

# 原著論文

## 保持型ロボティック ユーザインタフェースの研究†

清水 紀芳\*1・小泉 直也\*1・杉本 麻樹\*1・新居 英明\*1・  
関口 大陸\*2・稲見 昌彦\*1\*3

従来ロボットは製造業等の現場において人の身代わりとして何らかの作業を行うという目的で研究が進められていた。これに対し UI としてロボットを用いる概念が RUI-Robotic User Interface-として提案されている。本研究では RUI を使用した、身体性を持った保持型の力覚提示装置を提案する。また、RUI を通して情報世界とインタラクションするためのシステムの試験的な実装を行った。

キーワード：ロボティックユーザインタフェース、触覚提示、エンタテインメント、バーチャルリアリティ

### 1. 序論

現在、パーソナル・コンピュータではグラフィカルユーザインタフェース(GUI)が広く用いられている。それに対し近年では、GUIとは異なる新たな形のインタフェースとして、我々人間が生活している実世界のメリットを生かしつつ情報世界とシームレスに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[1][2]。

一方ロボットは、作業の効率化やオートメーション化を狙った産業用ロボットや、人にとって過酷で危険な環境下においてなんらかの作業を行わせる極限環境ロボットといったように、「人の代わり」として何らかの作業を行うという目的で研究が進められてきた。しかし近年、ロボットが人にとって身近なものとなり、ペットロボットやヒューマノイド、介護ロボットといったように、「人に働きかける」ことを目的とした人間共存型のロボットが登場している。

このロボットは身体性を有するコンピュータであるのととらえることができる[3]。この身体の物理存在自体が圧倒的な存在感となるとともに、身体を用いた物理的相互作用を通し、実世界に対し大きな影響力を発揮することができる。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とらえた概念がロボティックユーザインタフェース(RUI)として提案されている[4]。RUIを用いることにより、実世界に対しての入力と出力を兼ね備えた実世界指向のユーザインタフェース環境を構築できると考えられている。

また RUI は、ヒューマノイド(人型ロボット)を利用したインタフェース、直感的なインタラクションデザイン、身体性を有した提示装置、といった3つの点に関して新規性を有する。

#### ・ヒューマノイドを利用したインタフェース

従来のヒューマノイドは数十 cm から人と同等サイズといったものであり、自律、他律で動作を行わせるためのものであった。これに対し RUI は、ヒューマノイドを人と同様の身体性を持ったインタフェースとして利用する。操作者はヒューマノイドを手で持ちながら、ヒューマノイドの手足等を動かして入力を行い、それと同時にヒューマノイド自体の動作から出力を得る。よって RUI に用いるヒューマノイドは、人の手で持つことができるサイズであり、人の手で楽に操作が可能であるバックドライバビリティを有する必要がある。このような UI として使用する目的で設計されるヒューマノイド自体、新規性を有するものと言える。

#### ・直感的なインタラクションデザイン

人が情報世界とインタラクションを行う際の入力方法は大きく分けて二種類ある。まず、格闘ゲームやロールプレイングゲーム等に見られるような、情報世界内のアバタをジョイスティックやジョイパッド等を用いて操作し、アバタを通して間接的に入力を行う方法、もう一つは EyeToy™[5]に見られるような、人の身体動作を用いて直接的に入力を行う方法である。人に対しての出力方法としては、直接人の視覚・聴覚に訴えかけるものが主である。また、フォースフィードバック

† Teddy bear-like Robotic User Interface  
Noriyoshi SHIMIZU, Naoya KOIZUMI, Maki SUGIMOTO, Hideaki NII, Dairoku SEKIGUCHI, Masahiko INAMI

\*1 電気通信大学大学院 電気通信学研究科 知能機械工学専攻  
Graduate School of The University of Electro-Communications

\*2 東京大学大学院 情報理工学系研究科  
School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*3 科学技術振興機構 さきがけ  
Japan Science and Technology Agency

クと呼ばれる触覚に対する出力は、エンタテインメント分野においてはジョイスティックの振動や抵抗感といった提示しか実現されておらず、我々が日常作業で手がかりとしている触覚情報とは遙かにかけ離れていた。これに対し RUI では、情報世界に存在する人型のアバタと同形状の身体性を持った RUI を現実世界に用意し、RUI とアバタとで形状同期を行わせる。この RUI を操作することで、人は情報世界に対しての入力が可能となると同時に、情報世界のアバタと同期した RUI 自身の動作による出力を得ることができる。また、自己の身体像を外在させたものと言える RUI を入出力装置に利用することで、人が成長過程において獲得する身体図式を用いた直感的な入力、RUI 自身の動作による視覚・触覚情報の提示、といったことを可能とする。

- ・身体性を有した提示装置

RUI は身体性を持つがゆえに、自己を投射した身体像とみなすことができる。このため RUI を通して人に対して触覚提示を行うということが可能となる。人に対する従来の触覚提示方法としては、人の体に装置を装着させたり人が装置を手で把持して操作するなどして、人の体に対して直接的に力の大きさや方向を提示するという方法であった。これに対し RUI は、人が手で保持し、操作している RUI 自身の動作を用いることで間接的に人に対して触覚提示を行うことができる。更に RUI は身体性を持つため、人の身体図式や触覚を利用し、操作者は RUI を見ることなく保持している手の感覚によって RUI の形状情報を得ることができ、また RUI 自身の動作や形状という視覚情報を眼から得ることでアバタの状態を知ることが可能である。つまり RUI は触覚提示装置でありながら、形状提示、視覚提示も可能とする提示装置であると言える。

このようにヒューマノイド（人型ロボット）を用いた RUI は、物理世界との相互作用が可能、ロボットの形状や動作による視覚的な情報提示、ロボットから人に力を加えることによる力覚的な情報提示、人の側が直接ロボットに触れて形状を変化させることによる指示入力、といった特徴を持つ。

本研究では、従来存在するような「装着型」、「把持型」、「遭遇型」の力覚を提示するインタフェースとは異なり、RUI を使用した身体性を有する保持型の力覚提示装置を開発する。また、力覚提示装置としての RUI をエンタテインメント分野で利用するために必要な、物理モデルを組み込んだアプリケーションの開発を行う。

つまり、RUI をインタフェースとして使用したエンタテインメント的アプリケーションの試験的実装を目的とする。

## 2. 保持型ロボティックユーザインタフェース

保持型ロボティックユーザインタフェースとは、操作者が両手で人型ロボットを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える身体性を有したインタフェースである。

この保持型 RUI について GUI と対比し、具体的に説明する。GUI では入力としてマウスやキーボードを用い、出力としては入力の結果がグラフィックとしてディスプレイに表示される。これに対して RUI における入出力方法は、ロボットを人が動かすことが入力となり、ロボット自身が動作することが出力になるという、入出力にロボットを用いたものである。つまり、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が GUI だとすると、人間が成長の過程において、より早期に獲得する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のが RUI であるといえる。

エンタテインメント的なアプリケーションにおいて、GUI と RUI のどちらが適しているかを考える。先に述べたように GUI は言語やシンボル操作を主としたものであり、マウスやキーボード等のインタフェースを使用した場合には、デスクトップ上のファイル等をマウスで選択して開き、キーボードを用いて文章を書く、といったようなデスクワークに関するアプリケーションが適していると考えられる。一方 RUI は、身体図式や身体像を用いた動作的表象を主としており、身体性を持った人型のロボットをインタフェースとして使用する。よって、ゲーム内に操作者のアバタが存在しており、それを操作するといった現在のほとんどのゲームにおいて、人型ロボットを使用することで直感的な入力、触覚・形状・視覚情報の提示といったことが可能となる。よって GUI と比較すると RUI のほうがアバタベースのエンタテインメント的なアプリケーションに適していると考えられる。

RUI をエンタテインメント的なアプリケーションに使用した場合として、ボクシングゲームにおいて既存のゲームインタフェースと RUI を用いた場合を想定する。

表 1 GUI と RUI

	GUI	RUI
入力	マウス・キーボード	ロボットを動かす
出力	ディスプレイ	ロボットの動作・形状
アプリケーション	デスクワーク	エンタテインメント
メタファ	デスクトップ	人の身体

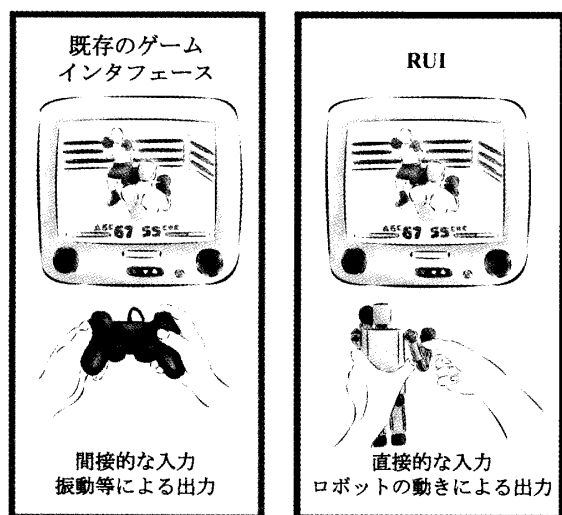


図1 既存のゲームインタフェースと RUI

既存のゲームインタフェースでは、ゲームの中のキャラクタを動かす場合には十字キーなどを押して動作させる。また、パンチやガードといった動作をキャラクタに行わせる場合は、その動作に相当するボタンを押すことになる。これより既存のゲームインタフェースを用いた場合には、間接的な入力によって操作しているということがわかる。出力としては、ゲーム内の自分のキャラクタが敵キャラクタに殴られた時に、インタフェースが振動するといったものが考えられる。

一方 RUI では、ゲーム内のキャラクタと同形状のロボットを用意し、キャラクタとロボット間において形状同期を行う。これにより、キャラクタにパンチなどの動作を行なわせたい場合には、人がロボットをそのように動かすことによって、直接的にキャラクタの動作を指示入力することができる。また、出力には振動といった提示だけでなく、キャラクタが敵キャラクタに顔などを殴られた場合は、ロボット自体のその殴られた所と同じ箇所が動作する。これにより、ロボット自体の動作やモーションによる視覚的な情報提示といったことも可能となる。

格闘ゲーム、ロールプレイングゲーム、アクションゲーム等、現在のゲームのほとんどは操作者自身のアバタを操作するものである。このようなアバタを用いるゲーム全てに対して RUI は、直接アバタを操作するための入出力装置としての利用や、現状のインタフェースを補完する形での利用が可能である。また、コミュニケーションを含む MMORPG 等ネットワーク型エンタテインメントといったものに対しても RUI を使用することで、ジェスチャや触覚を伴うコミュニケーションを可能とする。

次に、RUI を力覚提示装置として使用した場合と既

存の力覚提示装置との違いについて述べる。力覚を提示するインタフェースとして、PHANToM[6]や SPIDAR[7]などがある。PHANToM とは、指に装着した状態で操作し、バーチャルリアリティ空間内の物体に触れると、装置に仕込まれたアクチュエータが人間の運動を拘束することで、そこに物体があるという感覚を作り出す。SPIDAR は、四つの支点からプーリーを経由して直線的に張られた四本の糸が取り付けられたリングを指にはめて操作する装置であり、糸が抵抗して反力が伝わる仕組みである。これら以外にも様々な力覚提示装置が存在するが、それらは前述の通り大別して、「装着型」、「把持型」、「遭遇型」といった三つの型に分類することが可能である。上で触れた PHANToM と SPIDAR は装着型に分類される。

RUI を用いることで、既存の PHANToM や SPIDAR など「装着型」、「把持型」、「遭遇型」に分類される力覚提示装置とは違った、身体性を有した「保持型」の力覚提示装置が開発出来る。RUI を力覚提示装置として使用した場合、従来の力覚提示装置との間には次のような違いが存在する。考えられる点は以下の三つである。

一つ目は、力覚の提示方法である。従来では人の体に装置を装着させたり人が装置を手で把持して操作し、人の体に対して直接的に力の大きさや方向を提示する。一方 RUI では、身体性を有した装置を人が手でもって操作し、RUI 自体の動きを通じて持っている人に対して力を提示する。つまり RUI では、従来のように直接的ではなく間接的に力覚が提示される。

二つ目は、VR 空間とのインタラクションの方法である。従来では人自身が直接的に実世界と同サイズの VR 空間にインタラクションするものであった。だが RUI では、RUI を VR 空間内に存在させ、その RUI を人間が操作することでインタラクションする。

三つ目は、力覚提示装置で使用するアプリケーションの違いである。従来のものであれば、その装置の形状・使用法に沿ったアプリケーションを実行するしかなかった。つまり、装置がペン型となっていればペンとして VR 空間にインタラクションするのみであった。対して RUI では、人間を投影した RUI アバタが VR 空間に存在し、その RUI アバタに様々なツールを持たせることも可能である。これによって一つの装置に対して様々なアプリケーションを用意することができ、装置としての汎用性が高いことがわかる。

これら力覚提示方法と VR 空間に対するインタラクション方法、装置の汎用性が、従来の力覚提示装置と RUI を力覚提示装置として使用する上での大きな違いであると考えられる。

### 3. RUI 構成

力覚提示装置として使用可能なロボティックユーザインタフェース-RUI-として, RobotPHONEがある[8]. RobotPHONEは対称型のマスタースレーブ制御を用いることで, 遠隔地に離れた二対の RobotPHONEを繋いで形状同期を行うことができるものである.

この RobotPHONE を用いることで, 遠隔地の人同士がお互いに力を伝え合ったり, ジェスチャを用いたコミュニケーションを可能とする.

この RobotPHONE に対して今回製作する RUI は, 実世界に存在する RUI と, PC 内の物理モデル世界に存在する RUI アバタとを繋いで形状同期を行うもの, と言うことができる.

「保持型」の RUI は, 操作者が RUI を両手で持ちながら操作し, 情報世界とインタラクションを行うためのものである. このために最低限必要な自由度を満たすものとして, 上半身のみで片腕が2自由度, 両腕で合計4自由度と設定した.

RUI はアバタと形状同期を行うものであり, RUI の

関節角の検出と関節の駆動を行うことが必要である.

今回は, 関節角検出用のポテンショと関節駆動用のモータが一つのユニットとして構成されているサーボモータを改造して利用することで, 簡単な機構での実装を可能とした.

また, 今回の保持型 RUI は両手で持ちながら RUI の関節を動かして操作すると同時に, RUI を持っている手を通して人は触覚や形状情報を得ることができ, RUI 自身の形状や動作を目で見ることで視覚情報を得ることができる. よって, 関節動作時に抵抗が少なくバックドライバビリティを有するサーボモータを選択, RUI の操作性や身体性を失わないように全体の各パーツの寸法を設定, 外観を考慮して機構を縫いぐるみ内に内蔵させるといった実装を行った.

RUI の各関節には市販の小型ラジコンサーボ(GWS製 MICRO-MG) を改造したポテンショ内蔵の小型ギアドモータを使用した. そのモータは, 駆動用に自作のサーボ回路を使用して PWM 駆動とし, ワンボードマイコンを使用して制御を行う. そして, RUI と PC 内の RUI アバタは, ポテンショの値を利用して各関節を動作させ, 形状同期を行う.

今回製作した RUI の寸法等の仕様は次の通りである. 腕パーツの長さが94mm, 体の幅が76mm, 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267mm, 腕の関節から先端まで(腕関節のサーボヘッドの中心から腕パーツの先端まで)の長さが70mm となっている. また, 重量は260g, 各関節のモータの減速比は410分の1, 提示可能反力は6.4kgf・cm となっている. 操作者が RUI の関節を曲げるときに必要なトルクは測定の結果, 0.69kgf・cm であった. 若干, 操作時に重さを感じるものの大人から子供まで十分操作可能なバックドライバビリティであると考えられる.

RUI は操作者に対して力覚提示を行えるものである. 実際に製作した RUI においてどの程度の力提示が可能であるか, サーボに入力する電流値を変化させて発生したトルクの測定を行った. なお, サーボ駆動用の電源は DC6V である.

測定の結果, 410分の1 という大きな減速比のサーボ



図2 RobotPHONEの形状同期

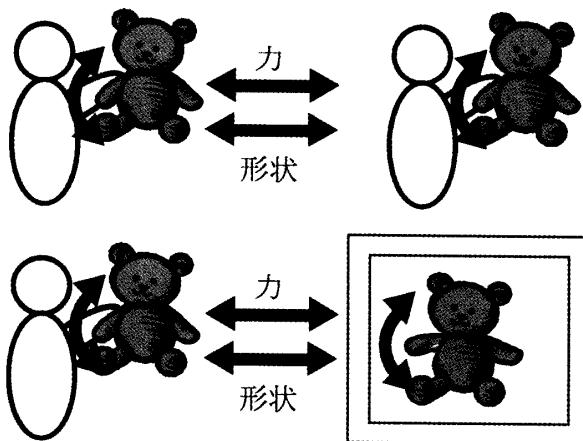


図3 RUIの形状同期  
上-RobotPHONE 下-提案する RUI

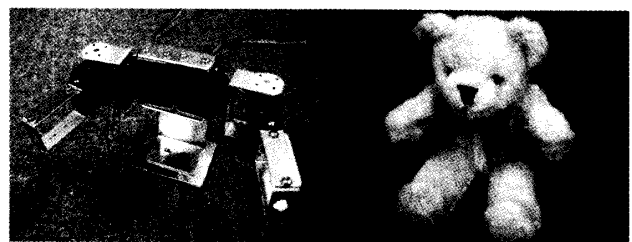


図4 製作した RUI  
左-内部機構 右-外観

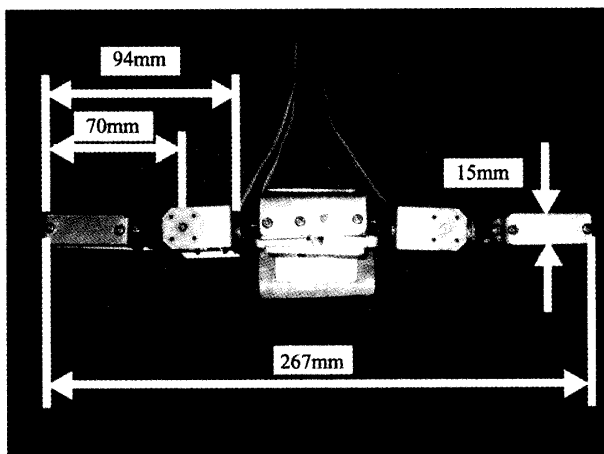


図5 製作した RUI 寸法 (上面図)

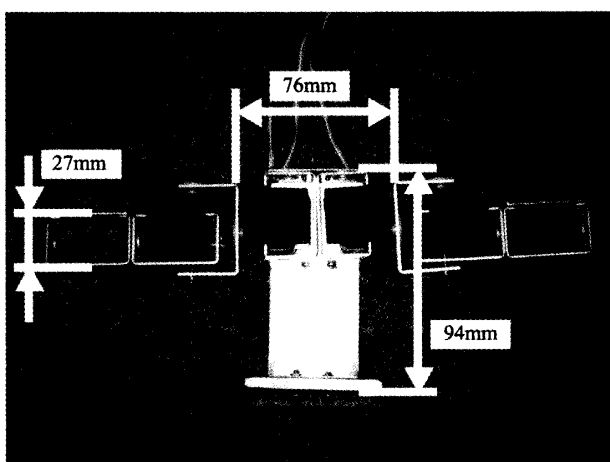


図6 製作した RUI 寸法 (正面図)

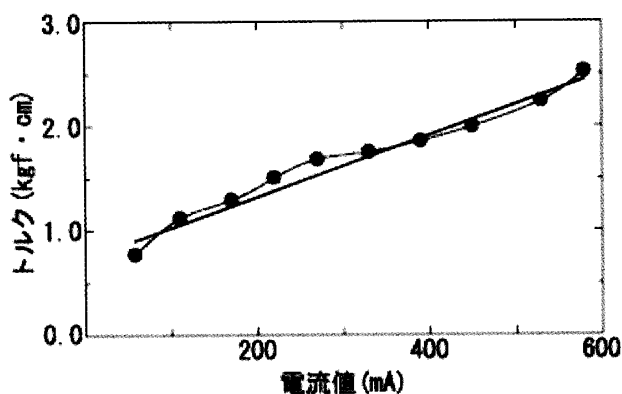


図7 電流値とトルクの関係

であるが、図7のように概ね電流値とトルクの比例関係を得た。また本システムにおけるトルク提示の幅は約0.7~2.7(kgf・cm)であることが分かった。

#### 4. 物理モデル

##### 4.1 離散時間系運動方程式

コンピュータで物体の運動をシミュレートする場合

には、運動方程式を離散的に解く必要がある。今回は、リアルタイム処理に適した方法としてオイラー法を使用した。

また、今回製作する物理モデルは、RUIを通じて情報世界において静止している物体ではなく、何らかの動作を行っている物体に対してインタラクションが可能であるものとして、今回は二次元平面内で並進・回転運動を行う物体に対してインタラクションが可能であるエアホッケーを選択した。

このエアホッケーでは、パックは薄い円盤として二次元平面で並進回転を行っているものとする。ストライカーはパックと同一の二次元平面において、RUIモデルの腕の根元から先端までを半径とした円周上を、RUIの腕を左右方向に動作させるサーボのポテンシヨ値に従って動作する。また、RUIの関節制御はP制御で行う。ストライカーがパックに衝突した時の操作者への力覚提示に関しては、今回製作した保持型RUIの腕の機構は直交した二軸リンクのため二次元方向への力覚提示は行えない。よって、ストライカーの円軌道の接線方向に対してストライカーがパックから受ける力を求め、その力の値に応じてRUIの左右方向に動作するサーボの動作目標値を設定する。その目標値に従ってRUIの腕を回転させることで、操作者に対して力覚提示を行う。

エアホッケーの物理モデルを製作する上で、剛体であるパックの運動方程式が必要となる。パックの二次元の回転・並進の運動方程式を解いた結果として得られた、以下の(1)~(6)の6つの式を用いてパックの運動の計算を行った。

$$x(t+dt) = x(t) + vx(t) dt \quad (1)$$

$$y(t+dt) = y(t) + vy(t) dt \quad (2)$$

$$vx(t+dt) = vx(t) + \frac{F \cos \theta}{m} dt \quad (3)$$

$$vy(t+dt) = vy(t) + \frac{F \sin \theta}{m} dt \quad (4)$$

$$\theta(t+dt) = \theta(t) + \omega(t) dt \quad (5)$$

$$\omega(t+dt) = \omega(t) + \frac{Fz \times r}{I} dt \quad (6)$$

##### 4.2 反発運動

パックが壁やストライカーと衝突すると、パックは反発運動を行う。物体の運動シミュレータにおいて、物体同士の反発運動を計算する場合に利用できる手法として、大別して三つの剛体運動のシミュレーション

手法が提案されている。

1つ目は、剛体間に働く接触力を解析的に解くものである[9]。運動方程式と拘束条件から接触力を解く手法であり、お互いに侵入しないという剛体の性質を正確に再現するが、シミュレーション時において同時に多数の接触が起こる場合に多くの計算量を必要とする。

2つ目は、剛体が衝突する際に発生する力を撃力によって表現するものである[10]。衝突時に2物体に働く撃力によって抗力を表現する手法であり、衝突が発生した時刻を求め、2物体間の衝突を順に処理する。この手法は、1衝突の処理にかかる計算時間は短い、衝突を順番に一つずつ処理するため、短時間に多数の剛体の衝突が起こる場合には多くの計算時間を必要とする。なお、一般的にこの手法は撃力ベース法と呼ばれている。

3つ目は、バネ・ダンパモデルを用いて衝突時に働く力を求める手法[11]である。これは、物体間で衝突が起きた時、拘束を侵した物体に拘束を侵した量に応じて、ペナルティとして拘束を侵した物体に力を与える。この力を与えて反発運動をさせることによって拘束違反を解消する。またこの手法は、1ステップあたりの計算量が少なくてすむ。なお、ペナルティに応じて力を与えるため、この手法はペナルティ法と呼ばれている。

リアルタイムで物体の運動をシミュレーションする場合には、一定期間のシミュレーションが一定時間に

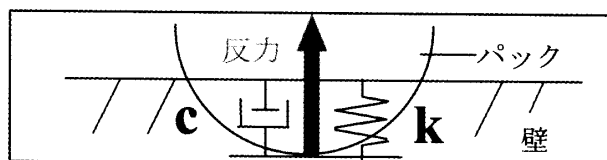


図8 ペナルティ法

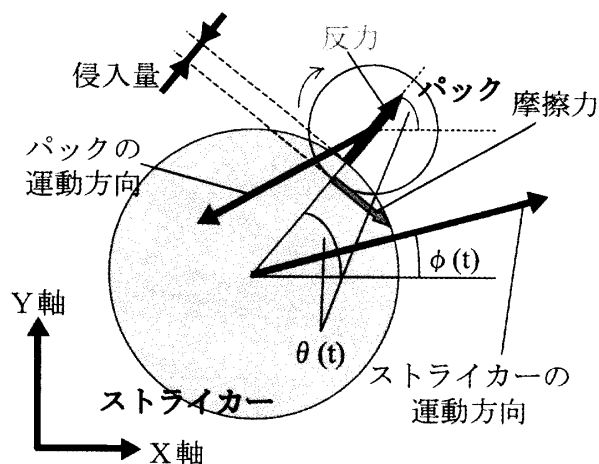


図9 パックとストライカーの反発

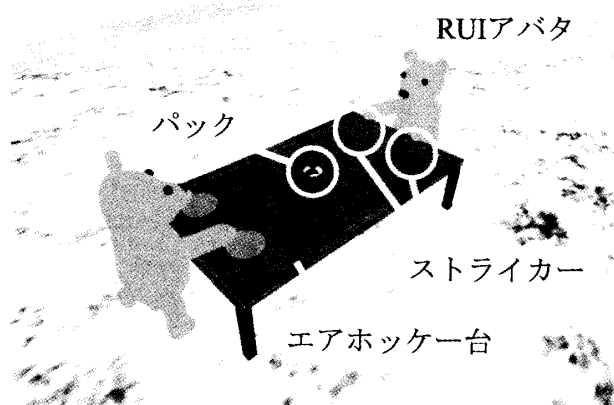


図10 エアホッケー物理モデル

収まらなければならない。1, 2の手法では計算時間が多大になる場合や、大きく変動する場合がある。つまり、この二つの手法はリアルタイムシミュレーションには向かない手法であると言える。

よって、1ステップあたりの計算量が少なくてすみ、リアルタイムシミュレーションを行う上で適していると思われるペナルティ法を使用して、物体衝突時の反発運動の計算を行った。

## 5. 運動ルーチンの高速化

物体同士が衝突した時の反力計算にペナルティ法を使用した。ペナルティ法を使用する上で、プログラム内で運動を行う時間間隔を短くする必要がある。何故なら、運動を行う時間間隔が長いと物体の侵入量が大きくなりすぎ、物体に加える反力も大きくなりすぎてしまっ反発の表現が不安定となるからである。よって、運動ルーチンの高速化が必要となる。運動ルーチンをどれだけ高速化させるかの目安としては、安定的に物体同士の接触を表現できる最低限の目安としての値である1 kHz(運動の時間間隔が1 ms)とする[12]。また、運動ルーチンのサンプリングレートが1 kHzよりも高くなるほど、より硬い物体の力覚を提示することが可能となる。これを受けた力覚提示装置に関する既存の研究として、より高い更新レートを実現させることを目的として赤羽ら[13]は、PCと力覚提示装置の中間層にハプティックコントローラを配置することで10 kHzという高速制御を実現し、より硬い物体の力覚提示に成功した。これを考慮し、1 kHzより一桁上回る10 kHzへの高速化を目標とし、最低限でも1 kHzの高速化を目指した。

なお、エンタテインメント分野への応用を鑑み出来るだけ一般的な環境下での高速化を目指し、リアルタイム OS は用いず Windows 系 OS 上で使える手法を考

表2 高速化手法1で使用したPC

PC 名	CPU	メモリ	ビデオカード
Single1	Celeron 1.4GHz	382.48MB	無し 36.00MB
Single2	Celeron 1.4GHz	383.48MB	GeForce4 Ti4800 124.38MB
Dual1	P-III 800MHz×2	255.48MB	GeForce2 MX100/200 59.12MB
Dual2	AthlonMP 2400+×2	510.98MB	RADEON 9200SE 60.28MB

案, 実装し, 実験を行った。

実験には, OS は全て Windows2000で, メモリ, ビデオカードやCPU 数の異なる複数のPC を使用した。PC 名はCPU が二つの場合 Dual1, CPU が一つの場合は Single1 というようにおいた。

一つ目の高速化手法1として, 計算と描画の処理を分担・並列に行えるように, マルチスレッドとミューテックスを使用する手法を実装, 実験を行った。実験方法としては, 描画と計算を同時に行うプログラムを実行し, 計算処理に関して1ループ毎にかかった時間を計測した。計測したデータは, 1ループにかかった時間が1ループに設定した時間の倍の200 $\mu$ s以上をエラーとみなし, そのエラーの総数を総データ数で割った結果をエラー率とした。また, 力覚提示に最低限必要なサンプリングレートを1kHzとして, ループに1ms以上かかった場合は別に算出した。

この高速化手法1では, SingleCPU のPCではなくDualCPU のPCを使用した場合に, 大幅な速度の向上が見られた。

二つ目の手法は手法1よりも, より一般的な環境下での実装を考えてSingleCPU のPCでの高速化を目指した。手法としては, プログラム内において描画を更

新する時に, 前回の描画更新からの経過時間を計算し, その掛かった時間に相当する回数だけまとめて運動処理を行うものである。この手法2により, 物理モデルの運動に関しては1kHzの高速化は可能になったと言える。

力覚提示は描画の更新レートに依存しており, 本システムでは一般的なレートである60Hzとした。ここで, 力覚提示は力覚演算の連続性とその提示タイミングの2つの要素に分けられる。力覚演算の連続性は先の赤羽らの論文に報告されているように対象物体の硬さの正確な提示に必要であり, 1kHz以上にて制御を行うことが必要である。しかしながらその提示タイミングは視覚や聴覚等其他の感覚統合に関わる問題であり, 視覚提示の更新レートによる60分の1秒程度のずれがあっても違和感は少なくなっている。

また, 高速化手法2とペナルティ法を使用した物理モデル内で, 物体同士の衝突・反発運動に関する精度を測定する実験を行った。

実験内容は, 一次元運動のみを行う二つの円盤を用意し, 静止している一つの円盤Aに対し, ある初速度を持ったもう一つの円盤Bを円盤Aに衝突・反発させる物理モデルを製作する。そして, 衝突前と衝突後の

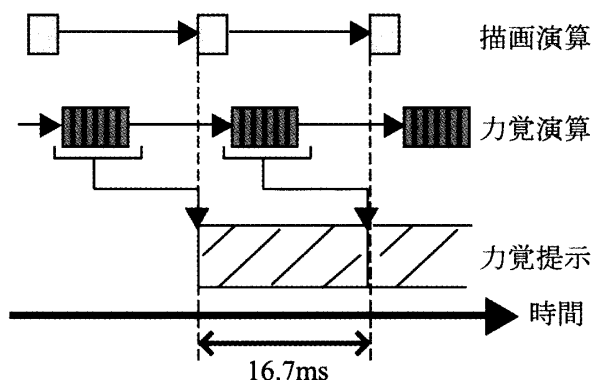


図12 高速化手法2

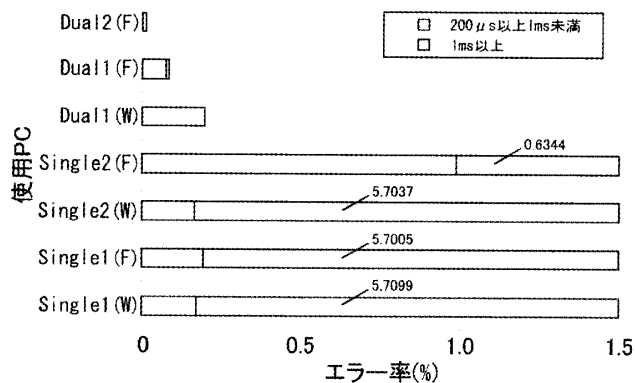


図11 高速化手法1の結果

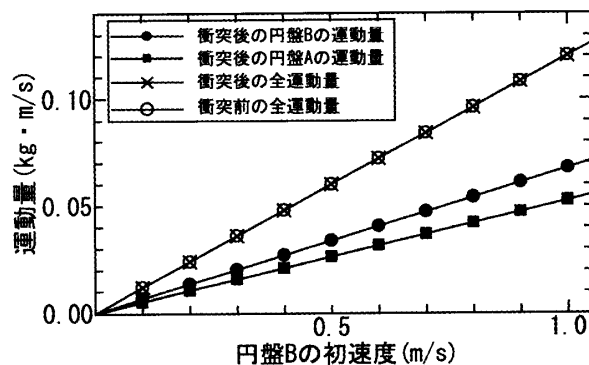


図13 ペナルティ法を用いた物体同士の衝突反発運動における運動量の関係

全体の運動量が保存されているかの計算を行った。計算結果は以下の通りである。なお、円盤 A の質量は40g、円盤 B の質量は120g と設定した。

結果より、離散的に物体の衝突反発計算を行っているにもかかわらず、解析的に計算を行った場合と同様に物体同士の衝突反発運動の前後で全運動量が保存されていることが分かる。よってペナルティ法を使用し、高速化手法2のように運動ルーチンを高速化させることで、正確な運動を行う物理モデルを製作できると考えられる。

また、バネ・ダンパモデルを使用しているペナルティ法では、バネ定数とダンパ定数、物体の質量、運動を行う時間間隔、といった設定値に従って物体同士の衝突反発運動が行われる。よって、物体同士の反発係数を設定することは難しい。しかし、前述したようにペナルティ法では全運動量が保存されているため、衝突反発運動の結果から物体同士の反発係数を求めることができ、今回の二つの物体間の反発係数は約0.75と求められた。

## 6. マルチユーザ型の実装

エンタテインメント分野におけるマルチユーザ型を用いたものとしては、同一の場にいる複数人で協力や対戦を行うもの、ネットワークを通じて遠隔地にいる複数人で行う MMORPG といったものが挙げられる。マルチユーザ型のアプリケーションは、ただ情報世界に対してインタラクションを行うだけでなく、情報世界と通じて他者とのコミュニケーションを同時に行えるという点で、シングルユーザ型に比べてよりエンタテインメント性を向上させると考えられる。よって、本システムにおいてもマルチユーザ型の実装を行う。

まず、物理モデル内の RUI アバタと、実世界の RUI を各二体用意することで、二人同時の対戦を可能とし

た。さらに、一台の PC に二つの RUI を繋ぐのではなく、RUI と PC を各二台用意し、二台の PC をネットワークで結ぶことで、二人で RUI を用いたエアホッケーの対戦を可能とした。PC 間の通信には DirectPlay を用いた。パックの運動や反発力の計算はサーバー側の PC のみで行い、クライアント側では、RUI の関節角の情報のみをサーバー側に通信するサーバークライアントシステムを用いている。

今回は、ローカルネットワーク内の 2 台の PC でサーバークライアントシステムの実装・試験を行ったが、この結果、描画の更新レートはサーバー側では約60Hz、クライアント側では約58Hzであった。クライアント側で若干描画の更新レートが低下した理由としては次のことが考えられる。今回の実装したシステムにおいて、クライアント側ではサーバーから受信するデータに関して、過去の受信データを全て破棄してから最新のデータを取得し、その後描画を行うという処理を行っている。この過去の受信データを全て破棄するという処理により、クライアント側で描画の更新レートが若干低下したのだと考えられる。操作性や力覚提示に関しては、サーバー側、クライアント側に繋いだ RUI 共に、シングルユーザ型の時と比較して主観的に変化は感じられなかった。しかし、グローバルネットワーク内で 2 台の PC を用いる場合には、通信における時間遅れによって、RUI と RUI モデルとの形状同期や力覚提示において影響が出ると考えられる。

また、映像のみではなく音という聴覚に対する出力を用意することで、臨場感を高めることができるのではないかと考えられる。そこで、背景音とパックがストライカーやエアホッケー台の壁と衝突した時の衝突音を用意した。衝突音は物理モデルに従って音の大小を変化させることで現実感を増すように生成している。

## 7. 結論

情報空間内でアバタが受ける力を物理モデルにより、実時間で計算することを可能とした。また、計算値に比例した値を RUI のサーボ動作の目標角に設定して動作させることで、力覚提示を可能とした。

以上より、RUI を使用することで従来にはない人と同様の身体性を持った保持型の力覚提示装置を開発し、エンタテインメントの分野においての試験的実装を行うことができた。

従来のゲームでは、情報世界内のアバタを含んだ物体の運動に関する物理計算はあいまいなものであり、操作者に対する出力としてはジョイスティックの振動や抵抗感といったものでしかなかった。近年、オブジェクトの運動に関して綿密な物理計算を行うゲームが

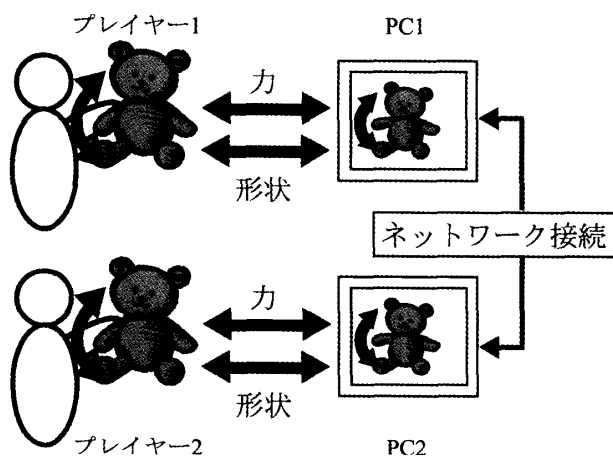


図14 ネットワーク対戦システム構成



増えてきたが、これを活かす出力装置が無いために依然として振動等でしか出力が行われていない。今回試験的実装を行ったように RUI を入出力装置として使用すると、物理モデルの計算結果を忠実に力として表現することが可能となる。それゆえ物理モデルが正確である程、RUI の有効性が活かせられると考えられる。今回試験的実装を行った RUI では、モータとギアによる関節駆動のために提示できる力の範囲と精度に制約があったが、今後駆動に精度のよいギアを用いることや、ワイヤー減速機を用いることで正確な力提示を可能とすることが出来る。また、RUI という操作者とは「サイズが異なる」インタフェースにおいて、提示する力の絶対量は計算量のまま返すことが良いのか、どの程度変化させた方が臨場感の向上に繋がるのかという問題が考えられる。

また、本研究の手法では、操作者への力覚提示における更新レート的高速化に関する問題、情報世界へのインタラクションの方法として、RUI モデルに近づいてくる物体に対してインタラクションを行うのみであり、操作者自身が情報世界内を自由に移動して様々な物体へのインタラクションが不可能という問題等が発生した。高速化に関しては PC-RUI 間の通信速度の向上、インタラクション方法に関しては RUI モデルを情報世界内で移動させるための入力方法の考案・実装、対応する物理モデルの開発によって解決できると考えられる。

#### 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] 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.
- [4] 関口大陸, 稲見昌彦, 館日章, オブジェクト指向型ト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ー形状共有システムの提案と試験的実装ー, 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 WISS2000, 近代科学社, pp. 51-56, 2000.

- [5] Richard Marks, Tany Scovill, Care Michaud-Wideman, "Enhanced Reality. A New Frontier for Computer Entertainment", ACM SIGGRAPH 2001 Conference Abstracts and Applications, p. 117, 2001.
- [6] Thomas H. Massie, J. K. Salisbury: The PHAN-ToM 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.
- [7] 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, pp.887-894, 1992.
- [8] 稲見昌彦, 関口大陸, 川上直樹, 館日章, 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.
- [9] D.Baraff: Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies, Computer Graphics Proceedings (SIGGRAPH 89), Vol.23, pp.223-232, 1989.
- [10] B. Mirtich, J. Canny, Impulse-based Simulation of Rigid Bodies, Proceedings of 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics, 1995.
- [11] M. McKenna and D. Zeltzer: Dynamic simulation of autonomous legged locomotion, Computer Graphics (SIGGRAPH 90), Vol.24, pp.29-38, August 1990.
- [12] Lonnie Love and Wayne Book: Contact Stability Analysis of Virtual Walls, Proc. of Dynamic Systems and Control Division ASME, pp.689-694, 1995.
- [13] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, 10kHz 以上の高更新周期を実現する高解像度ハプティックコントローラの提案, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp.7-10, 2003.
- [14] 館日章, ロボット入門, 筑摩書房, 2002.
- [15] 館日章, バーチャルリアリティ入門, 筑摩書房, 2002.
- [16] 藤井伸旭, 長谷川晶一, 橋本直己, 小池康晴, 佐藤誠, ペナルティー法を用いた剛体運動シミュレータの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集, pp.351-354, 2002.

(2004年9月16日 受付)

(2004年12月21日 採録)

#### [連絡先]

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

電気通信大学大学院電気通信学研究科

知能機械工学専攻稲見研究室

清水 紀芳

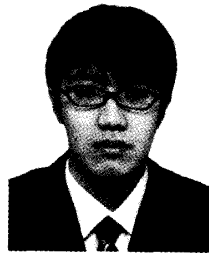
TEL/FAX: 0424-43-5532

Email: shimizu@hi.mce.uec.ac.jp

## 著者紹介

しみず のりよし  
清水 紀芳 [非会員]

2004年 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。同年、同大学大学院電気通信学研究科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。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

こいずみ なおや  
小泉 直也 [非会員]

2004年 電気通信大学電気通信学部知能機械工学科卒業。同年、同大学大学院電気通信学研究科知能機械工学専攻に入学。現在に至る。主にロボット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。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。

すぎもと まき  
杉本 麻樹 [非会員]

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。

にい ひであき  
新居 英明 [非会員]

1993年 東京工業大学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。

せきぐち だいりく  
関口 大陸 [非会員]

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 東京大学大学院情報理工学系研究科 助手となり現在に至る。ネットワークロボティクスおよびテレインジスタンスに関する研究に従事。

いなみ まさひこ  
稲見 昌彦 [非会員]

1994年 東京工業大学生命理工学部生物工学科卒業。1996年 同大学院生命理工学研究科バイオテクノロジー専攻修士課程修了。1999年 東京大学工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年より2001年8月まで東京大学国際・産学共同研究センター リサーチ・アソシエイト。2001年9月より東京大学大学院情報理工学系研究科 助手。2003年4月より電気通信大学知能機械工学科 講師となり現在に至る。ロボット及びバーチャルリアリティの研究に従事。IEEE Computer Society, 情報処理学会, 日本ロボット学会, 日本VR学会, 日本VR医学会各会員。

## Teddy bear-like Robotic User Interface

by

Noriyoshi SHIMIZU, Naoya KOIZUMI, Maki SUGIMOTO, Hideaki NII,  
Dairoku SEKIGUCHI, Masahiko INAMI

## Abstract :

Robots have chiefly been considered as machines that perform work in the place of human beings, such as industrial robots. However, a robot can be used as an interface between the real world and the information world. This concept can be referred to as a Robotic User Interface (RUI). In this paper, we propose a RUI as a haptic feedback interface. We can interact with information world by using this RUI synchronize a CG model that has the same form and joints as RUI.

**Keyword :** Robotic User Interface, haptic feedback, entertainment, Virtual Reality

**Contact Address :** Noriyoshi SHIMIZU

Graduate School of The University of Electro-Communications  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585 Japan

TEL : 0424-43-5532

FAX : 0424-43-5532

Email : shimizu@hi.mce.uec.ac.jp