

拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース

加藤博一¹, Mark Billingham², Ivan Poupyrev³, 鉄谷信二⁴, 橘啓八郎¹

¹広島市立大学, ²University of Washington, ³Sony CSL, ⁴ATR 知能映像通信研究所

Tangible Augmented Reality for Human Computer Interaction

Hirokazu Kato¹, Mark Billingham², Ivan Poupyrev³, Nobuji Tetsutani⁴, Keihachiro Tachibana¹

¹Hiroshima City University, ²University of Washington, ³Sony CSL, ⁴ATR MIC Lab.

人間にとって自然で直感的なインタフェースを設計するためのデザインコンセプトとして、Tangible User Interfaceをあげることができる。このコンセプトに基づき設計された拡張現実感システムを我々はTangible Augmented Reality Interfaceと呼び、そのプロトタイプシステムをいくつか試作してきた。本論文では、このTangible Augmented Reality Interfaceについて、その特徴、有効性を説明する。また、具体的なプロトタイプシステムとして「Magic Book」および「Magic Paddle」を紹介する。Magic Bookは、仮想3次元絵本であり、ユーザは実際の本の上に、仮想的な3次元オブジェクトを見ることができる。さらに、そのシーンの中に入り込むことも可能である。また、この仮想世界の中で、複数のユーザがコミュニケーションをとることもできる。Magic Paddleは、仮想のミニチュア家具のレイアウトシステムで、紙製のパドル（へら状の物体）で、仮想の家具に対する操作ができる。直感的なインタフェースが実現されており、容易に3次元オブジェクトの操作ができる。

1. はじめに

近年、GUI(Graphical User Interface)がパーソナルコンピュータの標準的インタフェースとして広く使用されている。適切にデザインされたGUIは、ある程度経験を積んだユーザには非常にわかりやすい。しかし、初心者に対しては、まだ問題が残されている。例えば、アイコンは、現実世界の対象物のメタファとして適切にデザインされることで、ユーザに正しい操作を連想させることが可能であるが、文化や年齢などの差異にも影響されない万能なデザインを考案することは難しい。ユーザは、学習によって、そのアイコンの意味を理解しなければならない。また、GUIアプリケーションに対するメンタルモデルの構築には、日常的な道具に対するそれとは全く異なり、外形から推定することが不可能である。この点も初心者の学習の障害になっていると思われる。さらに、GUIアプリケーションによる作業は、ユーザの作業空間をディスプレイ内に閉じこめる効果があり、実世界での作業との間に大きなギャップを作る。本来ならコンピュータを使用せずとも容易にできる作業を、わざわざ

コンピュータを使用して行うようになり、それが作業効率の低下につながっている場合もある。

このような問題点を解消するためのポスト GUIに関する研究は、現在盛んに行われている。我々の研究もその一つであり、Tangible User Interfaceというデザインコンセプトに基づいた拡張現実感インタフェースについて検討を行っている。我々は、これをTangible Augmented Realityと呼び、プロトタイプシステムの試作を通じてその有効性を確かめている。本論文では、まず、このTangible Augmented Realityのインタフェースとしての特徴を説明する。次に、具体的なプロトタイプシステムとして「Magic Book」および「Magic Paddle」を紹介し、その中でこのコンセプトの有効性を述べる。

2. 拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース

2.1 人工現実感インタフェース

人工現実感(Virtual Reality)は、GUIにない新たな人間・コンピュータ間のインタフェースを提供するものとして取り上げることができる。特にコンピュータが生成する

3次元仮想環境の提示が重要な場合においては、その効果は大きい。また、遠隔地ユーザとの協調作業においても、同一の仮想環境の中にユーザを配置することで対面環境を実現でき、通常のビデオ会議システムでは困難な臨場感のあるコミュニケーションを可能にする。しかし、逆に、対面するユーザ間の協調作業においては、目の前に存在する相手を直接見ることができなくなり、それがコミュニケーションの質を低下させる原因にもなる。また、仮想環境の提示だけではなく、その環境内におけるインタラクションを考えた場合、現在の人工現実感にはまだ多くの問題が残されている。特に、力覚フィードバック装置の自由度に起因する視覚・力覚系の不整合性の問題は、インタラクションを考える上で重要である。

2.2 拡張現実感インタフェース

人工現実感がユーザを仮想世界の中に没入させるのに対し、拡張現実感(Augmented Reality)は、現実世界の中に仮想物体や情報を重畳する技術である[1]。技術的な側面から見ると、これは、(1)幾何学的整合性問題、(2)光学的整合性問題、(3)時間的整合性問題に分けて考えることができ、それぞれの課題に対して現在も精力的に研究がなされている[2]。幾何学的整合性問題とは、表示される仮想物体が現実世界に対し幾何学的な矛盾を起こさないようにする問題であり、最も基本的な問題として位置付けられ、3次元位置計測およびシステムキャリブレーション問題に帰着する。これまでに多くの方法が提案されてきたが、画像センサを使用する方法は、ビデオスルー方式[1]という映像提示方式に適しており、最も広く利用される方法の一つになっている。特に簡単な形状のマーカーを使用することにより、精度や安定性の向上、処理の高速化を容易に達成することができる。正方形マーカーを使用しその4頂点の座標値から計算する方法[3][4]や正方形マーカーと点マーカーを併用し部分隠蔽に対応する方法[5]、また、ジャイロセンサなど他のセンサからの情報も取り入れ精度の向上を図ったり[6][7]、頭部の高速移動に対応した方法[8]などが提案されている。マーカーを使用しない方法についても、高速ハードウェアによるテンプレートマッチングによる方法[9]や色情報を利用した多重ヒストグラムマッチングによる方法[10]が提案されているが、安定性や速度の面でまだ研究段階に留まっている。

拡張現実感をアプリケーションの側面から見ると、その最も一般的な適用場面は、ユーザの実世界でのタスク遂行を支援するというものである。例えば、仮想物体を実物体上に重畳表示することによって、組み立て作業[11]、医療活動[12]、メンテナンス作業[13]を支援する

システムなどをあげることができる。また、文字情報の重畳表示によって実世界内の物体に注釈付けを行うことで、ユーザの記憶を補ったり、状況に応じて適切な情報を提供することも可能になる[14][15]。このような応用は、ウェアラブルコンピュータにも適しており、ナビゲーションや観光ガイドなどに利用できる[16]。これら全般にわたる特徴は、目的が実世界での活動の支援であること、主要機能が視覚情報の提示であることである。

一方、コンピュータ内の情報操作は仮想世界での活動と位置付けることができ、それは従来ディスプレイ、キーボード、マウスといったデバイスを用いて行われていたが、これを実世界内で行えるようにすることを目指した拡張現実感応用もある。この考え方に関しては、仮想世界にユーザを没入される人工現実感でも類似のシステムを構築することができ、仮想物体や情報を実世界で取り扱うことの優位性が問われるが、特に複数人での共同作業場面では、拡張現実感の優位性が報告されている[17]。また、別のアプローチとして、プロジェクトを利用することでディスプレイを拡張し、実物の机の上を情報提示スペースとするシステム[18]や、大型ディスプレイやラップトップコンピュータのディスプレイなども含めさまざまな物体の表面を情報提示スペースとして統一して取り扱うことのできるシステム[19]も開発された。これらは、まさにコンピュータ内の情報を実世界で操作することを目指したものであるが、一般的な拡張現実感との差異は、その情報提示が物体表面という2次元平面内に限られることである。CADモデルのような計算機内の3次元仮想物体を実3次元空間内に提示し、それを複数のユーザが共有し共同作業を行うシステムも提案されている[17][20]。しかし、これらにおいても表示された仮想物体の操作に関しては、システム固有のインタフェース方式を用いる必要があり、現実にあるかのように見える仮想物体を、現実のものと同じようには操作することはできない。

2.3 Tangible User Interface

Tangible User Interface (以下TUIと省略)のコンセプトはIshiiらによって詳細に説明されている[21]。単純に和訳すると触知できる物体で構成されたインタフェースとなるが、重要な点は、そのインタフェースがインタラクションにおけるフィードバック系の空間的・意味的整合性を維持することである。また、インタフェースの物理的な形状が発するアフォーダンスも有効に利用されなければならない。例えば、マウスによるポインティングにおいてはマウス動作とポインタ動作の間に意味的整合性は保たれるが、操作する場所(マウス本体)とポインタの場所(ディスプレイの中)に空間的ギャップが存在

し、その因果関係が見えない。

TUIの長所は、ユーザが正しいメンタルモデルを容易に構築できる点にある。GUIにおけるメタファの利用がディスプレイ内の画像および音声に制限されていたのに対し、TUIでは実世界の物体が直接操作対象として使用されるために、メタファ設計の自由度が増すからである。また、インタフェースの物理的特性が発するアフォーダンスや拘束性が、操作の容易性を高める。

2.4 Tangible Augmented Reality

本節では我々が提案する拡張現実感システムのインタフェースデザイン指針である Tangible Augmented Reality [5]について述べる。

前節で述べたようなことから、従来GUIによって構成されていたインタフェースにとってかわって、TUIが利用される例が登場するようになった。しかし、TUIを構成する上で問題となるのが、コンピュータからの出力系の構成である。例えば、電子回路の組み込まれた三角形の板をいろいろな形状に組み合わせることで物語を生成するシステム[22]では、その映像表示には依然としてディスプレイを使用しており、行為を行う空間とその行為による反応が現れる情報提示空間が一致していない。このことは、コンピュータが生成する仮想物体や多くの情報を取り扱うタスクにおいて、特に問題となる。2.2で述べたプロジェクトを用い、実世界内の机や壁といった面の上に、情報を投影する方法は、操作空間と情報提示空間を同一化するよい方法ではあるが、情報提示空間が2次元世界となってしまう、インタラクション空間がGUIの世界から実世界に飛び出してきたことの特徴を半減させてしまう。さらに、プロジェクトの投影空間がインタラクション空間を制限してしまう。

しかし、拡張現実感技術を用いてインタフェースを構築すれば、この問題は容易に解決できる。つまり、拡張現実感の有する実世界内の適切な位置に3次元仮想物体や情報を提示する技術をTUIの出力系に用いることで、3次元的なインタラクションが空間的な制約も受けずに実現できる。また、拡張現実感の側面から見たときには、インタラクティブなアプリケーションを開発する際の一つの有効なインタフェースデザインコンセプトとしてTUIをとらえることができる。我々は、これをTangible Augmented Reality(以下TARと省略)と呼んでいる。しかし拡張現実感が提示する3次元仮想物体自体は、力覚フィードバックを有していないために、TARの特性を有効に利用するためには、この点を考慮したインタフェース設計が重要となる。具体的なデザイン指針を以下に示す。

- (1) 仮想物体は、違和感なく実世界に融合されなければならない。
- (2) 実物体および仮想物体の形状が発するアフォーダンスは、インタラクションに利用されなければならない。
- (3) インタラクションによる仮想物体の振る舞いは、日常的な経験則に反するものであってはいけない。
- (4) 複数の対象に対するインタラクションや複数種類のインタラクション機能が、同時に実行されなければならない。

我々は、このTARに基づくアプリケーションを試作し、その有効性を検証している。これは、計算機内の3次元仮想物体の3次元実空間での操作や、それを媒介にしたコミュニケーションの創発や活性化を目的とし、さらには実世界内に存在する実物体と仮想物体を同一の方法で操作できるようにすることで、ユーザビリティの向上を目指す。

MagicBookでは、仮想物体を媒介にしたコミュニケーションの創発や活性化に重点をおき、これまでに述べた拡張現実感での仮想物体提示と没入型人工現実感での仮想物体提示の両方を実現し、それらのモードをユーザが容易に切り替えることができるようにしたものである。さらに、複数のユーザが、お互いのモードやそのモードにおける視点を確認するためのアバタ表示を取り入れている。このような特徴を持たせることで、対面コミュニケーション状況における拡張現実感によるコミュニケーションの疎通性の維持と人工現実感による仮想世界への没入体験を可能にした。MagicBookの詳細の技術情報や評価実験に関しては[23]で述べているが、ここでは、そのインタフェースの特徴について3.1で述べる。

MagicPaddleは、3次元仮想物体操作を現実の3次元空間で行うシステムであり、その特徴はまさにTARのデザインコンセプトの具現化である。小さな紙製のへらをインタフェースデバイスに、あたかも実際の物体を操作しているかのような感覚で仮想物体の操作を可能にした。MagicPaddleの技術的な情報と初期のデザインコンセプトは[5]で述べられており、これを複数人のユーザで同時に使用した場合の評価に関しては[24]で述べられている。ここでは、そのインタフェースのデザインコンセプトを中心に3.2で説明する。

3. アプリケーション

本章では、TARに基づき試作したアプリケーション「Magic Book」および「Magic Paddle」を紹介する。これらは、ビデオシースルー方式の拡張現実感システムであ

り、HMDに取り付けられた小型カメラにより撮影された画像上に仮想物体を重畳し、それをHMDに表示する(図1)。仮想物体を適切な位置に表示するための物体のトラッキングには、我々の開発したARToolKitという公開ライブラリを使用しており、その基本的な動作原理は[25]で述べられている。ARToolKitは、黒色正方形マーカを使用し、その上に3次元仮想物体を表示する。処理速度は現状の標準的なパーソナルコンピュータにおいて30fpsを達成できる。図2にその処理の流れを示す。カメラにより撮影された画像は2値化され、四角形領域をマーカ候補として抽出する。四角形領域内部のパターンを事前に登録されているパターンと照合することでマーカを識別し、その4頂点座標値からマーカの位置姿勢を推定する。これにより、マーカ座標系からスクリーン座標系までの変換行列が決定し、マーカ座標系上に仮想物体を描画できる。つまり、実物体に正方形マーカを張り付けることで、TARのインタフェースを構成する。

3.1 MagicBook

MagicBookは、絵本のメタファを利用した3次元仮想物体の提示手段である。図3に、インタフェースの構成

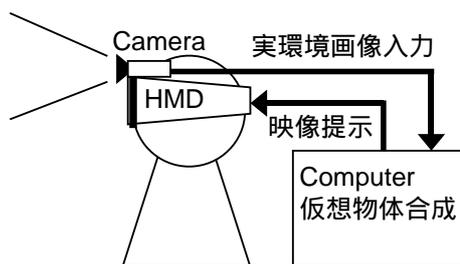


図1. ビデオシースルー方式の拡張現実感システムの構成

を示す。インタフェースは、表示デバイスと本からなる。本の各ページには、そのページに割り当てられている仮想物体に関する記述と正方形マーカがあり、表示デバイスを通して見ることで、ユーザは立体絵本を見ている感覚で仮想物体を見ることができる。ページ毎に仮想物体が割り当てられているために、ユーザのページをめくるといった行為が、仮想物体の選択というコマンドに対応する。この関係は、極めて直感的であり、ユーザは容易に正しいメンタルモデルを構築できる。

表示デバイスには、ビデオシースルー型の拡張現実感システムを構成するための小型カメラと眼鏡型ディスプレイが取り付けられている。また、手元にはトグルスイッチとプッシュスイッチが取り付けられている。ユーザはトグルスイッチを切り替えることで、本の上に表示されている仮想3次元世界の中に入り込み、いわゆる没入型人工現実感環境で、仮想世界を体験することもできる。このとき、表示デバイスに取り付けられた角度センサによりユーザは自由に環境を見回すことができ、また、プッシュボタンを押すことで前進が可能で、ユーザは仮想環境内を動き回することもできる。図4に利用風景を示す。

MagicBookのもう一つの特徴は、多人数での対話を支援するための手段を有するところにある。複数のシステムをネットワークで接続し、各ユーザが選択している提示手法およびユーザの視点位置情報をユーザ情報を管理するサーバプロセスに伝え、同時に他のユーザの情報を受け取る。得られたユーザの視点位置に、そのユーザに対応するアバタを表示することで、ユーザは相手の位置を容易に理解できる。図5にその例を示す。

特徴的なところは、異なる提示手法を選択している

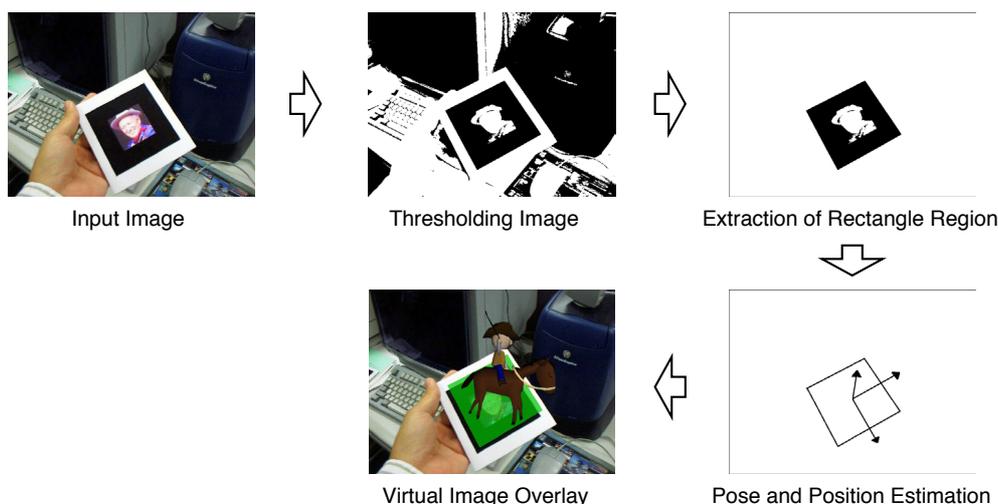


図2. ARToolKitの処理の流れ

ユーザ間においても相手の位置を知ることができる点にある。図5(a)では、拡張現実感環境にいるユーザが仮想世界を見ているところである。もう一人のユーザが仮想世界に入り込み、その中を動き回っている様子を天空の視点から眺めている状況である。このユーザは、仮想世界内のユーザのナビゲーションを行ったり、大局的な情報の提供を行うことができる。図5(b)は、逆の立場からの画像である。仮想世界内のユーザは、拡張現実感環境のユーザの視点を天空にいるアバタの位置から理解できる。

MagicBookは、対面する複数のユーザが、仮想世界や仮想物体を見ながらコミュニケーションをとるという状況を想定し、それを支援するためのシステムとして開発された。TARとしてのインタフェース要素は絵本メタファの利用に限られているが、単一の表示デバイスで拡張現実感環境と没入型人工現実感環境の2種類の仮想世界提示をサポートしている。

このシステムはコンテンツに依存しない汎用的なインタフェースシステムであることから、芸術やエンターテインメントの分野での応用も可能である。特に博物館などでの3次元デジタルデータ化されたコンテンツの鑑賞装

置としては直接利用できる。また、通信機能を活用したゲーム性のあるコンテンツなども容易に実現できる。

3.2 MagicPaddle

MagicPaddleは、3次元仮想物体の操作インタフェースである。厚紙で作られたヘラの形をした物体(以後パドルと呼ぶ)をインタフェースデバイスとして使い、仮想のミニチュア家具を机の上の仮想の部屋の中に配置する(図6)。このシステムでは、表示用デバイスとしてMR研究所で開発されたCOASTAR[26]という拡張現実感用ステレオHMDを利用している。これは、2台の小型カメラを内蔵し、HMDのスクリーンに映る映像が、人間の目の視点、視野角と整合性がとれるように設計されている。また、このHMDを用いることでトラッキング手法にステレオ計測法を導入でき、計測精度も向上した。さらに、仮想物体を操作する際にマーカは隠蔽され、トラッキングに失敗することが予想されるために、その対策として、複数のマーカを使用したトラッキングアルゴリズムを開発した[5]。

ユーザがシステムを使用している様子を図7に示す。約30種類の家具が仮想物体として準備されており、そ

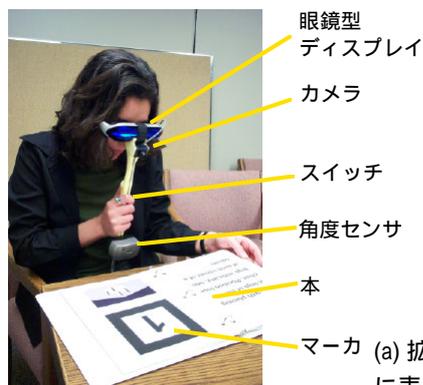
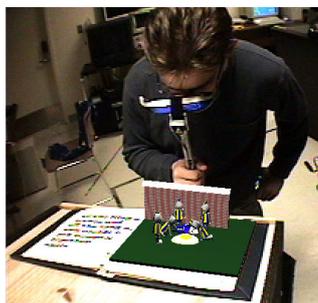
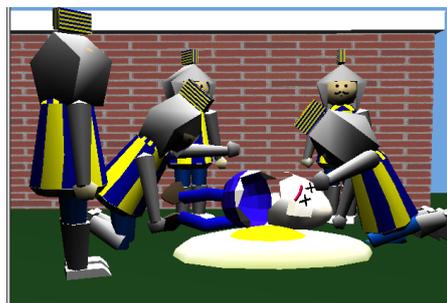


図3．インタフェースの構成



(a) 拡張現実感環境において、本の上に表示された仮想世界を見ている。



(b) 没入型人工現実感環境において、仮想世界の中から仮想世界を見ている。



(a) 拡張現実感環境から仮想世界に没入したユーザのアバタを見ている。



(b) 仮想世界の中から拡張現実感環境のユーザのアバタを見ている。



(c) 仮想世界の中で、同じ仮想世界にいるユーザのアバタを見ている。

図5．他のユーザの視点位置の認識を可能にするアバタ表示

れらは、カタログ本のメタファを利用し、ページ毎にカテゴリ分けされて割り当てられている。図8に示すように、ページの左には、写真として家具が印刷されており、右のページにそれと同じ家具の3次元仮想物体が提示される。机の上には複数のマーカが配置されており、そこには仮想の部屋が表示されている。ユーザはカタログ本から、家具を選択し、部屋の中にそれらを配置する。このユーザの操作方法のデザインにTARのコンセプトを導入した。

仮想物体の操作は、すべてパドルによって行われる。一般にどのような操作インターフェースを採用するかは、非常に重要な問題である。仮想物体の操作にはデータグローブなどを利用し、手指による直接的な操作方法など

も考えることができる。パドルを使用することは、そのような直接的な操作とは対照的な間接操作であり、実物体を対象にした場合を想像すると、明らかにパドルによる間接操作は手指による直接操作に劣る。これは、人間の手指が非常に多くの自由度を有し、さらに、その自由度を十分に利用しながら操作を行うことができる技能を人間が有しているからである。一方、仮想物体操作を考えた場合には、この人間の高い技能が逆に問題となる。つまり、インタラクティブな操作を実現するためには、人間の行為に対応した自然な仮想物体のリアクションを提示する必要があるが、人間の手指の多様な動きに対して、自然なリアクションを精度よくリアルタイムに提示するのは難しい。特に力覚系の問題が顕著で、現状においては、手指の自由な動きに応じたフィードバックを提示するのは不可能である。すなわち、手指による仮想物体操作インターフェースを考える場合には、フィードバック系を単純化しなければならず、これが人間の行為とそのフィードバックとの間に不自然さを生み、操作性において大きな問題となる。

逆にパドルのような操作自由度の乏しいデバイスを持たせた場合には、人間の行為はその形状から非常に多くの制約を受けると同時に、その制約は容易に人間に理解される。このことは、システムの側から見ると、ごく狭い限られた範囲の自由度に対してのみフィードバックを



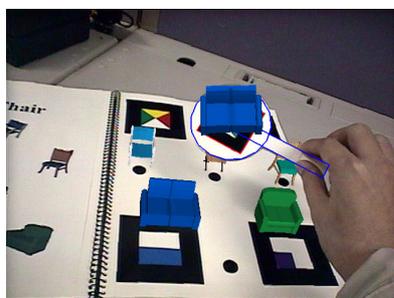
図6. 机の上で家具のレイアウト



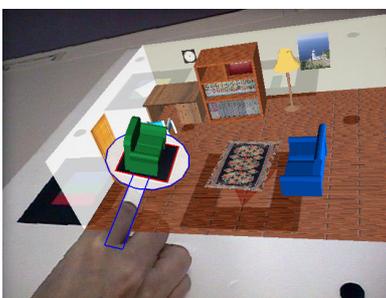
図7. ユーザの操作風景



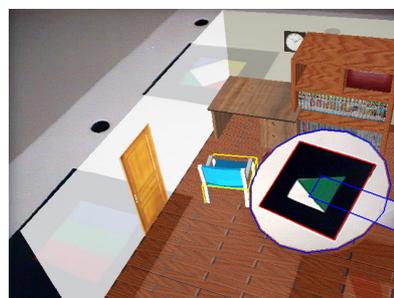
図8. 家具の選択には、カタログ本のメタファを使用



(a) 仮想物体を本からすくい上げた



(b) パドルを傾け、仮想物体を置く



(c) 仮想物体を押して移動させる

図9. パドル操作による仮想物体の操作

実現すればよい。つまり、パドルを持たせることで、人間の行為に大きな制約を与えることになるが、同時に人間の行為に対応した自然なフィードバックを実現することが可能となる。具体的には、パドルを手にした場合に人間が行うと考えられる行為は、物体とのインタラクション動作として(1)すくう、(2)押す、(3)たたく、の3種類、パドル単独の行為としては、一般的な移動動作以外に、(4)傾ける、(5)振る、の2種類程度に限定できる。TARのデザイン指針に従うと、これら行為に仮想物体の自然なリアクション動作を対応させる必要があり、それによりユーザは容易に正しいメンタルモデルを構築できる。具体的には、下記のようにリアクション動作を割り当てた。また、図9にそれらの例を示す。

(1) すくう

カタログ本の上に表示されている仮想物体に対して「すくう」動作を行うことで、その仮想物体はパドル上にコピーされる。

(2) 振る

パドル上に仮想物体がある状態では、パドルを「振る」ことで、その仮想物体は消去される。

(3) 傾ける

パドル上に仮想物体があり、それを部屋の上で「傾ける」と、仮想物体はパドルから滑り落ち、部屋の中に配置される。

(4) 押す

部屋の中に配置された仮想物体をパドルで「押す」ことで、仮想物体はその位置や角度を変える。

(5) たたく

部屋の中に配置された仮想物体をパドルで「たたく」と、その仮想物体は削除される。

ビデオスルー型の拡張現実感システムでは、背景の実画像の上に仮想物体が表示されるために、現実世界の物体と仮想物体の前後関係に矛盾が生じる場合がある。これはインタラクションにも不自然さを与える原因となる[24]が、この問題の解決には奥行き情報の計測が必要となる[27]。MagicPaddleにおいては、操作インタフェースであるパドルはマーカを持っているために、その3次元位置情報はシステムに保持されている。そこで、仮想物体の描画処理の直前に、画像内のパドル領域に対して、実画像から計測した奥行き値を設定することで、正しい前後関係が表現できるようになった(図9)。ただし、手指などに対しては、3次元情報を計測することをしていないために、前後関係に矛盾が生じる場合がある。そこで、パドル操作時においては、仮想物体を半透明表示するようにした。

4. まとめ

本論文では、Tangible User Interfaceと拡張現実感を組み合わせたTangible Augmented Realityのデザインコンセプトとその特徴を説明した。また、具体的なプロトタイプシステムとしてMagic BookおよびMagic Paddleを紹介した。Magic Bookは、仮想3次元絵本であり、ユーザは実際の本の上に、仮想的な3次元オブジェクトを見ることが出来る。さらに、そのシーンの中に入り込むことも可能である。また、この仮想世界の中に、各ユーザの視点位置にアバタを表示することで、複数のユーザ間のコミュニケーションを支援する。Magic Paddleは、家具のレイアウトシミュレーションシステムで、パドルを用いて、仮想の家具を操作できる。パドルの物理的な形状特性を利用した自然で直感的なインタフェースを実現した。

Tangible Augmented Realityの有効性を検証するためには、今後、これらシステムの詳細な評価実験を実施する必要がある。また、MagicBookとMagicPaddleを組み合わせることで、協調型の仮想世界構築支援システムを実現したい。

参考文献

- [1] Azuma, R., A Survey of Augmented Reality, Presence: Teleoperations and Environments, 6, 4, pp.355-385, 1997.
- [2] Azuma, R. et al, Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, No.6, pp.34-47, 2001.
- [3] Rekimoto, J., Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality, Proc. APCHI'98, 1998.
- [4] Klinker, G., Stricker, D., Reinert, D., Augmented Reality: A Balancing Act Between High Quality and Real-Time Constraints, Mixed Reality (Edited by Y. Ohta, H. Tamura), Ohmsha, pp.325-346, 1999.
- [5] Kato, H. et al, Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, Proc. ISAR2000, pp.111-119, 2000.
- [6] State, A. et al, Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking, Proc. SIGGRAPH 96, pp.429-438, 1996.
- [7] 佐藤, 山本, 田村, カメラと3次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.295-302, 1999.
- [8] 横小路, 菅原, 吉川, 画像と加速度計を用いたHMD上での映像の正確な重ね合わせ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.589-598, 1999.
- [9] Uenohara, M. et al, Vision-based Object Registration for Real-time Image Overlay, Proc. CVRMed'95, pp.13-22, 1995.
- [10] 大隈, 蔵田, 坂上, 対象認識に基づく着用者視点映像への

- 3次元情報提示, 信学技報 PRMU, Vol.154, pp.53-60, 2001.
- [11] Caudell, P. et al, Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes, Proc of Hawaii Int. Conf. on System Sciences, pp.659-669, 1992.
- [12] State, A. et al, Techniques for Augmented-Reality Systems: Realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies, Proc. SIGGRAPH 96, pp.439-446, 1996.
- [13] Feiner, S. et al, Knowledge-based Augmented Reality, ACM Communications, pp.52-62, 1993.
- [14] Feiner, S. et al, Windows on the World: 2D Windows for 3D Augmented Reality. Proc. UIST'93, pp.145-155, 1993.
- [15] Rekimoto, Ju. et al, The World Through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments, Proc UIST'95, pp.29-36, 1995.
- [16] T. Höllerer et al., Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System, Computers and Graphics, Vol. 23, No. 6, pp. 779-785, 1999.
- [17] Kiyokawa, K. et al, SeamlessDesign for 3D Object Creation, IEEE MultiMedia, ICMCS '99 Special Issue, 7, 1, 22-33, 2000.
- [18] Wellner, P., The DigitalDesk calculator: Tangible manipulation on a desk top display, Proc. UIST'91, pp. 27-34, 1991.
- [19] Rekimoto, J. et al, Augmented Surfaces: A Spatially Continuous Workspace for Hybrid Computing Environments, Proc. CHI'99, pp.378-385, 1999.
- [20] Rekimoto, J., Transvision: A Hand-held Augmented Reality System for Collaborative Design, Proc VSMM'96, 1996.
- [21] Ihsii, H., Ullmer, B. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms. Proc. CHI97, pp.234-241, 1997.
- [22] Gorbet, M. et al, Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography, Proc. CHI'98, 1998.
- [23] Billinghurst, M., et al, The MagicBook: a transitional AR interface, Computers & Graphics, 25, pp.745-753, 2001.
- [24] 今本, 加藤, 川本, 橋, 拡張現実感環境における仮想物体操作時のコミュニケーションに関する検討, 信学技報 HIP, Vol.101, No.594, pp.31-36, 2002.
- [25] 加藤, Billinghurst, M., 浅野, 橋, マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本パーソナルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- [26] Takagi, A., Yamazaki, S., Saito, Y., Taniguchi, N., Development of a stereo video see-through HMD for AR systems, Proc. ISAR2000, pp.68-77, 2000.
- [27] Yokoya, N., Takemura, H., Okuma, T., Kanbara, M., Stereo Vision Based Video See-through Mixed Reality, Mixed Reality (Proc. ISMR99), Springer-Verlag, pp.131-145, 1999.