

## 複合現実感技術と小型ロボットを用いたゲーム環境

杉本麻樹<sup>†</sup> 小島 稔<sup>†</sup> 中村享大<sup>†</sup>  
 富田正浩<sup>†</sup> 新居英明<sup>††</sup> 稲見昌彦<sup>†</sup>

本論文では、複合現実感技術を用いて小型ロボットとCGオブジェクトのインタラクションを実現する実世界指向のゲーム環境を提案する。複合現実環境の主体として駆動装置を持つロボットを用いることで、CGでロボットの周囲に映像の修飾を加えるのみではなく、ロボット自身の動作によって情報世界での衝突などで生じるバーチャルな力の表現を行うことが可能である。このような表現を行うことによって、実世界のロボットと複合現実環境のシームレスな融合を実現できる。

### A Game Environment Using Small Robots with Mixed Reality

MAKI SUGIMOTO,<sup>†</sup> MINORU KOJIMA,<sup>†</sup> AKIHIRO NAKAMURA,<sup>†</sup>  
 MASAHIRO TOMITA,<sup>†</sup> HIDEAKI NII<sup>††</sup> and MASAHIKO INAMI<sup>†</sup>

This paper proposes a novel game environment with Mixed Reality technologies. The environment enables an interaction between Computer Graphics objects and real robots. The Computer Graphics objects enhance the robots with visual augmentation. Furthermore, the robots can show several virtual events such as a collision by their reactions in the real environment. A seamless fusion of the robot and the Mixed Reality environment can be achieved with the reactions of the robots.

#### 1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality) 技術を用いたゲーム環境として、これまでに実世界上に重畳したコンピュータグラフィックス (Computer Graphics; CG) によって実物体への映像修飾を行うゲーム環境<sup>1)</sup>が提案されている。このようなゲーム環境において、環境内の実物体を情報世界からも制御を行うことが可能な駆動装置を持つロボットとすることにより、情報世界と実世界が互いに影響を与え合うインタラクションを実現できると考えられる。複合現実環境内においてロボットを使用することで、実物体の動作による高い現実感とCGによる柔軟性を兼ね備えたシステムを構築できることが期待される。本研究では、複合現実感技術を用いて情報世界のモデルと実世界のロボットとの同期を行い、CGとロボットが映像と動作によって相互の影響を表現する新しいゲーム環境を提案する。

図1には、本研究で構築した環境内におけるゲームの一場面を示す。提案するゲーム環境内では、ロボ

ットの位置・姿勢を計測して情報世界のモデルに反映する。このモデルに合わせてCGを投影することでCGによるロボットの修飾を実現できる。また、同じモデルに与えられた情報世界でのダイナミクスを実世界のロボットの駆動装置によって表現することで実世界と情報世界とのインタラクションを成立させることが可能である。

#### 2. 関連研究

複合現実感技術は、実世界と情報世界を重畳することによってシームレスに接続する技術である<sup>2)</sup>。この技術を用いたエンタテインメント環境の研究としては、ボード上に設置したプロジェクタとRFIDタグを埋め込んだ装置を用いた実世界投影型のゲームシステムの研究<sup>1)</sup>やARToolKitを使用して実環境の認識を行いユーザにカメラ映像を頭部装着型ディスプレイ経由で提示するビデオスルー型のシステムの研究<sup>3)</sup>が行われている。また、ウェアラブルコンピューティング技術と組合せて屋外でのシューティングゲーム環境を構築する研究<sup>4)</sup>や、スポーツと組合せて卓球台の上に設置したプロジェクタによりピンポン球の位置に合わせた映像修飾を実現する研究<sup>5)</sup>も行われている。本研究と構成が逆のゲーム環境としては、実物体の障害物

<sup>†</sup> 電気通信大学

The University of Electro-Communications

<sup>††</sup> 東京大学

The University of Tokyo



図 1 複合現実感技術と車両型のロボットを用いたゲーム環境  
Fig.1 Snapshot of the mixed reality environment with small robots.

と CG の車両を用いた Neon Racer<sup>6)</sup> の研究が行われている。

複合現実環境におけるロボットを使用した研究としては、実世界のロボットに人間の映像を合成する研究<sup>7),8)</sup> も知られている。情報世界のモデルと同期するロボットを用いた研究に注目すると、ロボットどうしを形状同期させることで遠隔通信のインタフェースとする RobotPhone の研究<sup>9)</sup> やロボットをゲーム環境に対するハプティックインタフェースとする研究<sup>10)</sup> も進められている。

本研究と同様に複合現実環境において実物体を動かすことは、Actuated Workbench<sup>11)</sup> や Proactive Desk<sup>12)</sup> などの研究で行われている。また、実物体を動かすことにより情報世界の物理モデルの表現を行う試みは PICO<sup>13)</sup> や Kobito<sup>14)</sup> の研究で行われている。これらの研究が専用のテーブル上で磁気などを用いて間接的に実物体を駆動していることに対して、本研究では、駆動装置を備えたロボットを実物体とすることで、環境側の大規模な駆動装置を不要としたシステムの構築を試みる。

環境内の実物体が駆動装置を備える場合、テーブルなどの環境側に駆動装置を備える形式<sup>11),12)</sup> と比較して、主にコストを抑えられる点で有利であると考えられる。一般的に、環境側にアレイ型の駆動装置を備えたシステムでは、実物体の可動範囲全域に駆動装置を必要とするため、広範囲に移動可能なシステムを構築すればコストが大きく増加する。また、少ないコストで広範囲に対応可能なシステムを作成した場合には、制御の精度が低下する可能性がある。一方、環境側の駆動装置がストリングなどを介して実物体を動かす形式<sup>14)</sup> のシステムでは、広範囲に移動可能なシステムを構築した場合にも、コストの増加が少ないと考えら

れる。しかしながら、この方式では、多数の実物体に対応することが難しい。

これらに対して、本研究で提案する実物体が駆動装置を備える形式では、広範囲に移動可能なシステムを構築した場合にも、実物体側の変更の必要がなく、小規模なシステムと同じコストで実物体の動作を実現できる。そして、広範囲に移動を可能とした場合でも、駆動装置の性能には変化がないため、制御の精度の低下が少ないと考えられる。この形式では個々の実物体に駆動装置が配置されているため多数の実物体への対応が容易である。さらに、ユーザは複合現実環境外でも実物体をラジコンなどの玩具のように使用することが可能である。

システム構成の自由度という側面では、環境側に駆動装置を備えたシステムでは、駆動装置自体が映像投影の妨げになるため、映像は駆動装置がない面からの投影を行う必要がある。これに対して、提案システムでは投影の妨げとなる環境側の駆動装置がないため、前面投影型のみではなく、背面投影型のプロジェクタや通常のデスクトップモニターでもシステムを構成することが可能である。

また、提案するシステムでは、駆動装置と計測装置の受光部を実物体に内蔵させているため、環境側には画像提示装置と情報処理装置、通信装置のみを備えればよい。環境側の大規模な駆動装置や計測装置を整備するコストを省略できるため、より多くの場所で簡単に使用できる可能性がある。

一方、実物体が駆動装置を備える形式で実装を行うことは、実物体の小型化という面で不利な点が生じると考えられる。しかしながら、マイクロロボットの研究の中では、EMRoS シリーズ<sup>15)</sup> のように小型のロボットの開発も行われており、十分な技術力があれば、解決可能な問題であるといえる。

### 3. システム概要

提案するゲーム環境は、主に環境の中心となるロボット、ロボット周辺に CG を投影する画像提示装置、ロボットの位置・姿勢を読み取る計測装置、環境全体を統括する情報処理装置で構成することができる。情報世界には、実世界のロボットと同期するモデルと、情報世界にのみ存在する CG オブジェクトのモデルを設定する。図 2 に実世界のロボットと同期するモデルの概念図を示す。CG オブジェクトのモデルは、障害物やミサイル、レーザなどの表現にも使用される。このようなシステムとして構成した提案環境は、以下の特徴を持っている。

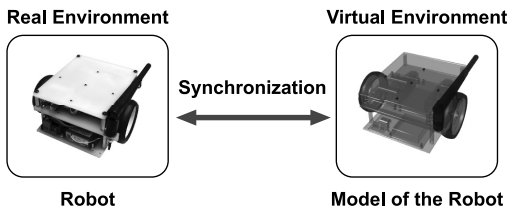


図2 実世界のロボットと情報世界のモデル  
Fig. 2 Real robot and model of the robot.

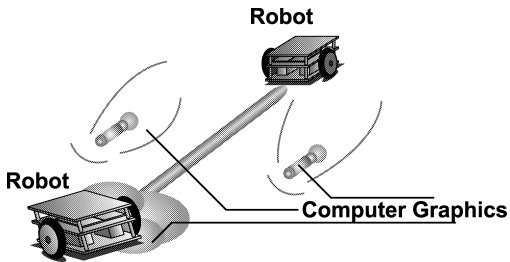


図3 CGによるロボットの修飾  
Fig. 3 Augmentation by CG.

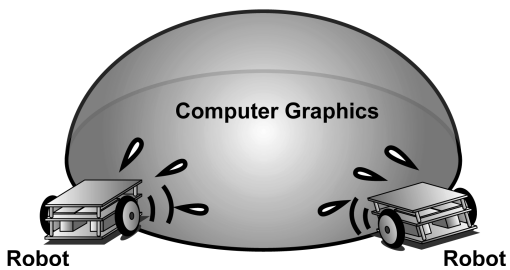


図4 ロボットの動作によるCGの修飾  
Fig. 4 Augmentation by the robots.

- CGによるロボットの修飾．
- ロボットの動作によるCGの修飾．

図3にCGによるロボットの修飾の概念図を示す．ロボットの周囲にCGを描画することによって、ロボットにバーチャルな機能を与えることができると考えられる．この特徴は、たとえばロボットが実世界では装備していないミサイルやレーザを発射したり、被弾した際に爆発したりするといった表現に用いることができる．図4にロボットの動作によるCGの修飾の概念図を示す．ユーザはロボットの動きを見ることにより間接的にCGオブジェクトとのインタラクションを理解することができると考えられる．この特徴は、たとえばロボットがCGオブジェクトとして描かれるミサイルを被弾した際にロボット自体がバーチャルな爆風によって動かされるといった表現や障害物などのCGオブジェクトとのバーチャルな衝突の表現にも用いることができる．

提案するゲーム環境上では、ユーザは直接的にロボッ

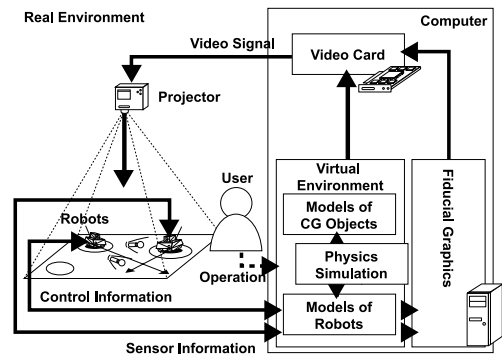


図5 システム構成  
Fig. 5 System configuration.

トを手で動かしたり、間接的にマウスやコントローラでCGオブジェクトやロボットを動かしたりすることにより、複合現実環境とインタラクションを行うことが可能である．

図5に示すシステム構成例では、実世界のロボットと同期するモデルは、計測装置からの情報と、情報処理装置から出力した制御情報によって、ロボットとの同期を実現する．同期手順の一例を図6に示す．まず、ユーザの操作命令によってロボットが物理的に動いた場合、計測装置からの情報により情報世界のロボットと同期するモデルに位置・姿勢が反映される．次に、このロボットのモデルとCGオブジェクトのモデルに対してシステムが物理シミュレーションを行い、この結果としてロボットのモデルにバーチャルな力が与えられた場合、ロボットの駆動装置を制御することで与えられた力を実世界に反映させることができる．情報世界を中心に考えると、このような双方向の同期を行うことは、情報世界のモデルを実世界のロボットを用いて実体化させるための技術と見なすことも可能である．

#### 4. 試作システム

実装を行った試作システムの詳細として、位置・姿勢計測のための画像提示、物理シミュレーション、ソフトウェア、車両型ロボット、ロボットに与えられた力の表現について述べる．

##### 4.1 位置・姿勢計測のための画像提示

環境内での計測装置としては、様々な装置が利用できると考えられるが、計測結果を情報世界の座標と同じ座標系に変換する必要がある．そこで本研究では、実世界上に情報世界の映像を投影している画像提示装置を用いた計測<sup>16)</sup>を行う．この計測手法を用いる場合、提示したCGと同じ座標系で位置・姿勢が求まる

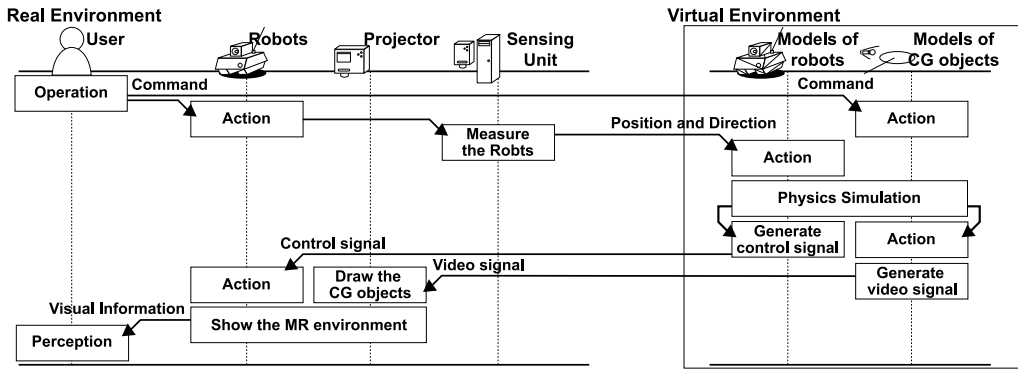


図 6 実世界と情報世界の同期手順  
Fig. 6 Sequence of synchronization.

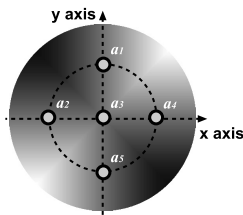


図 7 指標画像  
Fig. 7 Fiducial graphics.

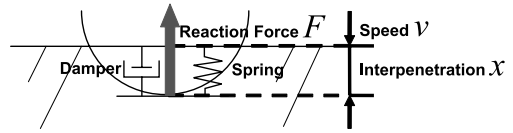


図 8 ペナルティ法のモデル  
Fig. 8 Model of a penalty method.

ため、複合現実環境を強固にすることができる。試作システムでは先行研究<sup>17)</sup>で提案した同時位置・姿勢検出指標画像を改良し、二次元平面における追従計測の安定性を向上させることを狙った指標画像を使用した。川本ら<sup>18)</sup>と筆者ら<sup>19)</sup>が同時期に提案を行った改良後の指標画像を図 7 に示す。なお、異なる計測手法ではあるが、動的な投影の切替えにより計測を容易にする手法が有効であることは、多面体追跡の研究<sup>20)</sup>などでも示されている。

図中の点は受光部のセンサ配置を示している。各センサの出力  $a_1, a_2, a_4, a_5$  から、指標画像と受光部の  $x$  軸における偏差  $dx$  は、式 (1) によって求められる。同様に  $y$  軸における偏差  $dy$  と角度の偏差  $d\theta$  は、式 (2)、式 (3) によって求められる。

$$dx \propto a_5 - a_1 \quad (1)$$

$$dy \propto a_2 - a_4 \quad (2)$$

$$\sin d\theta \propto a_2 + a_4 - a_1 - a_5 \quad (3)$$

実際の位置・姿勢計測を行う手順としては、受光部の初期位置を領域分割などの手法で検出した後、先行研究<sup>17)</sup>で提案した姿勢検出指標画像を用いて受光部の初期姿勢角を求める。その後、図 7 の指標画像を使用することで追従計測を実現することが可能である。先行研究<sup>17)</sup>で提案した同時位置・姿勢検出指標画像では、姿勢に応じて各センサの出力が同一の方向に変化

していた。これに対して、改良した指標画像では、姿勢に応じた各センサの出力を対向させることで、外乱に対して頑強な計測を実現できていると考えられる。また、改良前の指標画像では、指標画像の中心から受光部が大きすぎた場合に、指標画像周辺部において算出できる座標の正負の反転が起きたが、改良した指標画像では、指標画像のパターンの改良により、この反転を起りにくくしている。この方式の計測は、本研究のように CG と実物体の位置合わせを必要とする複合現実感技術を用いたシステムにおいては CG と実物体の位置・姿勢に関するレジストレーションが不要となるため、特に有用であると考えられる。

#### 4.2 物理シミュレーション

試作システムでは、物理シミュレーションとして、バネ・ダンパモデルを用いて衝突時に働く力を求めるペナルティ法<sup>21)</sup>を実装した。これは、物体間で衝突が起きたとき、拘束を侵した物体に侵入量に応じたペナルティとして反力を与える手法である。この力で反発運動をさせることによってモデルどうしの拘束違反を解消する。ペナルティ法は、1 ステップあたりの計算量が少なく、リアルタイムのシミュレーションには適しているといえる。

$$F = kx + bv \quad (4)$$

図 8 にペナルティ法のモデルを示す。反力  $F$  は、式 (4) により与えられる。 $k$  および  $b$  は、モデルのバネとダンパに応じて定める定数である。実装としては、ロボットのモデルに円形の当たり判定領域を与え、領

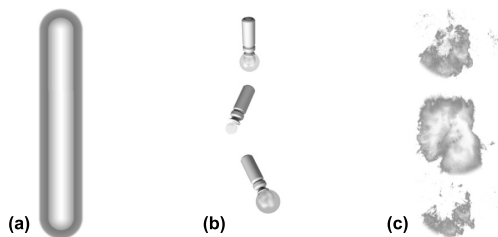


図 9 使用したテクスチャ  
Fig.9 Textures.

域が他の物体に侵入した際に計算される反力に比例して、ロボットの駆動装置を制御し、この反力を表現することとした。また、実世界の物体と同期していないCGオブジェクトなどのモデルも、設定したバーチャルな質量に応じて移動させ、この反力を表現することとした。

4.3 ソフトウェア

提案するゲーム環境を実現するため、ロボットを含んだ環境全体を統括する情報処理装置側のソフトウェアを構築した。

このプログラムでは、映像を描画するためのライブラリとして、DirectX を用いた。プログラムの中に、実世界のロボットと同期したモデルと、情報世界のみが存在するCGオブジェクトのモデルを用意し、先に述べたペナルティ法による物理シミュレーションを実装した。また、アプリケーションとして、ユーザのコントロールによる簡単な対戦型のゲームを可能とするため、小型ロボットの位置・姿勢に合わせて攻撃武器と爆発などに相当する効果を映像での修飾により与えることとした。

各ロボットにはライフゲージを設定し、被弾するごとにこのライフゲージの減算を繰り返し、いずれか1台のロボットのライフゲージが完全になくなった時点でゲームが終了するように実装を行った。

図9にロボットの拡張機能を表示するために使用した画像を示す。図9(a)はレーザー、図9(b)はミサイル、図9(c)は爆発を表現するために用いた。プログラム中ではこれらをポリゴンに貼り付けるテクスチャ画像として取り扱った。

4.4 車両型ロボット

図10に試作システムで使用した小型の車両型ロボットの外観を示す。ロボットの前面に投影されている矢印はロボットの姿勢を表示している。この小型ロボットのブロック図を図11に示す。小型ロボットは、位置・姿勢計測のために画像提示装置から投影された映像信号を受光して処理する計測部と、モータを制御して装着された2つの車輪でロボット自体を動かす動力



図 10 試作システムで使用したロボット  
Fig.10 Robots used in this experimental system.

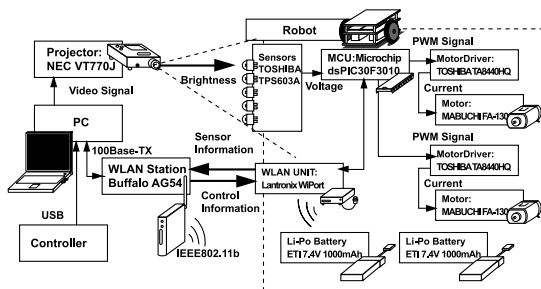


図 11 ブロック図  
Fig.11 Block diagram.

部からなる。計測部と動力部の制御を行うためにマイクロコントローラユニット (Micro Controller Unit; MCU) Microchip dsPIC30F3010 を搭載している。

計測部には、指標画像を読み取るためのフォトトランジスタとして、東芝 TPS603A 5 個を配置している。MCU は IEEE802.11b に準拠した無線 LAN 通信ユニット Lantronix WiPort を介して、受光した情報の送信と制御に必要な情報の受信を可能な実装とした。MCU の受光した情報の読み取りと PC への情報の送信タイミングは PC 側からの指令に基づきビデオカードの映像更新タイミングに同期している。動力部は、パルス幅変調方式の信号でモータドライバ東芝 TA8440HQ 2 個を制御している。ロボットには電源として、7.4 V 1,000 mAh のリチウムポリマバッテリーを 2 個搭載しており、PC とロボット間の無線化を実現している。

4.5 ロボットに与えられた力の表現

試作システムで用いた小型ロボットは左右 2 つの車輪を備えるノンホロノミック車両であるため、移動可能な方向はロボットの向いている方向によって制約されている。情報世界での物理シミュレーションによって与えられたバーチャルな力を表現するためには、力

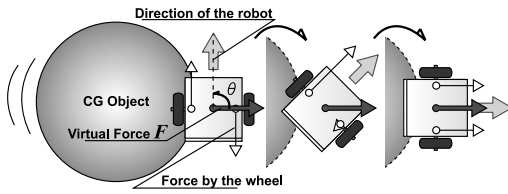


図 12 側面からの衝突

Fig. 12 Lateral collision.

を左右両輪の駆動装置への指示値に変換を行う必要がある。バーチャルな力  $F$  が与えられたとき、左右両輪のトルク  $N=(N_L, N_R)$  は、与えられた力  $F$  の向きと車両の進行方向のなす角  $\theta$  から式 (5)、式 (6) で求めることとした。式 (5)、式 (6) は、アナログジョイスティックの入力などのベクトルに合わせて 2 輪のロボットを制御する際などにも使用される簡素な式である。図 12 に側面からの衝突の概念図を示す。

$$N_L \propto \|F\| \times (\cos \theta + \sin \theta) \quad (5)$$

$$N_R \propto \|F\| \times (\cos \theta - \sin \theta) \quad (6)$$

実物体を用いたバーチャルな力の表現は、主に力覚や触覚の提示装置の研究<sup>22)</sup>で行われてきた。これらの研究では、提示装置の自由度を利用して、正確にバーチャルな力を再現することが試みられている。

一方、本研究で用いる車両型ロボットは、ノンホロノミックロボットであり、側面から与えられた力に応じて正確に制御を行うことが難しい。そのため、この実装では、式 (5)、式 (6) を用いることにより、力の与えられた角度に応じて並進方向の力を、回転方向の力へと変換している。制御目標に応じてノンホロノミックロボットの並進と回転の力を定めるアプローチは、車両の軌道制御<sup>23)</sup>などでも用いられている。この実装では、従来の研究のように情報世界で物理計算した力の正確な表現を試みるのではなく、力を変換して表現することにより制約条件のあるロボットでのバーチャルな物体とのインタラクションの実現を試みている。

## 5. 実験

提案環境内でロボットの初期姿勢によらず CG オブジェクトとロボットとのインタラクションが実現できていることを確認するため、静止しているロボットに CG オブジェクトを衝突させる実験を行った。

本来、全方向に移動できるホロノミックなロボットを用いる場合、情報世界で与えられた力にそのまま比例して駆動装置を制御すれば容易に衝突で与えられた力を表現することができる。しかしながら、ホロノミックなロボットは特殊な機構が欠かせず一般には普及していない。一方、試作システムで用いるような姿勢に

よって移動可能な方向が制限されるノンホロノミック車両は、玩具やロボットなどでも一般的である。このようなロボットで CG とのインタラクションを実現できることは提案するシステムの汎用性を考えるうえで重要である。

### 5.1 実験方法

実験では、ロボットと CG オブジェクトに、それぞれ半径 100 [mm] と半径 175 [mm] の円形の当たり判定領域を与えた。ロボットの位置から X 軸にずれた位置を CG オブジェクトの初期位置とし、衝突する CG オブジェクトの進行方向と衝突前のロボットの初期姿勢のなす角を  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  として 3 回の実験を行った。CG オブジェクトを X 軸に沿ってロボットに衝突するように動かし、ロボットが投影面の端に近づいたところで CG オブジェクトを止めた。CG オブジェクトの進行方向とロボットの初期姿勢が  $90^\circ$  の実験の様子を図 13 に示す。

### 5.2 実験結果

実験結果を図 14、図 15、図 16 に示す。図にはロボットと CG オブジェクトの位置 X、Y と、ロボットの姿勢、ロボットと CG オブジェクトの距離を示した。位置と姿勢は、それぞれ衝突を開始した瞬間のロボットの位置・姿勢を基準とした相対値で示している。各衝突実験の結果では、CG オブジェクトの移動にともない CG オブジェクトとロボットの中心どうしの距離が小さくなり、距離が 0 [mm] で衝突が始まる。本来、剛体どうしの衝突の場合、物体に別の物体が侵入することはないが、ペナルティ法のシミュレーションを行う場合には侵入量に応じて反力を計算するため必ず侵入が起こる。実験でも中心どうしの距離は、0 [mm] 以下に縮まり、CG オブジェクトとロボットが接触している間はほぼ一定の距離を保つ。この間にロボットは、CG オブジェクトに押される形でほぼ X 軸に沿って移動を行っている。投影面の端が近づいたところで、CG オブジェクトを停止させているが、この後、ロボットには実世界での慣性が働いているため、距離が 0 [mm] 以上に広がり、衝突が終了している。

### 5.3 考察

図 14 に示した CG オブジェクトの進行方向とロボットの初期姿勢が  $0^\circ$  の衝突では、ロボットは CG オブジェクトの進行方向と同じ向きを向いているため、衝突を表現するために方向を変える必要がない。したがって、ロボットの姿勢はほぼ変わらず、衝突に応じて X 軸に沿った移動が行われている。ロボットがすぐに移動を開始できるため、CG オブジェクトとロボットの衝突初期に現れる距離の落ち込みは小さい。

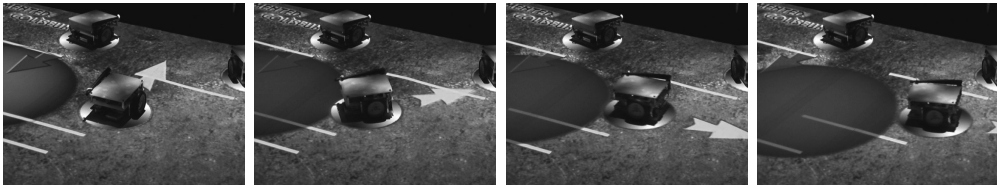


図 13 衝突のシーケンス画像  
Fig. 13 Sequence image of a collision.

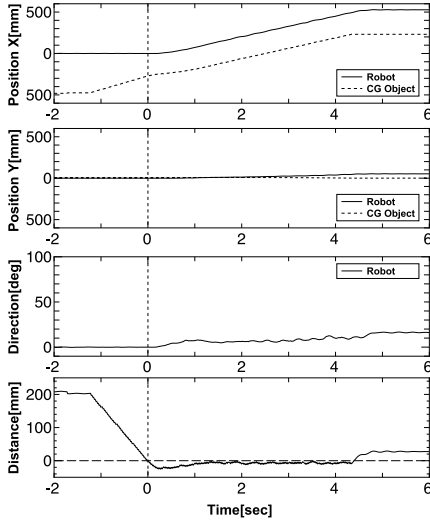


図 14 0°での衝突  
Fig. 14 Angle 0 (deg).

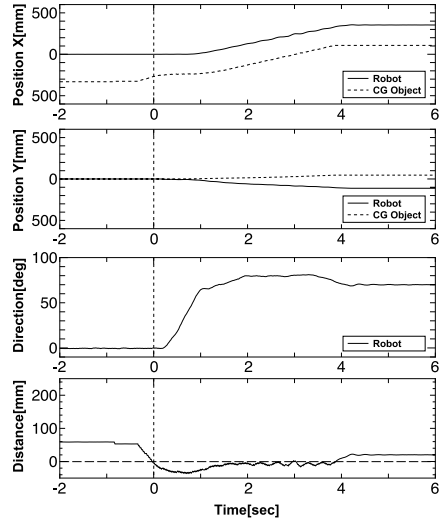


図 16 90°での衝突  
Fig. 16 Angle 90 (deg).

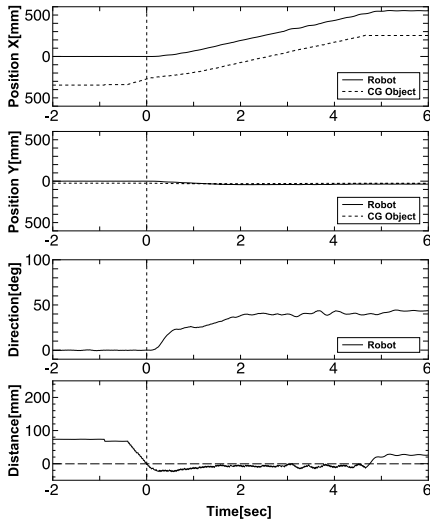


図 15 45°での衝突  
Fig. 15 Angle 45 (deg).

図 15 に示した CG オブジェクトの進行方向とロボットの初期姿勢が 45° の衝突では、ロボットは CG オブジェクトの進行方向と異なる方向を向いているため、衝突開始後、加えられたバーチャルな力に合わせ

て姿勢を変化させながら、移動している様子が見える。旋回開始と移動開始は、ほぼ同時であり、衝突初期に現れる距離の落ち込みも、ほぼ図 14 と同じである。これは衝突の初期から車両の中心の移動をとまなう信地旋回を行っているためだと考えられる。

図 16 に示した CG オブジェクトの進行方向とロボットの初期姿勢が 90° の衝突では、ロボットは CG オブジェクトの進行方向と完全に直行する方向を向いているため、衝突開始後、加えられたバーチャルな力に合わせて大きく姿勢を変化させている。この衝突においては、ロボットの旋回開始と移動開始の間の時間差がほかの結果に比べて大きくなっている。これは、衝突開始直後は、車両の中心の移動をとまわない超信地旋回を行い、ロボットの姿勢が十分に変わった後に信地旋回に移行して移動が始まっているためだと考えられる。超信地旋回を行っている間も CG オブジェクトは動いているため、ほかの初期姿勢の実験結果と比較して衝突初期に現れる距離の落ち込みが大きく、CG オブジェクトとロボットの判定領域の侵入量が最大になっている。

いずれの結果でも、衝突開始後も CG オブジェクト

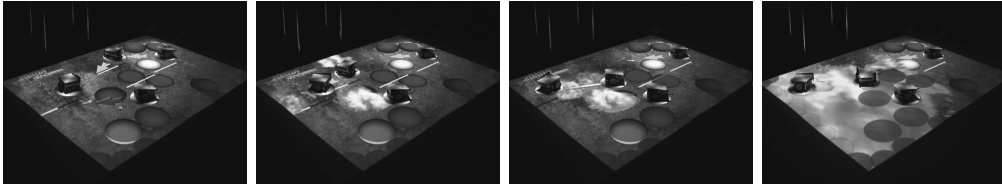


図 17 CG によるロボットの修飾の様子

Fig.17 Visual augmentation by the CG objects.

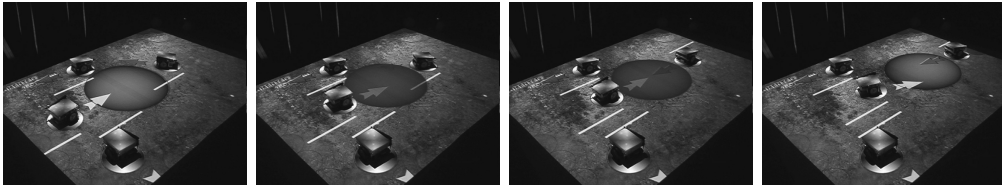


図 18 CG オブジェクトを介したロボットどうしのインタラクション

Fig.18 Interaction between the robots via the CG objects.

を動かし続けた結果、CG オブジェクトとロボットの距離は、ほぼ一定となり、位置の変化から同一の速度に達していることが読み取れる。ロボットの初期姿勢が異なっている場合でも、衝突の初期には若干の挙動の差はあるが、ノンホロノミックロボットの駆動装置を制御してバーチャルな衝突を表現することができている。一方で、この実装で用いたロボットでは側面からの力を並進によって表現することはできないため、与えられた力とロボットの初期姿勢のなす角の関係によってはロボットの移動が始まるまでに時間遅れが見られる場合がある。しかしながら、時間遅れが生じている間も、この力を回転として擬似的に表現することによって、ユーザに対してロボットに何らかの力が加わったということを提示できている。

このような表現を行うことによるゲーム性の変化に着目すると、式 (5)、(6) で提案した力の表現を行う場合、ロボットの姿勢が与えられた力の方向に応じて変わってしまうという問題がある。たとえば、前進または後退している状態のロボットに、側面からの攻撃によるバーチャルな力が加わった場合、その場で回転を始めてしまう。このような挙動は、ユーザが意図どおりロボットを操作できなくなったと感ずる可能性がある。ユーザの操作に応じて、攻撃で与えられた力の表現を適度に抑制するといった実装も、この問題の 1 つの解決方法であると考えられる。

## 6. 環境内でのインタラクション

本研究では、実世界上に映像投影を行う形式の複合現実環境において、実物体として駆動装置を持つロボットを用いることにより実世界と情報世界とのシー

ムレスな融合を実現するゲーム環境を構築した。図 17 に、この環境で実装した対戦型のゲームにおいて、CG がロボットの修飾を行っているシーケンス画像を示す。本来、ロボットは物理的に実装した機能しか持つことができないが、提案環境内では CG での修飾により、ロボットにゲームに必要な拡張機能を与えることができています。さらに、爆発などの情報世界における事象に合わせてロボットが動作することにより、高い現実感を提示することができています。

環境内においては、ユーザはこの対戦型のゲームを体験できるだけでなく、以下に示すようなロボットを通じたインタラクションを体験することができる。

### 6.1 CG オブジェクトとロボットのインタラクション

図 18 に円形の CG オブジェクトを介して一方のロボットが他方のロボットを押しているシーケンス画像を示す。ロボットが CG オブジェクトと衝突を行うことによって、ゲーム環境に変化を加えることができる。障害物となる CG オブジェクトをロボットで押して移動させ、障害物を使った駆け引きなどを行うことも可能である。また、ロボットどうしが CG オブジェクトを介して互いを間接的に押し合うといったインタラクションも可能となっている。

### 6.2 ロボットどうしのインタラクション

図 19 に環境内におけるロボットどうしの直接インタラクションのシーケンス画像を示す。実世界のロボットと同期するモデルに対して物理シミュレーションを行っているため、実世界のロボットどうしでも情報世界のモデルを介したインタラクションを行うことができる。ロボットどうしが体当たりを試みた場合にも、



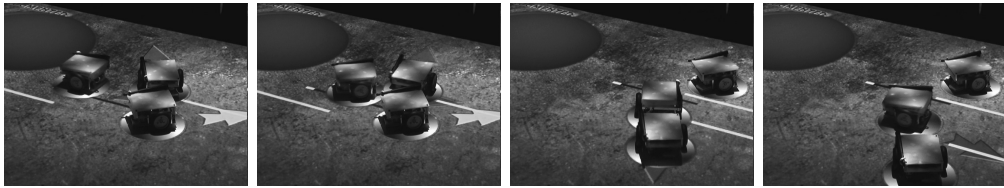


図 19 ロボットどうしの直接インタラクション  
Fig.19 Direct interaction between the robots.



図 20 ユーザとのインタラクション  
Fig.20 Interaction between this environment and the users.

実世界での衝突より前にモデルどうしでの物理シミュレーション結果に応じてバーチャルな反力を与えられているため、ロボットの物理的損傷を回避させることができている。

### 6.3 ロボットを介したユーザと複合現実環境のインタラクション

図 20 にユーザがロボットを持って CG オブジェクトとロボットを押しているシーケンス画像を示す。ユーザもコントローラを使用してロボットを操縦するだけではなく、ロボットを手に持つことでも直接的に CG オブジェクトやロボットとインタラクションを行うことができている。

## 7. 今後の課題

試作したシステムを用いることで、実世界の車両型のロボットと情報世界の CG オブジェクトにインタラクションを行わせることができた。一方で、実世界のロボットと情報世界のモデルを同期させる手法は、単純な車両型のロボットだけでなく、動物型や人型などの様々な形態のロボットに適用可能である。動物型や人型のロボットを用いる場合、車両型のロボットを用いる場合と比較してロボットの身体動作による多様な表現を行うことが可能である。今後は車両型以外のロボットを用いたゲーム環境の構築も試みたいと考えている。

## 8. おわりに

本研究では、複合現実感技術を用いて実世界のロボットと CG オブジェクトがインタラクションを行えるゲーム環境を提案し、車両型のロボットを用いて実

装を行った。提案環境では、画像提示装置を用いた位置・姿勢計測、ペナルティ法による物理シミュレーション、ノンホロノミックロボットでの力の表現を組み合わせることで、実世界のロボットと CG オブジェクトとのインタラクションを可能とした。このようなシステムを制作することで、実世界のロボットを含めた新しいゲーム環境を実現できた。

## 参考文献

- 1) 杉本雅則, 楠 房子, 橋爪宏達: 物理世界と仮想世界を融合することによるデジタルボードゲーム, 中山隼雄科学技術文化財団平成 14 年度財団レポート (第 10 号) (2002).
- 2) Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. and Kishino, F.: Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, *SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies*, pp.282-292 (1994).
- 3) 加藤博一, Billingham, M., Poupyrev, I., 鉄谷信二, 橋啓八郎: 拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース, 芸術科学会論文誌, Vol.1, No.2, pp.97-104 (2002).
- 4) Thomas, B.H. and Piekarski, W.: Making augmented reality outdoor games: why is it hard? In *Production Process of 3D Computer Graphics Applications - Structures, Roles and Tools.*, *ACM SIGGRAPH and Eurographics Campfire* (2002).
- 5) Ishii, H., Wisneski, C., Orbanes, J., Chun, B. and Paradiso, J.: PingPongPlus: Design of an Athletic-Tangible Interface for Computer-Supported Cooperative Play, *Proc. CHI '99*, pp.394-401 (1999).

- 6) Litzlbauer, W., Stuppacher, I., Waldner, M. and Weilguny, M.: Neon Racer: Augmented Gaming, *10th Central European Seminar on Computer Graphics; CESC 2006* (2006).
- 7) Tachi, S., Kawakami, N., Inami, M. and Zaitzu, Y.: Mutual Telexistence System Using Retro-Reflective Projection Technology, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol.1, No.1, pp.45–64 (2004).
- 8) Shoji, M., Miura, K. and Konno, A.: U-Tsu-Shi-O-Mi: The Virtual Humanoid You Can Reach, *SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies* (2006).
- 9) Sekiguchi, D., Inami, M. and Tachi, S.: ROBOTPHONE: RUI for Interpersonal Communication, *CHI2001 Extended Abstracts*, pp.277–278 (2001).
- 10) 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).
- 11) Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces, *Proc. Symposium on User Interface Software and Technology 2002*, Vol.2351, pp.181–190 (2002).
- 12) Noma, H., Yoshida, S., Yanagida, Y. and Tetsutani, N.: The Proactive Desk: A New Haptic Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor, *Presence*, Vol.13, No.2, pp.146–153 (2004).
- 13) Patten, J., Alonso, J. and Ishii, P.H.: PICO (2004).  
<http://tangible.media.mit.edu/projects/pico/>
- 14) Aoki, T., Mitake, H., Ayukawa, R., Kuriyama, T., Kawase, T., Matsushita, T., Toyama, T., Ichikawa, H., Asano, K., Matumura, I., Iio, Y., Hasegawa, S. and Sato, M.: Kobito – Virtual Brownies, *SIGGRAPH 2005 Full Conference DVD-ROM Disk1 Emerging Technologies* (2005).
- 15) 宮澤 修, 小池信宏: 自律自走ロボット「ムッシュ君」の開発, *日本時計学会誌*, No.146, pp.42–50 (1993).
- 16) 杉本麻樹, 新居英明, 稲見昌彦: Projector-based Tracking System, 第 47 回自動制御連合講演会, CD-ROM (2004).
- 17) 杉本麻樹, 小島 稔, 中村享大, 新居英明, 稲見昌彦: 画像提示装置で表示した指標画像を用いた位置・姿勢計測, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.10, No.4, pp.485–494 (2005).
- 18) 川本 海, 蔵田武志, 酒田信親, 大隈隆史, 葛岡英明: 光センサと加速度計を用いたタグの位置・姿勢計測に基づくタンジブルテーブルトップインタフェース, *情報処理学会第 118 回ヒューマンインタフェース研究会* (2006).
- 19) 小島 稔, 児玉和樹, 中村享大, 杉本麻樹, 稲見昌彦: Display-Based Computing の研究第五報: ライトペンの試験的実装, *情報処理学会第 118 回ヒューマンインタフェース研究会* (2006).
- 20) 三田雄志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士: 投影パターン of 戦略的変更による多面体追跡, *情報処理学会論文誌*, Vol.39, No.6, pp.1953–1964 (1998).
- 21) Moore, M. and Wilhelms, J.: Collision Detection and Response for Computer Animation, *Computer Graphics*, Vol.22, No.4, pp.289–298 (1988).
- 22) Murayama, J., Luo, Y., Akahane, K., Hasegawa, S. and Sato, M.: A Haptic Interface for Two-Handed 6DOF Manipulation: SPIDAR-G&G System, *IEICE Trans. Information and Systems*, No.6 (2004).
- 23) Sugawara, T. and Murakami, T.: An approach to absolute position control of mobile robot by PSD based robust control, *IECON '03, The 29th Annual Conference of the IEEE*, Vol.3, pp.2053–2058 (2003).

(平成 19 年 1 月 22 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



杉本 麻樹 (正会員)

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。2006 年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修了。博士(工学)。2002 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として、東京大学大学院情報学環研究補佐員を経て日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部客員研究員。2004 年から 2007 年まで日本学術振興会特別研究員。現在、電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教。画像提示装置を用いた計測と制御の研究に従事。



小島 稔

2005年電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。2007年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修了。現在、サイボウズ株式会社に在籍。画像提示装置と小型ロボットを用いた複合現実感技術の研究に従事。



中村 享大

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修了。現在、株式会社東京アールアンドデーに在籍。画像提示装置を用いた計測の研究に従事。



富田 正浩 (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小型ロボット制御の研究に従事。



新居 英明 (正会員)

1995年東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程制御工学専攻修了。同年株式会社トキメック入社。2003年4月同社退社。2003年から2006年まで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在籍。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助教。情報投影技術を利用したヒューマンインタフェースの研究に従事。



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、JST さきがけ研究者、MIT コンピュータ科学・人工知能研究所客員科学者を経て、現在、電気通信大学知能機械工学科教授。ロボット、バーチャルリアリティ等インタラクティブ技術に関する研究に従事。情報処理学会山下記念研究賞、同学会論文賞、日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞、同学会論文賞、同学会貢献賞、IEEE Virtual Reality Best Paper Award 等受賞、日本バーチャルリアリティ学会、ACM、IEEE Computer Society 等各会員。