

実世界で存在感を持つバーチャルクリーチャの実現

Kobito -Virtual Brownies-

青木 孝文¹⁾²⁾, 市川 宙¹⁾, 浅野 一行¹⁾, 飯尾 裕一郎¹⁾, 三武 裕玄¹⁾²⁾, 鮎川 力也¹⁾,
川瀬 利弘¹⁾, 栗山 貴嗣¹⁾, 松村 周¹⁾, 遠山 喬¹⁾, 松下 卓史¹⁾, 長谷川 晶一¹⁾²⁾³⁾, 佐藤 誠²⁾

1) 東京工業大学 ロボット技術研究会

2) 東京工業大学 精密工学研究所 (kobito@hi.pi.titech.ac.jp)

3) 科学技術振興機構 さきがけ 研究員

バーチャルクリーチャは親しみやすさや表現の多様性から様々なエンターテインメントやアートに利用されてきた。我々はこの存在を実世界に拡張することで、新たなエンターテインメントやアートの可能性を創造する。本論文では体験者にバーチャルクリーチャが実世界に存在すると感覚させる方法として、実物体をハプティックインターフェイスとしたバーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションおよび、体験者の現実感を損なわせないバーチャルクリーチャの提示手法を提案する。また、我々は提案手法を用いたシステムの実現例として作品“Kobito -Virtual Brownies-”を制作し、体験者の反応を基に提案手法の有効性を確認した。

Creation of virtual creatures with sense of existence in the real world

Kobito -Virtual Brownies-

Takafumi Aoki¹⁾²⁾, Hiroshi Ichikawa¹⁾, Kazuyuki Asano¹⁾, Yuichiro Iio¹⁾, Hironori Mitake¹⁾²⁾,
Rikiya Ayukawa¹⁾, Toshihiro Kawase¹⁾, Takatsugu Kuriyama¹⁾, Itaru Matumura¹⁾,
Takashi Toyama¹⁾, Takashi Matsushita¹⁾, Shoichi Hasegawa¹⁾²⁾³⁾ and Makoto Sato²⁾

1) Tokyo Institute of Technology, Society for the Study of Robotics

2) Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory

3) PRESTO, Japan Science and Technology Agency

Abstract - Virtual creatures have been used for various entertainments and arts, because they are friendly and have a variety of expressions. We create the possibility of new entertainments and arts by making virtual creatures exist in the real world. In this paper, we propose haptic interaction with virtual creatures through real objects, and the presentation technique of virtual creatures that doesn't allow people to ruin a real feeling, for people experience as if virtual creatures existed in the real world. Moreover, we produced a work “Kobito-Virtual Brownies-” as an example of achieving the system that used the proposed methods, and confirmed the effectiveness of the proposed methods based on the reaction of those who experienced this work.

1. はじめに

現在、映画やゲーム、テレビ、物語の世界ではバーチャルクリーチャ(人間の考え出した生き物、キャラクター

の総称)がいろいろな場面で使われている。例えば、映画の世界では CG で描かれたバーチャルクリーチャがまさに生きているかのように表現されている。アニメーションの世界では、人々の心をつか

むようなバーチャルクリーチャが多数存在している。ゲームの世界では、自分以外のキャラクタにバーチャルクリーチャが使用されている。このように、バーチャルクリーチャは人々の生活の中で親しみやすい存在として定着してきた。

バーチャルクリーチャとより深いインタラクションをすることはエンターテインメント性やアート性を高めるため、様々なインターフェイスが提案されてきた。Nintendogs[1]ではタッチパネルを使用することで、画面内のバーチャルクリーチャ（犬）に、“頭を撫でる”、“毛をとかす”といった触れる行為を行える。SPIDAR[2] や PHANTOM[3]といったハプティックインターフェイスは、体験者にバーチャル世界のバーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションを可能にする。しかしながら、これらのバーチャルクリーチャはバーチャル世界にとどまっていたため、体験者の存在する実世界の物体を動かすといった、実世界に影響を与えることが出来なかった。実世界にバーチャルクリーチャが存在し影響を与えるようにできれば、インタラクティブ性はより強固なものとなる。これを実現するには、体験者にバーチャルクリーチャが実世界に存在していると感覚させ、バーチャルクリーチャが実世界に影響を及ぼせる必要がある。

実世界にバーチャルクリーチャが存在しているかのように感じさせる研究には、拡張現実感や複合現実感の研究として MagicBook[4], Welbo[5], Jellyfish Party[6], The Invisible Train[7] や Touch-Space[8]などが存在する。これらの研究では、体験者に実世界に存在するバーチャルクリーチャを視覚、聴覚によって提示する。しかし、実世界に存在するはずのバーチャルクリーチャが実世界に物理的に影響を及ぼすことができない、体験者が提示されたバーチャルクリーチャとハプティックインタラクションができないなど、体験者が実世界に存在するバーチャルクリーチャを感覚できるとは言い難い。また、バーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションに関しては、Reactive Virtual Human[9][10]などが存在する。しかしながら、これらのどの研究においても体験者は HMD などの没入型デバイスを装着する行為や、目の前に存在する没入型ディスプレイ、SPIDAR などの特殊なインターフェイスを使用する行為によって、自分が日常の世界に存在するという現実感を損ねるため、実世界にバーチャルクリーチャが存在するという感覚を提示することが出来ないという問題点がある。

Sekiguchi らは、RUI[11]を提案し、実世界に実体を持つロボットを用いてバーチャル世界と実世界を結

びつける試みをしている。この試みでは、体験者に日常の現実感を損なわないインターフェイスを提供することはできるが、バーチャル世界を見せることで現実感を損なわせてしまう。また、AIBO[12]のように、ロボットを用いて実世界に実体を持ったバーチャルクリーチャを作り出す試みがなされている。この試みでは、日常の現実感を失わずにバーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションが可能になる。しかしながら、制御や構造など技術的な問題から、バーチャルクリーチャの親しみやすさや表現の多様さを十分に再現できないという問題点がある。

以上より、バーチャルクリーチャが実世界に存在するかのように感覚させるためには、バーチャルクリーチャの表現方法として CG などのバーチャルリアリティの技術を利用する必要があると考えられる。また、実世界においてはすべての物体に対して物理的インタラクションを行うことが可能であるため、視覚、聴覚呈示に加えてハプティックインタラクションが必要不可欠であると考ええる。さらに、体験者のバーチャルクリーチャに対する現実感を損なわないために、従来用いられてきた HMD など日常の現実感を損なうものは使用することを避ける必要がある。そこで、本研究では実世界でバーチャルクリーチャの存在感を提示するために、実世界におけるバーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションおよび、体験者の日常の現実感を損なわない映像情報の提示手法を提案する。また、提案手法を用いたシステムの実現例として作品“Kobito -Virtual Brownies-”を構築し、体験者の反応を基に提案手法の有効性を評価する。

2. 提案手法

バーチャルクリーチャは現実には実世界に存在しない。そのため、実世界に存在させる場合、様々な不整合が生じる。体験者が実空間でバーチャルクリーチャを見ようとした場合、裸眼立体ディスプレイや HMD が考えられるが、実物体とのオクルージョン問題やデバイス装着時の日常の現実感喪失といった問題を抱えている。そこで、実世界にリアルなバーチャルクリーチャの映像を重畳させるのではなく、情報としてバーチャルクリーチャの映像を提示する。具体的には、一度カメラから取得した映像にバーチャルクリーチャの映像を追加したものを通常のディスプレイに表示する。体験者は画面の映像が目の前の実世界を撮影したものであるとすぐに認識できるため、このディスプレイの映像は単に現実を撮影し

た映像と認識できる。この映像に“Kobito”を重ねさせることで、体験者に“Kobito”が実世界に存在し、その映像がカメラに写ったかのような錯覚を感じさせることができる。現在、携帯やデジタルカメラなど、カメラとディスプレイが一体化したデバイスは日常的に使用されてため、このようなデバイスは体験者の日常の現実感を損なわない。

バーチャルクリーチャが実世界に存在するならば、バーチャルクリーチャと実物体の間に、実物体に対し触れる、触れられる、力を加える、力を加えられるといったハプティックインタラクションが発生するはずである。これを実現するには、システムがバーチャルクリーチャと実世界の物体の関係を認識し、物理的影響を及ぼせる必要がある。そこで、我々はバーチャルクリーチャの存在するバーチャル世界と体験者の存在する実世界で同一の物体を共有するという手法(図1)を提案する。これは実世界の実物体を動かすとバーチャル世界のバーチャル物体がそれに連動して動き、バーチャル世界のバーチャル物体を動かすと実世界の実物体がそれに連動して動くという2つから構成される。これにより、バーチャルクリーチャがバーチャル物体を動かすことで実物体を動かす、実世界へインタラクションすることが可能になる。また、体験者が実物体を動かすことでバーチャル物体を動かす、バーチャル世界へインタラクションすることが可能になる。このため、体験者とバーチャルクリーチャの間で、共有する物体を介し力をやりとりすることになり、共有する物体がハプティックインターフェイスとして働く。

以上のように、本研究では体験者に実世界に存在するバーチャルクリーチャを感覚させるために、上記2つの手法を提案する。

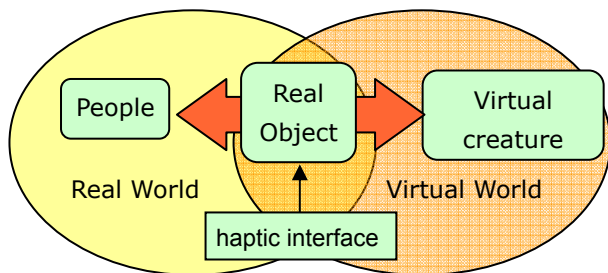


図1 実物体を介したハプティックインタラクション

3. 実現

提案手法を用いたシステムの実現例として、グリム童話“こびとのくつや”の“こびと”をモチーフにしたバーチャルクリーチャと実世界でインタラクション可能にする作品“Kobito -Virtual Brownies-” (図2)を制作した。

3.1 作品概要

本作品ではバーチャルクリーチャとして“Kobito” (図3)、実物体のハプティックインターフェイスとして紅茶缶、バーチャルクリーチャを表示するディスプレイとして“Kobito Window”(図4 手前)を使用する。



図2 Kobito -Virtual Brownies-



図3 Kobito



図4 Kobito Window

作品の場面はティールームでのお茶の時間である。一見普通の部屋に見えるが、紅茶缶が突然動き出すといった不思議なことが起きる。体験者は“Kobito

Window”を左右に動かしながら、勝手に動いていた紅茶缶が実は“Kobito”が押して動かしていたということを知ることができる。体験者は“Kobito Window”に表示された“Kobito”を見ることで“Kobito”の存在を知るだけでなく、紅茶缶を通してハプティックインタラクションすることができる(図 4)。例えば、体験者が“Kobito”が押している紅茶缶を押し返せば、“Kobito”が押している力を感じることができる。もし強い力で押せば、“Kobito”はよろけたり、転んだりする。“Kobito”は AI を持っているため、紅茶感の位置が遠ければ走って近づく、紅茶缶でたたかれれば怒る、上手に紅茶缶を動かすことができれば喜ぶなど様々な行動を見せる。

このようにして体験者に目に見えない“Kobito”が目の前の実空間に存在していると感じさせる。

3.2 作品システム

システムは以下の 4 つのコンポーネントから形成される。

1. 実物体からバーチャル物体の同期(図 5①)
2. バーチャル世界のシミュレーション(図 5②)
3. バーチャル物体から実物体の同期(図 5③)
4. “Kobito Window”の映像描画(図 5 下)

1-3 のループによって体験者とバーチャルクリエータの実物体を介したハプティックインタラクションを実現し、4 によって“Kobito”の映像を体験者に提示する。リアルタイムでの処理を実現するために、それぞれのコンポーネントごとにラックトップ PC (Pentium(R)M プロセッサ 760 搭載) を 1 台ずつ割り当てた。それぞれのマシンは 100Mbps の有線 LAN によって接続されている。ワークスペースの大きさ 600mm x 900mm であり、4 台のラックトップ PC、2 台のカメラ、7 インチのディスプレイ、ハプティックインターフェイス SPIDAR および紅茶缶から構成される。

3.3 実物体とバーチャル物体の同期

“Kobito”と紅茶缶のインタラクションは物理シミュレーションで実現している。通常、物理シミュレーションはバーチャル世界のみを扱うが、この作品では実世界の実物体も扱う。これは実世界の現実の紅茶缶と物理シミュレーション (バーチャル世界) のバーチャル紅茶缶の動きを同期させることによって実現する(図 6)。

実物体とバーチャル物体の同期は以下のようにして実現する。体験者が現実の紅茶缶を動かすと、バーチャル紅茶缶も同じ位置に移動する。現実の紅茶缶の位置と角度は、机の上に固定されたカメラによって認識する(図 7 左)。認識は USB タイプのカメラ

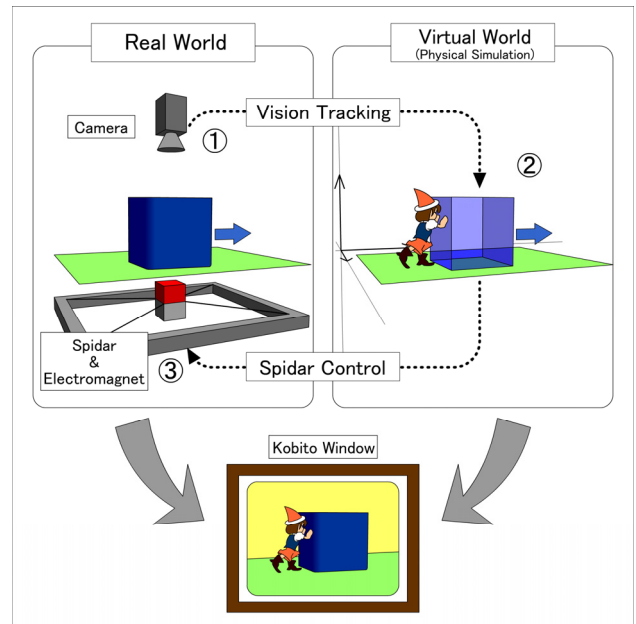


図 5 システム全体図

を利用して VGA (640 x 480pixel) にて 30fps で行い、色による判定で紅茶缶の位置・角度を求める。このような認識にはマーカを使用した手法[23]が存在するが、マーカによって日常の現実感を壊してしまうため、色による認識を採用した。“Kobito”は物理シミュレーションの中でバーチャル紅茶缶を押して動かすことができる。“Kobito”によってバーチャルの紅茶缶が動かされたとき、机の下にある磁石ユニットを動かすことで現実の紅茶缶を同じ場所に移動させる (紅茶缶の底面にも磁石がついている) (図 7 右)。



図 6 実物体とバーチャル物体の同期(1)

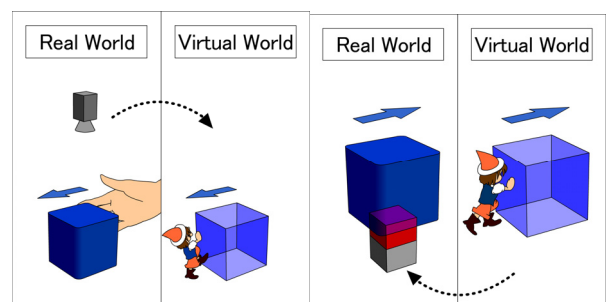


図 7 実物体とバーチャル物体の同期(2)

3.4 実物体駆動機構

本システムでは、ハプティックインターフェイスである SPIDAR の機構を利用し紅茶缶の位置を制御する。SPIDAR のグリップのかわりに磁石ユニット（ネオジウム磁石）をつけ、磁石で紅茶缶を引くことで紅茶缶を任意の位置に移動する(図 8)。この方式では磁石ユニットを糸とモータで動かしているため、グリッド上に電磁石を敷き詰めた The actuated workbench[13]、リニア誘導モータを使用した Proactive Desk [14]に比べ軽量、低発熱、可動領域を容易に拡張できる点で優れている。さらに、体験者は紅茶缶を通して“Kobito”が押している力を感じることができる。磁石ユニットには磁石の高さを変動させる機構があり、紅茶缶に磁石をつける、はずす動作を実現している(図 9)。

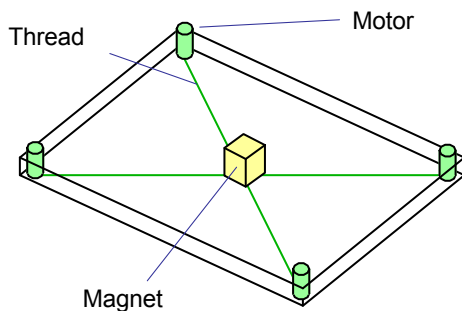


図 8 実物体駆動系

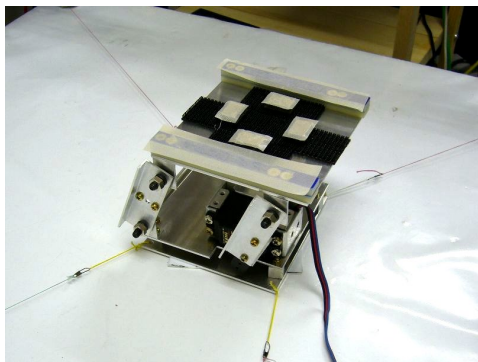


図 9 磁気ヘッド

3.5 パーチャルクリーチャ“Kobito”

“Kobito”は物理シミュレーションの中で行動する。“Kobito”はバーチャル物体に対し力を加え動かすことが可能である。また、“Kobito”はルールベースのシステムを持っており、自分でバーチャル紅茶缶の位置を知覚し、現在の自分の状態から次にどのような行動を起こせばよいかを思考する。この行動は以下のようにして生成される(図 10)。はじめに、“Kobito”

は世界と自分自身の状態を調べ、ワーキングメモリに書き込む。そして、沢山のルールをワーキングメモリに適用し行動情報を生成する。最後に行動情報をもとに行動を起こす。これらの動作は 30fps で実行される。例えば、“Kobito”は紅茶缶が左の遠くにあり、自分自身が疲れていない状態であれば、すぐに左を向く。紅茶缶を押せば疲労し休憩する。紅茶缶によって弾かれれば、気分を害し怒る。

物理シミュレーションの中では、“Kobito”の形状は直方体として扱う。そして“Kobito”の状態にあわせてあらかじめ用意した“走る”、“箱を押す”、“よろめく”などのアニメーションを再生する。そうすることで、物理シミュレーションをリアルタイムに動かし、かつ多彩な表現を可能にしている。このような AI と物理シミュレーションを組み合わせた研究としては Making them behave [15]があげられる。

3.6 物理シミュレーション

私たちはバーチャル世界を構成する物理シミュレータとして SPRINGHEAD[16]を使用した。物理シミュレータを使用する利点は、一つ目は“Kobito”との物理的インタラクションが可能になるということである。特に、“Kobito”と紅茶缶の衝突判定を実現することができる。2 つ目は様々な自然なインタラクションが可能になるということである。例えば、“Kobito”に紅茶缶を当てたとき、その強さに応じて“Kobito”がバランスを崩したり、転んだり、よろめいたりといった動作が可能になる。最後は、物理シミュレーションが“Kobito”を現実世界で生きているように表現できることである。これは“Kobito”が私たちと同じ物理法則に従って行動しているからである。

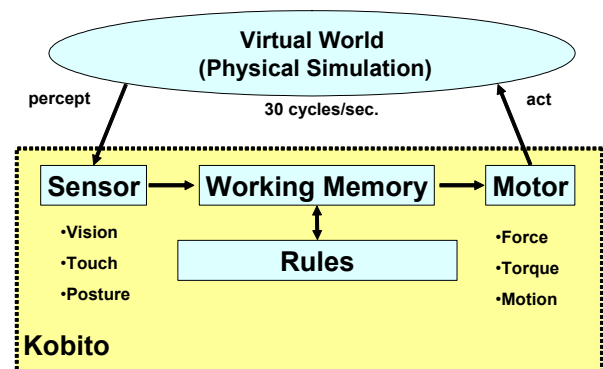


図 10 Kobito 行動決定

3.7 ディスプレイデバイス“Kobito Window”

体験者は“Kobito Window”を通して“Kobito”を見ることができる。“Kobito Window”はカメラと 7 インチの液晶ディスプレイから構成され、カメラから取得した実世界の映像に“Kobito”の CG を重ね合わせた映像を表示する(図 4)。カメラは QVGA (320 x

240pixel) にて 30fps で実世界の映像を取得する。子供でも手軽に体験できるように“Kobito Window”は据え置き型とし、向きを左右に変えることが可能である。カメラ視点の移動には“Kobito Window”の角度をエンコーダによって計測することで対応している。

体験者が“Kobito Window”の映像だけを見てしまうと、実際に紅茶缶が動いているという実世界の事実を見損ねてしまう。そこで、ワークスペースの大きさを 600mm x 900mm, 紅茶缶の大きさ 100mm x 100mm x 100mm に対し, “Kobito Window”の液晶ディスプレイの大きさを 7 インチ, 72 度の広角カメラを使い, “Kobito Window”の位置をフィールドの中央に設置することで, 体験者が容易に“Kobito Window”の映像と実世界両方とも見比べられるように設計した(図 4,11)。



図 11 全体配置

3.8 “Kobito”の CG 合成

“Kobito”の姿は“Kobito Window”の中で見ることが出来る。この映像は“Kobito”と紅茶缶の位置情報を基に構成される。カメラから取得した映像の中の紅茶缶の映像は、紅茶缶の色情報によって抜き出される。“Kobito”が紅茶缶の前にいるときは、現実世界の映像に“Kobito”の CG を上書きする(図 12 ②③)。“Kobito”が紅茶缶の後にいるときは、実世界の映像に“Kobito”の CG を上書きし、さらに紅茶缶の映像を上書きする(図 12 ①)。これによりオクルージョンの問題を解決している。

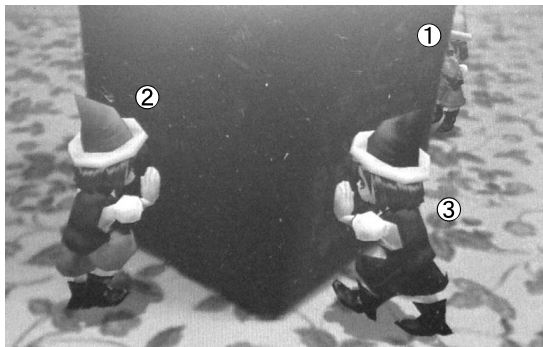


図 12 オクルージョン

4. 評価

この作品は第 12 回国際学生対抗バーチャルリアリティコンテスト[17], 工大祭 2004, 2005[18], 産業用バーチャルリアリティ展 2005[19], SIGGRAPH2005 Emerging Technologies[20], インタラクティブ東京[21]において実演展示を行った。日本およびアメリカにおいて、男女とも子供から大人まで合計 8000 人以上の方々に楽しんでいただいた。展示の際、ビデオ撮影および直接体験者を観察することで、体験者の反応を観察した。

子供達は“Kobito”とインタラクションできることに興味をいただき、紅茶缶で“Kobito”を突く、つぶそうとするなど積極的なインタラクションを試みていた。さらに、紅茶缶を押している“Kobito”を手で捕まえようとするという直接的な行動が観察できた(図 13)。この行動から体験者が実世界に“Kobito”が存在していると感じていると考えられる。



図 13 インタラクティブ東京

女性および SIGGRAPH で体験した男性からは“Kobito”が紅茶缶を押す姿やインタラクションの際の多彩な表情に対し、可愛い、健気などの感想が得られた。また、子供ほどではないが積極的にインタラクションする行動が観察できた(図 14)。一方、日本の男性ではシステムに興味を持つもののインタラクションを試みる人は少なかった。

大人の場合、子供とは違い, “Kobito”を手で捕まえようとするような直接的な行動は観察できなかった。これは子供に比べ、実世界に“Kobito”は存在しないとの先入観が強いためと考えられる。また、展示が技術展示であるために、体験者はインタラクションよりもインタラクションの仕組みに興味を示したとも考えられる。事実、ほぼすべての大人が作品体験後にシステムの説明を求めたことから、本作品のシステムに対し高い関心を持ったと考えられる。

展示の際には“Kobito Window”の映像を拡大したものをプロジェクタにより投影した(図 15)。この映

像を見た後、実際に動いている紅茶缶を見た体験者の多くが作品に興味を示した。逆に映像だけを見て去っていく体験者も存在した。このことから、体験者は“Kobito Window”の映像と実世界を見比べることで作品に興味を持ったと考えられる。

以上から、子供においては“Kobito”が実世界に存在すると感覚させることが可能であると考えられる。また、より一般的評価のために技術展示ではなく一般展示において体験者の反応を観察することが今後の課題としてあげられる。



図 14 SIGGRAPH2005 Emerging Technologies

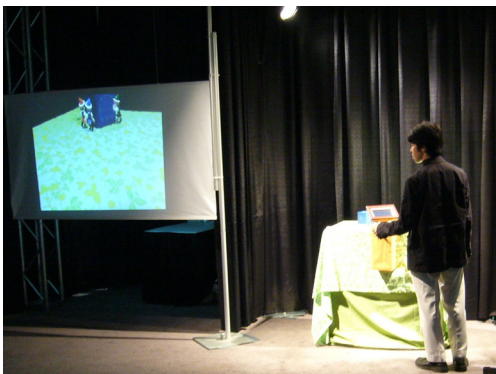


図 15 スクリーン

5. 考察

本作品は子供、女性からは親しみやすい作品になった。しかし、日本の男性からは妖精というメルヘ

ンの世界の作品であるためにインタラクションを恥ずかしがる人が多く見られた。男性も楽しめる要素を加えることで、より万人に親しまれる作品ができるものと考えられる。また、問題点として、実物体とバーチャル物体の同期が崩れてしまう問題、“Kobito”が動かせる実物体が一つに限られている問題、“Kobito Window”の自由度が低く自由に動かせない問題が存在する。一つめの問題は実物体が手などの障害物により遮られることで画像認識が働かないこと、実物体の高速な移動に磁石ユニットが追従できないことから生じる。これに関しては、上からの画像認識ではなくタブレットのような卓上センサによって実物体の位置角度を計測することで、画像認識の問題点を克服できる。また、一様な磁場を発生させて導体を駆動する仕組み[14]や、ワークスペースの場所ごとに磁場を変化させることが出来る仕組み[13][22]が提案されている。これらをシステムに取り入れれば実物体の高速な場所の変化に対応することや、2 つめの問題点である“Kobito”が動かせる実物体を複数に増やすことも可能である。3 つめの“Kobito Window”の自由度向上に関しては、“Kobito Window”の 3 次元的な位置および角度情報が常に取得可能であれば実現可能である。しかし、現在の手軽に扱える光学センサ、ジャイロセンサ、加速度センサでは機械式センサに比べ分解能の問題から、実映像と CG の重ね合わせに問題が生じる。我々はこれらの計測の問題を解決することで、カメラ付き携帯電話やデジタルカメラのような手軽なデバイスで“Kobito Window”を実現したいと考えている。

6. まとめと今後の展望

本論文では体験者にバーチャルクリーチャが実世界に存在すると感覚させる方法として、実物体をハプティックインターフェイスとしたバーチャルクリーチャとのハプティックインタラクションおよび、体験者の日常の現実感を損なわないバーチャルクリーチャの提示手法を提案した。また、我々は提案手法を用いたシステムの実現例として作品“Kobito -Virtual Brownies-”を制作し、体験者の反応を基に提案手法の有効性を確認した。

今後の展望としては、“Kobito -Virtual Brownies-”の完成度を上げることで、提案手法の有効性をより強固なものにすることが挙げられる。また、我々は提案手法が“Kobito -Virtual Brownies-”のようなエンターテインメントだけでなく、日々の生活の中でも有用だと考えている。提案手法はいいかえればバーチャルクリーチャを体験者の日常の現実感を破壊せずに

現実世界に潜り込ませるとも言える。今後、人々の生活の中でバーチャルクリーチャが生活支援、コミュニケーション支援などのエージェント、エンターテイメントとしてのキャラクタなどとして機能する場合、この手法はバーチャルクリーチャを実世界に存在させる基盤として大変有用なものになると考えている。例えば、ハウスオートメーションなどの複雑なシステムが導入されたとき、すべての人にとってそれが理解しやすいものではないだろう。そのような場合、“Kobito”は複雑なシステムの擬人化インターフェイスとして機能する。体験者は“Kobito Window”に写った“Kobito”を通してシステムの動作や思考を理解することが可能である。

参考文献

- [1] Nintendo
<http://www.nintendo.co.jp/ds/adgj/> (2005)
- [2] M. Ishii and M. Sato: a 3d spatial interface device using tensed strings, *presence. International J. Supercomputer Applications*, (Jul 1994).
- [3] T.H. Massie: Design of a Three Degree of Freedom Force- Reflecting Haptic Interface. *Bachelor of Science thesis, Massachusetts Institute of Technology*, (May 1993).
- [4] M. Billinghurst, H. Kato, and I. Poupyrev: The MagicBook: a transitional AR interface. *Computers and Graphics*, 25, pp.745-753(2001).
- [5] Anabuki, M., Kakuta, H., Yamamoto, H., and Tamura, H.: Welbo: an embodied conversational agent living in mixed reality space, *CHI '00 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp.10-11 (Apr 2000).
- [6] K. Asai, Y. Okuno, H. Kakuta, and T. Takayama: Jellyfish Party Blowing soap bubbles in Mixed Reality Space, *Proc.ISMAR03*, pp.358-359 (2003).
- [7] D. Wagner, T. Pintaric, F. Ledermann, D. Schmalstieg Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld Devices *Proc. Pervasive 2005*, (May 2005).
- [8] Cheok, A., Yang, X., Ying, Z., Billinghurst, M, and Kato, H: Touch-Space: Mixed Reality Game Space Based on Ubiquitous, Tangible, and Social Computing. *Personal Ubiquitous Comput*, Vol.6, No5.6, pp.430-442 (Jan 2002).
- [9] S. Hasegawa, T. Ishikawa, N. Hashimoto, M. Salvati, Y. Koike, M. Sato: 'Human Scale Haptic Interaction with a Reactive Virtual Human in a Realtime Physics Simulator', *ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology ACE 2005*, (2005)
- [10] S. Jeong, N. Hashimoto, and S. Makoto: A novel interaction system with force feedback between real - and virtual human. In *Proc. of ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology 2004*, (2004).
- [11] D. Sekiguchi , M. Inami , S. Tachi, RobotPHONE: RUI for interpersonal communication, *CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, (March 2001).
- [12] <http://www.jp.aibo.com/>
- [13] Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D., and Ishii, H: The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces. *Proc. Of the 15th Annual ACM Symposium on User interface Software and Technology*. p.p181-190 (Oct 2002).
- [14] H. Noma, S. Yoshida, Y. Yyanagida, N. Tetsutani: 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 (Apr 2004) .
- [15] J. Funge: Making them behave: Cognitive models for computer animation, University of Toronto PhD Thesis,
<http://www.dgp.toronto.edu/~funge/pdf/fungePr.pdf>, (1998).
- [16] S. Hasegawa and M. Sato: Real-time rigid body simulation for haptic interactions based on contact volume of polygonal objects. *Proc.of EUROGRAPHICS Computer Graphics Forum* (2004).
- [17] <http://ivrc.net>
- [18] <http://www.koudaisai.jp/>
- [19] <http://www.ivr.jp/>
- [20] <http://www.siggraph.org/s2005/main.php?f=conference&p=etech>
- [21] <http://interactivetokyo.jp/>
- [22] 吉田俊介, 野間春生, 保坂憲一: Proactive Desk II: 複数物体を駆動可能なリニア誘導モータ方式力覚提示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会 第10回大会論文集, pp.309-312(2005-9).
- [23] H. Kato , M. Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System, *Proc. of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*, p.85, (Oct 1999)