一致するまで動作し続ける。この手法を図 7 に示す。

## 5. プロトタイプシステム

提案システムのプロトタイプを開発した。以下にその詳細を述べる。

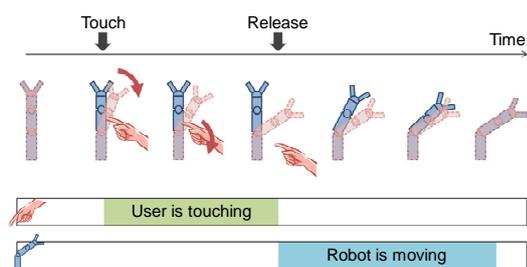


図5 Move-after-touch

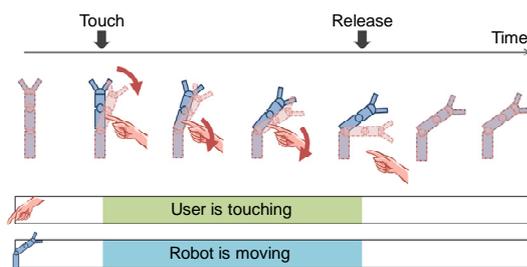


図6 Move-during-touch

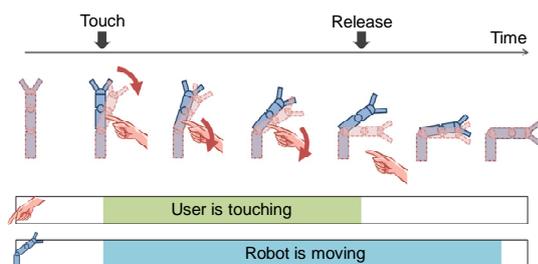


図7 Move-during-and-after-touch

### 5.1 ロボット

操作対象のロボットとして、ロボット台車 (MobileRobots PIONEER3-DX) にロボットアーム (Neuronics Katana) を取り付けたものを使用した。図 8 にロボットとその自由度を示す。ロボット台車は移動機構として 4 輪のホイールを持ち、前後方向の移動と定置旋回を行う。使用したロボットアームは本来 6 自由度を持つが、簡単化のために可動部位を、ハンドと 3 つの関節に限定した。したがって、ロボット全体での自由度は 6 である。重畳される CG を図 9 に示す。ロボット本体の回転操作を行うためのリングタイプのバーチャルハンドルと、ハンドの開閉操作を行うためのレバータイプのバーチャルハンドルを付与した。アーム部位が操作される際、アームの各関節 (図 8 に示される 3, 4, 5 の関節) の角度は IK によって計算される。

ロボット台車とロボットアームは、ホストコンピュータによって遠隔制御される。ホストコンピュータは、アームの各関節の角度値を指定することができ、また、各関節の角度値も取得することができる。現在のプロトタイプでは、ホストコンピュータとロボットは USB ケーブルで接続されている。ハンドを用いて物体を掴む作業を行う際に、狙いをつけるための指標を提示する装置として、緑色の光を発するライトをアーム

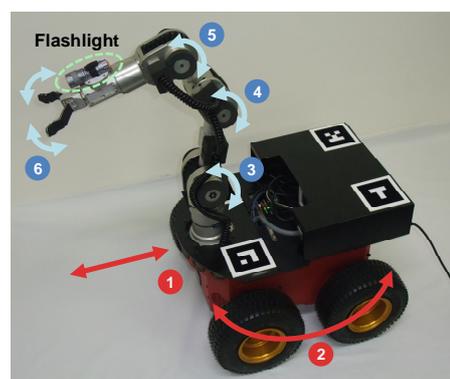


図8 プロトタイプで使用したロボットとその自由度

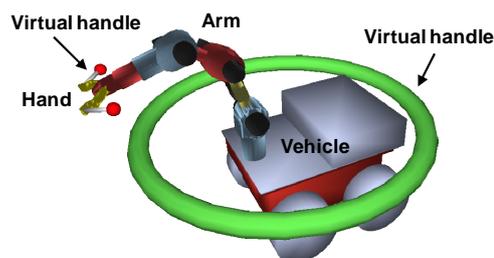


図9 プロトタイプで使用した CG

ムの手首部分に装着している。この仕組みは、単眼カメラ画像においてユーザが奥行きを認知するために重要である。

## 5.2 CG とロボットの位置合わせ

三人称視点の監視カメラとして、Logicool QCAM-200V を作業空間内に支柱を使って固定した。カメラ画像は 19 インチのタッチスクリーンに表示される。画像の解像度は  $800 \times 600$  ピクセル、フレームレートは 15fps とし、パンニングやズームは行わない。実物のロボットと CG のロボットの位置合わせにはビジュアルマーカ (ARToolKit) を用いた。システム起動時の初期状態およびロボット停止時は、ロボットアームから取得した関節角度値と、マーカから得られた位置・姿勢の値が CG に与えられる。

## 6. ユーザスタディ

開発したプロトタイプを用いて、提案手法の評価および 3 種類のタッチインタラクションの比較を行った。実験環境を図 10 に示す。タッチスクリーンに表示される CG を重畳したカメラ画像を図 11 に示す。作業空間の広さは  $190 \times 250$  cm<sup>2</sup> である。高さ 58cm の棚の上に、青いペットボトル (直径 7cm, 高さ 25cm) が置かれており、その向かい側にゴミ箱 ( $42 \times 33 \times 31$  cm<sup>3</sup>) が置かれている。カメラは床から 123cm の高さに固定されている。被験者として 20~25 歳の男女 12 名 (男性 8 名, 女性 4 名) が参加した。被験者は全員コンピュータを日常的に使用している大学生である。ほとんどの被験者がロボット操作に関する経験を持たず、また、我々のロボットについての知識を持たなかった。実験は 1 セッション 1 時間程度を要した。プロトタイプを用いて、棚の上に置かれているペットボトルを掴み、ゴミ箱に入れるというタスクをそれぞれの被験者に与え、実験を行った。

### 6.1 実験条件

Move-after-touch (A), Move-during-touch (D), Move-during-and-after-touch (DA) の 3 条件で実験を行った。実験は被験者内比較とし、すべての被験者に対してすべての条件を体験させた。実験順はカウンターバランスをとった。被験者には作業空間をモニタ以外の方法で見ることを禁じた。実験前の説明では、ロボットの操作方法、ロボットの自由度、把持を行う際に狙いをつけるためのライトがアームに装着されていることを説明した。条件毎に、被験者に対し最大 5 分の練習時間を与えた (ただし被験者が練習に満足したらその時点で打ち切る)。また、作業空間内にある物体および

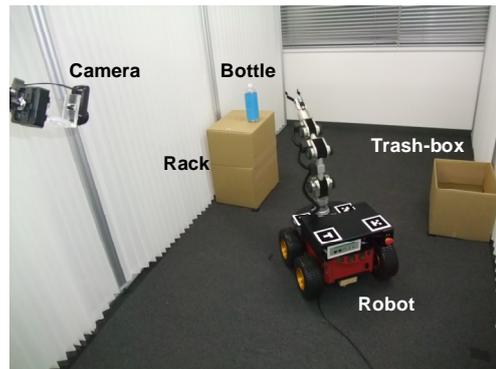


図10 実験環境



図11 タッチスクリーンに表示される合成画像

ロボットは、試行毎に初期位置に戻した。被験者の操作ミスによってロボットがペットボトルを床に落とした場合は、失敗として記録した。試行毎にタスク達成時間を記録し、条件毎に手法に関するアンケートによる調査を行った。また、実験終了後にインタビューを行った。

### 6.2 実験結果

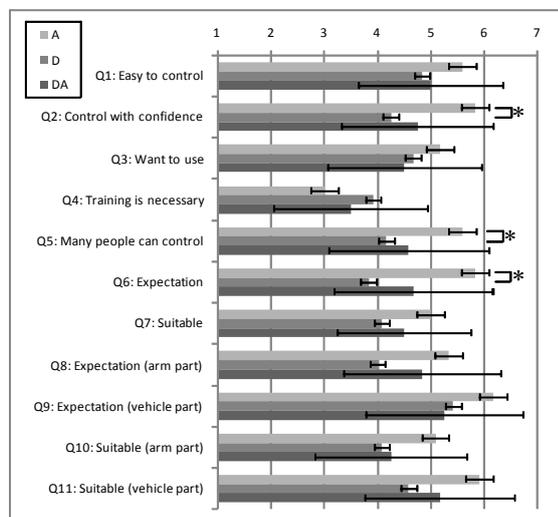
12 名中 11 名の被験者が 3 条件すべてのタスクに成功した。失敗した 1 人の被験者は、すべての試行においてボトルを床に落とした。表 1 にタスク達成時間を示す (成功したケースのみ)。タスクはおよそ 2 分で達成された。ANOVA 検定 (有意水準 0.05) の結果、タスク達成時間には有意差は見られなかった ( $p=0.77$ )。アンケートの質問内容を表 2 に、その集計結果を図 12 に示す。アンケートは 7 段階のリッカートスケールで点数評価を行った (点数が高いほど肯定的)。ANOVA 検定 (有意水準 0.05) および Ryan 法による多重比較を行った結果、Q2, Q5, Q6 において条件 A と条件 D の間で有意差が認められた (それぞれ  $p=0.01$ ,  $p=0.01$ ,  $p=0.001$ )。条件 A はすべての項目において、他の条件よりも高い値を示しており、また、条件 D と条件 DA の間にはすべての項目において有意差は見られない。

表1 タスク達成時間の平均

条件	時間 (m:ss)	標準偏差 (m:ss)
A	1:52	0:30
D	2:00	0:22
DA	1:53	0:22

表2 アンケートの質問項目

番号	質問内容
Q1	操作しやすいと感じた
Q2	自信を持って指示を行うことができた
Q3	この方法でロボットを操作したいと感じた
Q4	たくさん練習が必要だと感じた
Q5	多くの人が簡単に操作を行うことができると感じた
Q6	ロボットを想像通りに動かすことができた
Q7	ロボットの操作方法としてふさわしいと感じた
Q8	アームを想像通りに動かすことができた
Q9	台車を想像通りに動かすことができた
Q10	アームの操作方法としてふさわしいと感じた
Q11	台車の操作方法としてふさわしいと感じた

図12 アンケートの結果。\*は有意差 ( $p < 0.05$ ) がある項目。

### 6.3 3条件の比較

ユーザスタディの結果は、A が最も受け入れられる傾向を示している（特に Q2, Q5, Q6）。Q1（操作のしやすさ）では有意差は見られなかったが、インタビューにおいて、12 人中 9 人の被験者が A が最も簡単であると答えた。その主な理由は、指を離すまでロボットが動かないので、あせらずに落ち着いて操作できるから、というものだった。一方で、条件間で平均タ

スク達成時間には有意差がなかったにもかかわらず、12 人中 9 人の被験者は、インタビューにおいて「A は作業を完了するのに最も時間がかかると思う」と答えた。その理由は「D と DA は CG を動かしたらすぐに追従を始めるので A より速いと思う」というものだった。画面から指を離すまでロボットが動かないことと、画面から指を離してロボットが目標位置に到達するまで操作をせずに待っている時間が長いことが、A に対して心理的に「遅い」という印象を与えていると考えられる。Q4（たくさん練習が必要）について条件間で有意差は見られなかったが、いずれの条件も平均得点は 4 未満を示している。また、すべての被験者は全条件において練習を 4 分未満で終え、12 人中 11 人の被験者は、5 分未満でタスクを達成している。これらの結果は、提案手法が習得に長い時間を要しないことを示している。Q3（この方法でロボットを操作したい）と Q7（ロボットの操作方法としてふさわしい）には有意差は見られなかったが、インタビューにおいて「実際に使いたい度合」と「ふさわしいと思う度合」で 3 条件を比較させた結果、数名の被験者は、「実際に使いたいのは A で、このシステムのロボットの挙動として最もふさわしいのも A である」と答えた。その主な理由は、A が最も簡単な方法だから、というものだった。一方で、D や DA を好む人は、ユーザの操作に反応してロボットがすぐに動くという点に価値を置いていた。特に D を好む人は、画面から指を離すことによって、ロボットが障害物にぶつかりそうになったときに瞬時に止められるという点を高く評価していた。D についての否定的なコメントとして「ロボットが目的地に着くまで画面に指を触れ続けなければいけないので疲れる」「間違っ指を離してしまうことがたびたびある」というものがあった。

### 6.4 提案手法に関する考察

すべての被験者はバーチャルハンドルの使い方を理解し、ロボットを旋回させる際やハンドを操作する際効率的に活用していた。CG の操作に関する意見として「操作をより軽快にするために、慣性を働かせて欲しい」「ハンドの物体の把持状態がわかりづらかったので、物体を掴んだ際にハンドの色が変わるなどの表示が欲しい」などがあった。また、アームの制御については、数名の被験者から「アームの先端を持って動かした際にどこまで動くのかがわかりづらい」という意見が寄せられた。これは、アームの可動範囲を可視化する必要性を示している。また、彼らはアームの制御に IK と FK（Forward Kinematics：順運動学）の両

方を使いたいと答えた。

実験を通して、三人称視点でのロボット操作はすべての被験者に受け入れられた。今回の実験で使用した固定カメラによる三人称視点に対しての否定的な意見として、空間の奥行きが認識しにくいことや、ロボットの可動部位の回転軸が視点の方向と直交したり、オクルージョンが発生した際に、特定のパーツが操作不能になることなどが挙げられた。我々は、これらの問題は複数のカメラや可動式のカメラを用いることで解決できると考えている。被験者からは、トップダウンビューや作業領域を横から捉えた視点、ロボットの手首から見た視点などの追加の視点が欲しいとの意見が寄せられた。また、作業領域により近づいて見るためのズームインが欲しいという意見もあった。

「ペンの方がより正確な操作ができそう」「ペンの方が指に比べて画面が隠れる領域が小さい」などの理由から、ペンによる操作をしたいという意見も寄せられた。また、マルチタッチスクリーンを使いたいという意見もあった。マルチタッチで行いたい操作として、ピンチジェスチャによってズームイン操作やハンドの開閉操作をしたり、1本の指でアームの関節を押さえて姿勢を固定した状態で、もう1本の指で特定のリンクを動かすような操作が挙げられた。2本の指を使ったインタラクシオンは、多関節リンクを操作する際にIKとFKを切り替えるための有効な手段になると考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

本論文では、ロボットを遠隔操作するためのARインタフェースを提案した。TouchMeは、三人称視点のカメラ画像が表示されたタッチスクリーン上で、ロボットの動かしたい部位に直接接触れることにより、その部位を動かすことができる。我々は、タッチインタラクシオンの手法を3種類提案し、プロトタイプを用いて比較実験を行った。被験者の過半数は、画面から指を離れた後でロボットが動作を開始する手法が最も簡単であると答えた。提案手法は、ヒューマノイド、小型の卓上ロボット、ブルドーザ、パワーショベルなど、さまざまなタイプのロボットに対して適用可能である。今後はシステムの改良を行っていくとともに、今回実装を行わなかった空撮カメラや他ロボット視点についての実装と検証を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) Tani, M., Yamaashi, K., Tanikoshi, K., Futakawa, M., Tanifuji, S.: Object-oriented video: interaction with real-world objects through live video, Proc. CHI'92, pp.593-598 (1992).
- 2) Seifried, T., Haller, M., Scott, S.D., Perteneder, F., Rendl, C., Sakamoto, D. and Inami, M.: CRISTAL: A Collaborative Home Media and Device Controller Based on a Multi-touch Display, Proc. Tabletop'09, pp.33-40 (2009).
- 3) Sakamoto, D., Honda, K., Inami, M. and Igarashi, T.: Sketch and Run: A Stroke-based Interface for Home Robots, Proc. CHI'09, pp.197-200 (2009).
- 4) Kato, J., Sakamoto, D., Inami, M. and Igarashi, T.: Multi-touch Interface for Controlling Multiple Mobile Robots, Proc. CHI'09, pp.3443-3448 (2009).
- 5) Guo, C., Young, J. E. and Sharlin, E.: Touch and toys: new techniques for interaction with a remote group of robots, Proc. CHI'09, pp.491-500 (2009).
- 6) Sekimoto, T., Tsubouchi, T. and Yuta, S.: A Simple Driving Device for a Vehicle Implementation and Evaluation, Proc. IROS'97, pp.147-154 (1997).
- 7) Fong, T., Thorpe, C. and Glass, B.: PdaDriver: A Handheld system for Remote Driving, Proc. ICAR'03, (2003).
- 8) Correa, A., Walter, M.R., Fletcher, L., Glass, J., Teller, S. and Davis, R.: Multimodal Interaction with an Autonomous Forklift, Proc. HRI'10, (2010).
- 9) Sugimoto, M., Kagotani, G., Nii, H., Shiroma, N., Inami, M., Matsuno, F.: Time Follower's Vision: A Teleoperation Interface with Past Images, IEEE Computer Graphics and Applications, 25, 1, pp.54-63, (2005).
- 10) 鈴木雄介, 福島寛之, 宮本一郎, 竹内 晃一: コミュニケーション支援ロボットシステムの撮影動作インタフェース, インタラクシオン 2010 論文集, pp.165-168 (2010).
- 11) Nawab, A., Chintamani, K., Ellis, D., Auner, G. and Pandya A.: Joystick mapped Augmented Reality Cues for End-Effector controlled Tele-operated Robots, Proc. IEEE VR'07, pp.263-266 (2007).
- 12) Kobayashi, K., Nishiwaki, K., Uchiyama, S., Yamamoto, H., Kagami, S. and Kanade, T.: Overlay what Humanoid Robot Perceives and Thinks to the Real-world by Mixed Reality System, Proc. ISMAR'07, pp.1-2 (2007).
- 13) Chen, I.Y.H., MacDonald, B. and Wünsche, B.: Mixed reality simulation for mobile robots, Proc. ICRA'09, pp.922-927 (2009).
- 14) Drascic, D., Grodski, J. J., Milgram, P., Ruffo, K., Wong, P., Zhai, S.: ARGOS: A Display System for Augmenting Reality, Proc. INTERACT'93, p.521 (1993).
- 15) Xiong, Y., Li, S. and Xie, M.: Predictive display and interaction of telerobots based on augmented reality, Robotica, Vol.24, pp.447-453 (2006).
- 16) Conner, B. D., Snibbe, S. S., Herndon, K. P., Robbins, D. C., Zeleznik, R. C. and Van Dam, A.: Three-dimensional widgets, Proc. SI3D'92, pp.183-188 (1992).

1) Tani, M., Yamaashi, K., Tanikoshi, K., Futakawa, M., Tanifuji, S.: Object-oriented video: interaction with