

## MR空間における仮想シールを介した シンタックスの異なる実物体の遠隔共有手法

宮 狭 和 大<sup>†</sup> 坂 内 祐 一<sup>†,††</sup> 鈴 木 雄 士<sup>†</sup>  
玉 木 秀 和<sup>†</sup> 重 野 寛<sup>†</sup> 岡 田 謙 一<sup>†</sup>

実物体に基づいた遠隔コラボレーションでは、遠隔の実空間の間に存在する空間構造の差異を考慮する必要がある。特に既存システムではそれぞれの空間にシンタックスの異なる実物体を配置し、作業対象としてコラボレーションするものが存在しなかった。そこで本研究では、物体の表面に柔軟に貼り付けることができる「シール」の性質に着目し、これを複合現実感(MR)技術と組み合わせた手段として、仮想のシールを遠隔のそれぞれの実物体に基づいて貼り付けることで、実物体の間に存在するシンタックスの違いを吸収してユーザによる作業のセマンティックスを共有する手法を提案する。そして、実物体に対するポインティング機能を有したプロトタイプシステムを実装し評価実験を行った結果、シンタックスの異なる実物体間で、作業の情報をその意味を損わずに共有できることが確認された。

### A Sharing Method of Real Objects Differ in Syntax each other Based on a Virtual Sheet between Remote Mixed Reality Spaces

KAZUHIRO MIYASA,<sup>†</sup> YUICHI BANNAI,<sup>†,††</sup> YUJI SUZUKI,<sup>†</sup>  
HIDEKAZU TAMAKI,<sup>†</sup> HIROSHI SHIGENO<sup>†</sup> and KEN-ICHI OKADA<sup>†</sup>

In remote collaboration based on real objects, the difference of the space structure between the remote real spaces should be considered. In conventional method it is difficult for users to collaborate based on the real objects which differ in syntax each other. To address this issue, we focus attention on a sticker or a sheet which can be attached on a physical object according to its surface. And as a method which Mixed Reality (MR) technology is combined with it, we propose an information sharing method of semantics which each remote user interacts with a real object, by using virtual sheet which can be attached to each real object according to its surface and can absorb the difference in syntax between these real objects. Then we implemented a prototype system which has pointing function and conducted experimentation. As a result it proved that it is possible to share the information of the interactions without losing the meaning between the real objects which differ in syntax each other.

#### 1. はじめに

これまで遠隔コラボレーションシステムとして、遠隔地にいるユーザの間でビデオデータを通信したり<sup>1)</sup> 仮想空間を共有したりするシステム<sup>2),3)</sup> が数多く存在したが、ユーザが対面環境にいるときに実際のモノを互いに直接操作しながら行う協調作業で実現されるような直感的なインタラクションが不可能であった。そこで、各々の遠隔ユーザが実際に協調作業の対象と

なる実物体を所有し、この実物体を通じて互いに作業における操作を入力したり相手による操作のフィードバックを直接受けたりすることで、ユーザが自分のいる実空間や実物体を遠隔の相手と共有しているかのような環境でコラボレーションを行うシステムが考えられ始めている。これにより、たとえば対面環境で行う装置の利用方法の指導などを、同じように遠隔で行える社会システムの実現が期待できる。

しかし、元々遠隔の実空間には構造的な違いが存在するため、既存の実物体に基づいた遠隔コラボレーションシステムでは、遠隔の実空間を共有する環境を実現するために、それぞれの実空間に大きな制限を加える必要があった。

これに対し我々は、遠隔ユーザの間で共有する空間

<sup>†</sup> 慶應義塾大学理工学部情報工学科

Department of Information & Computer Science, Faculty of Science & Technology, Keio University

<sup>††</sup> キヤノン株式会社環境システム開発部

Environment New Business Center, Canon Inc.

の範囲を実物体に限定することで、各ユーザが自由に実物体を持って動かすという実物体をポータブルに扱いながらのコラボレーションの実現というアプローチを行った<sup>4)</sup>。

しかしながら、これらの取り組みではユーザによる実物体への操作をそのまま遠隔の相手の実物体に伝えるだけであるので、作業対象となる実物体は遠隔の間で同一のものにする必要があり、このようなユーザ環境が同じであるという限定された状況でしかコラボレーションを実現することができなかった。

そこで、本研究ではものの表面に柔軟に貼り付けることができる「シール」の性質に着目し、それを MR の技術と組み合わせて応用したアプローチとして「仮想シールを介したシンタクスの異なる実物体の遠隔共有手法」を提案する。本稿でのシンタクスとは、実物体の内・外部の構造、形状、大きさのような物理的特徴を決定付ける包括的な意味での物理構造を表す。本手法では、それを貼り付けた実物体の上で行われる作業の情報を遠隔地間で柔軟に共有できる仮想のシールを定義する。これを用いることでシンタクスの異なる実物体の間でも、作業の本質的な意味（ここではセマンティクスと呼ぶ）の共有が可能となる。

ユーザは、この仮想のシールを介して実物体を共有しているかのような環境の中で、他のユーザによる実物体とのインタラクションを直感的にアウェアしながらコラボレーションを行うことができる。

そして、提案概念を実現するためのプロトタイプシステム：MR Shared Surface を実装し、このシステムが実際に提案概念を満たして機能するかの検証を評価実験により行った。

## 2. 実物体に基づいた遠隔コラボレーションシステム

実物体に基づいた遠隔コラボレーションシステムとは、遠隔地にいる各ユーザが互いに作業対象となる実物体を所持している環境において、各自が実物体に対して行う操作の情報を遠隔の相手の持つ実物体に基づいて提示することで、実物体を通じて互いの操作をアウェアしあいながらコラボレーションを行うシステムのことである。このシステムでは、実物体におけるユーザが直接触れて操作（入力）する部分と、遠隔でやりとりする情報を提示（出力）する部分が一致する。そのため、あたかも実物体（あるいは実空間）を共有しているかのような感覚が得られ、2D ディスプレイ上の GUI によってビデオデータや仮想空間などの情報を伝達するシステムに比べ、情報を入力する実物

体や遠隔の相手との直感的なインタラクションが実現される。ユーザインタフェースの観点からは、ユーザ間で実物体という触れて感知できる（タンジブルな）メディアを介して、通信のためにデジタル化された互いの操作の情報にアクセスするという点で、タンジブル・インタフェース<sup>5)</sup>が実現されている。

以下に実際のシステム例を紹介する。

Ishii らは、タンジブル・インタフェースの概念を基盤に、それを遠隔環境に拡張する試みを行っている<sup>5),6)</sup>。PsyBench<sup>6)</sup> は、遠隔で同じ構造の机と机上の実物体を共有するシステムである。このシステムでは、遠隔のそれぞれの空間に設置された机の下に電磁石を取り付けた XY ステージを設け、机上の物体の底部にも磁石を配置しておき、一方の空間において机上の物体が動くとは方においてもそれに相当する物体が同じ動きをとる設計になっている。PsyBench のプロトタイプとして、遠隔の二者がお互い所有する実物のチェスボードを介してコラボレーションを行うシステムが構築されている。

InTouch<sup>6)</sup> は、遠隔で同じ構造のローラの動きを共有するシステムである。PsyBench が平面上で実物体の動きを対象としているのに対し、フォースフィードバック技術を利用して 3 本のローラの回転の動きがそれぞれ同期制御されており、見た目の動きだけではなく抵抗力によって相手の力を感じ取ることができる。

これらのシステムでは、磁石式や機械式のアクチュエータによる物の動きに置き換えられた遠隔ユーザの操作を肌で感じ取ること、仮想的に相手の存在感を感じる事が可能となっているが、物を動かすための物理的制御に制限があるうえに、相手側のアウェアネス情報が少ないという問題点も存在する。

上杉らは、遠隔の 2 人のユーザ間で互いに同期して回転するディスクと、映像表現により双方のテーブル上の情報を共有する機構からなるシステム：Lazy Susan を構築している<sup>7)</sup>。このシステムでは、各空間に設置された同じ構造の机上面に同期回転ディスク装置を組み込むことで、一方の空間でユーザがディスクを回転させると他方においても同じ回転の動きが表現される仕組みとなっている。したがって、上記の InTouch 同様、物体の動きを通じて遠隔ユーザによる物体とのインタラクションをアウェア可能となる。それに加えこのシステムでは、テーブルの真上に設置されたカメラからテーブル上でユーザが行う作業の様子を撮影し、遠隔ユーザのテーブル上に投影させる機能を有しており、ユーザはディスクの物理的な動きに加え、テーブル上に投影された遠隔ユーザの手の表示から、

相手の状態をアウェア可能である。

以上の例では、双方の空間に同一の実物体を、ユーザにとって同じ位置に固定して配置したうえで状態の同期をとることで、それぞれのユーザが存在する実空間の構造の差異をなくし、両者が場を共有しているかのような環境を生み出しているが、遠隔地間で作業を行う空間の構造を同一にするという厳しい制限が強いられる。

これに対し、磯らによる ComAdapter では実物体の配置の違いという一種の空間構造の差異を吸収・整合化する試みを行っている<sup>8)</sup>。遠隔にそれぞれ同一のイスと TV が同じ数だけ存在する 2 つの空間を設定し、配置だけを変えることにより構造の異なる 2 つの空間を構成する。一方の空間で、TV を指し示すなどの動作を行うと、他方の空間においてアバタが同じ TV を指す動作に置き換えられ、同じ動作を行っているように見せることができる。しかし、このシステムでは、実物体の位置が実空間で固定された場合しか想定されていないため、ユーザが実物体を自由に動かすというインタラクションを行うことができず、自由に手にとって動かせるような作業対象物を扱うことができない。

この問題に対する 1 つの解決法として、遠隔地間で共有する情報の範囲を空間全体ではなく物体に限定することで、空間の中における物体の位置・姿勢を考慮することなく情報共有する手法があげられる。

Sekiguchi らによる RobotPHONE は、遠隔に存在する手に持てるサイズのロボットの動きをそれぞれ同期させることで、ユーザが好きな持ち方でロボットを持ちながら、それを介してユーザ間で身振りや手振りを伝えることができるシステムである<sup>9)</sup>。このシステムは、テディベア型のロボットの動きをインターネット経由で伝えあうことで、片方のテディベアが腕を振るともう片方の同じ腕も同じように動くという仕組みになっている。

坂内らは、作業対象となる実物体の複製（タンジブルレプリカ）を遠隔ユーザ間で所有し、ユーザがレプリカを手を持ってポインティングを行う様子を、MR の技術を用いて互いの持つレプリカ上に表示しあうことでコラボレーションを行うシステムを開発している<sup>4)</sup>。このシステムでは、ユーザの持つレプリカとポインティング用のスタイラスを常時センシングしレプリカを基準とするスタイラスの位置・姿勢を求め、各自の操作するスタイラスの状態を、互いに相手側のレプリカを基準とした座標系に仮想物体として表示する。これにより、あたかもレプリカを共有しているかのよ

うな環境で、互いのポインティングの様子をアウェアしあうことができる。

しかし、これまでにあげたシステムはすべて遠隔ユーザの間で所有しあう実物体そのものは同一のものに限られてしまい、より汎用的なコラボレーションを考えるうえで大きな制限となる。本稿では、この実物体の組合せが同一ではない（シンタックスが異なる）場合にもコラボレーションを可能にするシステムの実現を試みる。

### 3. 提案手法

#### 3.1 シンタックスの異なる実物体間における作業のセマンティックスの共有

実物体に基づいた遠隔コラボレーションにおいて、用いる実物体のシンタックスが異なっても、ユーザが行う作業のセマンティックスは共有できる必要がある。これに関して、シンタックスの違いの程度と関連付けて実物体の組合せの関係を分類化することで、どの程度の違いの範囲でセマンティックスが共有可能なのか、そして実際にどのような関係でコラボレーションの有用性が認められるのかに言及する。

表 1 は、実物体の組合せの分類を表している。

1 番目の分類としては、実物体の間でそれ自身が果たす役割に共通性があるかどうかで分けることができる。実物体の間で役割に共通性があることは、作業においてそれらが表現できるものに共通性があることを意味するため、この共通の表現を用いれば作業のセマンティックスを共有できる可能性があるといえる。逆に、役割に共通性が見られない場合は、セマンティックスの共有は不可能である。たとえば、文字情報の表現を役割とする媒体間では意味的なつながりを持つことができるが、各媒体が表現するものがそれぞれ文字情報と演奏情報のように異なる場合それが不可能である。また役割が共通するだけでは実物体が物理的に限

表 1 実物体の組合せの分類  
Table 1 Classification of a pair of real objects.

|        |                        |                          |                         |                          |     |               |    |
|--------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----|---------------|----|
| 枠組みの種類 | ① 役割に共通性があるか？<br>Yes → | ② 操作方法に共通性があるか？<br>Yes ⇒ | ③ 構成部位の配置が同じか？<br>Yes ⇒ | ④ 大きさ・形状が一致するか？<br>Yes ⇒ | Yes | セマンティックス共有可能性 |    |
|        |                        |                          | No                      | No                       | No  |               | あり |
|        | No                     | No                       | ④ 大きさ・形状が一致するか？<br>No ⇒ |                          | Yes |               | なし |
|        |                        |                          | No                      |                          | No  |               |    |

定されるわけではないので、この分類ではシンタクスの制約はない。

2 番目に、1 番目の分類における「Yes」の枠組みに対して、実物体への操作方法に共通性があるかどうかで分けることができる。共通の役割を果たすがその扱いは異なる関係にあるものの組合せとして、たとえば電子的に文字を入出力する媒体と手書きによる媒体との間では、文字情報を表現するという点で共通の役割を持つが、文字入力の方法はまったく異なる。このとき、実物体に基づいたコラボレーションの特徴はユーザが互いの操作を直感的に感知できる点であり、共有できる情報が文字情報のような無形のものに限られる場合、この特徴を活かすことができない。したがって、有用性が得られるのは、操作方法が共通する組合せを用いた場合となる。ここで、実物体間で共通の操作が行えるためには、それらの物理的機能が共通する必要がある、これは実物体を構成する各部位（以降、構成部位と呼ぶ）単位で成り立たなければならない。つまり、シンタクス面で実物体の構成部位が共通する必要がある。例として、キーボードで文字情報を入力するという操作が共通であれば、各キーボードは共通のキーで構成されていることになる。

3 番目に、2 番目の分類における「Yes」の枠組みに対して、実物体の構成部位の配置が同じかどうかで分けることができる。操作方法是共通するが構成部位の配置が異なるものとして、電子機器などにおける機種やバージョンの違いでボタンやスイッチの配置が異なる例が考えられるが、現実的には上記キーボードの例のように操作方法が共通すると構成部位の配置も似かよいため、この分類は便宜的な色合いが強い。

4 番目に、3 番目の分類における「Yes」の枠組みに対して、実物体の大きさ・形状が一致するかどうかで分けることができる。実物体の間で役割・操作方法に共通性があり、かつ構成部位の配置が等しくても、より具体的な部分での役割・操作方法やデザインが違えば、シンタクス面でその大きさ・形状にも差異は生まれる。この枠組みでは、実物体のシンタクスが違っていても操作方法に共通性があることから、ユーザが互いの操作の情報まで把握できる可能性がある。したがって、遠隔で作業のセマンティクスを共有することに意義があれば、コラボレーションの有用性が得られる可能性が高い。この例として以下のものがあげられる。

- 規模が異なる関係にある実物体の組合せ  
大きさ・形状の異なり方は様々なパターンが考えられるが、現実的に特にありうるのは、同じ種類

でもユーザ環境に応じて簡易型・携帯型や子供用のように一般のタイプとは規模が異なる場合である。たとえばこのような関係にあるボードゲームの媒体や楽器の組合せを用いて遠隔での娯楽や学習を目的としたコラボレーションを実現できる可能性がある。

- 2D と 3D の関係にある実物体の組合せ  
作業を行う際、実物である 3D の作業対象物以外に、その物理的情報が 2D の平面図として対応付けられた設計図やマニュアルが利用できる。たとえば、現場で作業を行う作業者の持つ作業対象物と、遠隔から指示を行う指示者の持つ設計図やマニュアルの間で、作業操作や指示のセマンティクスの共有が実現できれば、遠隔作業支援が可能となる。

本稿では、上記のような有用性のあるコラボレーションの実現を目的として、この枠組みにおける作業のセマンティクスを共有する手法を提案する。

### 3.2 MR 空間における仮想シールを介したシンタクスの異なる実物体の遠隔共有手法

本研究では、表示する内容を崩さずにものの表面に合わせて柔軟に貼り付けることができる「シール」の性質に着目し、この「シール」をシンタクスの異なる実物体の表面にそれぞれ貼り付けて作業のセマンティクスを共有する試みを行う。この試みでは処理が面単位（特に平面を基準とする：後述）で行われ、情報共有に必要な面のみがその対象となる。そのため、実物体全体を 3D モデルとして対応付けるよりも処理が軽く、3D の実物体と平面である 2D の実物体の対応付けにも適している。また、ユーザによる実物体への作業情報を遠隔の実物体に提示する手段として MR の技術を用いる。これらを組み合わせることで応用したアプローチとして、我々は「MR 空間における仮想シールを介したシンタクスの異なる実物体の遠隔共有手法」を提案する。

本提案において、遠隔ユーザ間で共有する実物体に対する作業情報は、各ユーザが実物体とインタラクションをしたりそれを操作したりするときの動作の過程や、それにともなって生じる状態の変化の結果を表し、これが作業のセマンティクスを具体化したものに相当する。たとえば、ポインティングを行うときのポインタの動きや、ドローイング・ペインティングを行ったときの、描画状態を表す。

本手法では、ユーザ間で互いに実物体に貼り付けることで、各自の所有する実物体の表面に基づいて作業情報を仮想物体として提示・共有できる「物体共有仮

想シール」を定義する。この仮想シールを利用することで、実物体間のシンタックスの差異を吸収して、作業のセマンティックスを共有することが可能となる。このとき、各ユーザは互いの実物体を共有しているかのような環境の中で、互いに相手による実物体への作業を直感的にアウェアしながらコラボレーションを行うことができる。

さらに本手法では、2章で紹介した坂内らによるレプリカを中心とした物体座標系を応用し、実物体に貼り付けられた仮想シールを基準とした相対座標系に作業情報を表示し共有する。したがって、各ユーザの持つ実物体の位置姿勢が変化しても、相手の空間の実物体の状態に影響を与えない。これにより、ユーザは実物体を手を持って自由に動かしながら作業を行うという、タンジブルかつポータブルなインタフェースが実現されている。

ただし、本手法では作業情報の提示方法として、アクチュエータなどによる物理的動作による表現ではなく、MRを利用した仮想物体による表現を用いているため、ユーザによる作業およびその対象となる実物体はその全体が物理的に変化しないものを想定し、操作のたびに变形するもの（一時的に多少变形してすぐに元に戻る程度のもは除く）や、一部を切り離したり元から複数に分かれていることで各構成部位の位置関係が変化するようなものは対象としない。想定できる例としては、ポインティングによるスイッチ・ボタン操作を行う電子機器や、配線作業やボードゲームのような主要部位に対して細かな部品の設置・操作を行うためのもの（主要部位のみ実物で細かな部品は仮想物体で表現）、描画するためのもの、楽器（形状を大幅に変形させて演奏するものは除く）などがあげられる。

本提案のコンセプトの中心となる仮想シールの機能の詳細を次節で説明する。

### 3.3 物体共有仮想シールの機能

仮想シールの機能は大きく分けて次の3つになる。

- (1) 実物体への作業情報を遠隔で共有する  
ユーザによる実物体への作業情報は、ユーザ間で共有するために仮想物体としてモデル化される（これを共有仮想モデルと呼ぶ）。そして、それぞれの共有仮想モデルのデータが互いの仮想シールを介して双方向で送受信されることで、両者の間で作業情報の共有が実現される。
- (2) 柔軟な貼り付け方により実物体間のシンタックスの差異を吸収する  
一般的な「シール」の持つ性質として「シール」を貼り付ける際、その上に描かれた模様などの

情報（セマンティックス）を崩さずに、様々な実物体の表面形状（シンタックス）に合わせて変形させて貼り付けられることがあげられる。この性質を利用して、模様の代わりにユーザによる作業情報自体を「シール」上に載せる（共有仮想モデルを「シール」と同様に变形させる）ことで、同一の作業情報を各実物体のシンタックスに合わせて提示することができる。

- (3) ユーザ自身の手で貼り付けられる/剥がせる  
一般的な「シール」の持つ性質として、ユーザ自身の手によって実物体の形状に沿って貼り付けられるため「シール」自体はあらかじめ実物体の形状に関する情報を持たないことがあげられる。この性質をそのままシステムに適用することで、あらかじめシステムが実物体の形状モデルを持つ必要がなくなる。さらに、ユーザが容易に「シール」を貼り付けたり剥がしたりできることで、柔軟に作業対象となる実物体を変更・追加できるようになる。

これら3つの機能の詳細に関して、順に以下で説明する。

### 3.4 作業情報共有の仕組み

本提案において遠隔ユーザ間で作業情報の共有を実現するうえで、以下の2つの座標系を定義する。

#### ● 共有仮想シール座標系

実物体に合わせた貼り付けを行う前の初期状態の仮想シールの座標系を表す。本手法では、ユーザ間で共有する作業情報を送受信する際に、共有仮想モデルがいったんこの座標系に必ず変換される。

#### ● ローカル仮想シール座標系

実物体に合わせた貼り付けを行った後の仮想シールの座標系を表す。本手法では、ユーザ間で共有する作業情報が、各地点の実空間においてこの座標系に基づいて表示される。

各地点でのユーザによる作業情報が、どのような流れで遠隔地のユーザに伝えられ、共有されるかを図1により説明する。

図1におけるローカル仮想シール座標系  $V_A$ ,  $V_B$  はそれぞれ、初期状態の仮想シール（共有仮想シール座標系  $V_S$  とする）を、実物体 A, B のそれぞれのシンタックスに合わせて貼り付けた後の座標系を表している。仮想シールを初期状態からそれぞれの実物体に貼り付ける際に行う座標系の変換処理をそれぞれ、変換  $X_A$ ,  $X_B$  とする。

このときそれぞれの作業情報が共有されるまでの流れは以下ようになる。

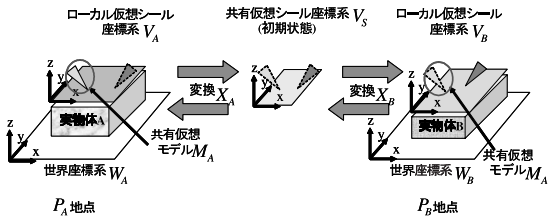


図 1 作業情報共有の仕組み

Fig.1 Information sharing mechanism.

まず  $P_A$  地点における実物体 A への作業情報は、世界座標系  $W_A$  に基づいて共有仮想モデル  $M_A$  として表示される。これを遠隔の  $P_B$  地点に伝えるために、モデル  $M_A$  は世界座標系  $W_A$  から仮想シール（実物体）A を基準とした座標系  $V_A$  に変換される。これに対して変換  $X_A$  の逆変換  $X_A^{-1}$  を行うことで、モデル  $M_A$  はいったん共有座標系  $V_S$  に戻される。この状態で  $P_B$  地点に送信された後、今度は変換  $X_B$  を行うことで、モデル  $M_A$  が仮想シール（実物体）B に基づく座標に変換される。そして、これが座標系  $V_B$  から世界座標系  $W_B$  に変換されることで、 $W_B$  に基づく共有仮想モデル  $M'_A$  として  $P_B$  地点に表示される。この処理を  $P_B$  地点における実物体 B への作業情報に関しても同様に行うことで、それぞれの間における作業情報の共有を実現している。

このように、作業情報を共有するために行う変換処理は、

- 世界座標系とローカル仮想シール座標系間の変換処理
- 共有仮想シール座標系とローカル仮想シール座標系間の変換処理

の 2 種類に分けられる。

前者の変換処理は、坂内らのシステムにおける世界座標系と物体座標系間の変換処理を利用しており、坂内らによる物体座標系が本手法におけるローカル仮想シール座標系に相当する。

後者の変換処理に関して、共有仮想シール座標系からローカル仮想シール座標系への変換を順方向とすると、順方向の変換処理は仮想シールを実物体に合わせて柔軟に貼り付けるときに行う処理に相当する。次節でこの仮想シールの貼り付け方法について説明する。

### 3.5 物体共有仮想シールの貼り付け方法

仮想シールを実物体に合わせて柔軟に貼り付ける方法として、以下の 2 種類の手法が存在する。

- 1 枚の仮想シールを実物体に合わせて変形させる方法
- 1 枚の仮想シールを実物体の形状に合わせて変形

させることで、遠隔の実物体の間で 1 つの面のみに基づいて作業情報を対応付ける。この方法は、実物体における特定の 1 面を用いて作業が行われる場合に用いることができる。

- 複数の仮想シールを実物体に合わせて貼り合わせる方法

複数の仮想シールを、実物体を構成する各面に合うように貼り合わせることで、遠隔の実物体の間で複数の面に基づいて作業情報を対応付ける。この方法は、実物体を構成する面のうちの 2 面以上を用いた作業が行われる場合に用いることができる。

上記の 2 種類の方法を用いて仮想シールを実物体に合わせて貼り付けることで、共有仮想モデルも実物体のシンタクスに合わせて表示される。

このように、「シール」という概念を用いることにより、作業情報（共有仮想モデル）を個々のローカルの実物体の表面に基づいて違和感なく「貼り付ける」ことができ、かつそれを共有する仕組みを構築することで実物体間のシンタクスの違いを吸収したコラボレーションが実現される。これが本提案の最も重要な特徴である。

次節で、このような機能を有する仮想シールに対するユーザインタフェースについて説明する。

### 3.6 仮想シールに対するユーザインタフェース

ユーザによる仮想シールの貼り付け操作は、それぞれの実空間に表示された初期状態の仮想シール（共有仮想シール座標系）を、各ユーザが自分の持つ実物体の表面形状に合わせて貼り付ける（ローカル仮想シール座標系）という処理になる。

いったん、実物体への貼り付け操作が終わると、ユーザ間での仮想シールを介したコラボレーションが可能になるが、その最中であっても自由に実物体から仮想シールを剥がして他の実物体への貼り付けが可能である。この機能により、たとえば複数の種類の実物体が用意されているとき、ユーザはその場に応じて最適な実物体を選んで利用することができる。

## 4. MR Shared Surface の実装

本章では提案を実現するためのプロトタイプシステム MR Shared Surface の実装について説明する。

本研究は、複数のユーザによる遠隔コラボレーションを対象としているが、人数が 2 人よりも多い（2 地点間以上の）場合はこれを拡張したものと見なせるので、ここでは実装例として、ユーザが 2 人（2 地点間）の場合を対象としてシステムの構築を行った。

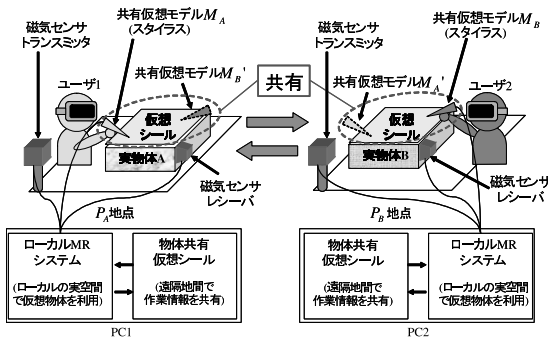


図2 MR Shared Surface のシステム概略図  
Fig.2 MR Shared Surface.

また、本システムが有する仮想シールの機能は 3.3 節の (1) と (2) の 2 つとなっている (ユーザ自身が仮想シールを貼り付けられる/剥がせる機能は含まれない)。これは、本研究で重視しているのは仮想シールの利用によりシタックスの異なる実物体の共有を実現することであり、この機能が最低限備わっているものをプロトタイプとしたためである。

#### 4.1 MR Shared Surface のシステム概要

図 2 に MR Shared Surface の概略図を示す。

MR Shared Surface はローカルの MR 空間における一般的な作業環境を構築するために主にデバイスの制御を行う「ローカル MR システム」と、シタックスの異なる実物体間での作業情報の共有を実現する「物体共有仮想シール」の 2 つのオペレーションからなる。本システムの利用の流れとしては、ユーザが仮想シールを貼り付ける代わりに、あらかじめ 2 つの実物体の表面形状データを計測し、互いに関連付けられた 2 枚の仮想シールに対して各データに基づいた変形・変換処理を行ったうえで、それぞれをセンシングされた実物体の表面に重畳させる前処理 (この手続きを、仮想シールを貼り付けと呼ぶ) を行っておく。各ユーザは図 2 のように前処理で貼り付けられた仮想シールによって実現された実物体の共有環境でコラボレーションを行う形になる。

以下で、これら MR システムおよび仮想シールの実装に関して詳しく説明する。

#### 4.2 ローカル MR システムの実装

ローカルの MR 空間における作業環境を実現した MR システムを構築する手段として、CANON 社が開発した MR Platform を用いた<sup>10)</sup>。本実装では MR-Platform を利用することで、MR 空間を表示するデバイスとしてビデオシースルー HMD を、現実空間と仮想空間の位置合わせを実現する手段として磁気センサおよびマーカによるハイブリッド手法を、実物体の

位置姿勢をセンシングするデバイスとして磁気センサのレーザを、そして仮想物体を操作するためのデバイスとして磁気センサのレーザが搭載されたスタイラスを用いた。

#### 4.3 物体共有仮想シールの実装

本実装では、実物体の表面に取り付けられた磁気センサのレーザの位置姿勢をリアルタイム検出し、その部分に仮想シールを重畳させることで、実物体の表面に合わせた仮想シールの貼り付け処理を行っている。

仮想シールの表示に関しては、実物体やユーザの体が極力 CG によって隠れないように、線で表現された輪郭のみを実物体上に重畳させた。

以下で仮想シールの実装に関する詳細を説明する。

##### 4.3.1 共有仮想モデルの表示方法

3.2 節で述べたように、本実装においてユーザが実物体へ行う作業は、実物体が物理的に変化しないようなポインティング作業や実物体の表面情報のみを変化させるペインティング作業に限定しており、スタイラスを用いることでそれを実現する。

実物体と同様にユーザが持つスタイラスの位置姿勢を検出し、そこに仮想ポイントを重畳させることで、これをユーザによる作業情報を表す共有仮想モデルとして利用する。

このとき、一方のユーザの持つスタイラスから仮想シールに垂線を下ろし、この長さを  $L$ 、垂線と仮想シールの面の交わる点を  $X$  (これをモデル対応点  $X$  と定義する) とする。そして、他方のユーザにおける仮想シール上で、点  $X$  に相当する点をモデル対応点  $X'$  としたとき、点  $X'$  を基準としてその面の法線方向に長さ  $L$  の直線を伸ばした位置に仮想ポイントが表示される。この処理がユーザ間で双方向に行われることにより、面の法線方向において双方ともに同じ高さに位置するという関係を保って両者の作業情報が共有される。この処理は、ある瞬間の実物体を基準としたユーザ操作の位置は作業情報を表す大きな要素であるため、可能な限りその情報を崩さずに伝えることがセマンティックスの共有につながるという考えに基づいている。

##### 4.3.2 共有仮想モデルの同期管理

一方のユーザにより実物体へのインタラクションが行われた場合、ユーザの持つ実物体とその作業情報を表す共有仮想モデルの相対位置姿勢は変化するため、もう一方のユーザの持つ実物体と共有仮想モデルの相対位置姿勢も更新する必要がある。

ここでも、坂内らによる共有仮想物体の同期管理と同様に、共有仮想モデルの管理テーブルを生成し、遠



隔地間の共有仮想モデルの状態の同期をとる手法を用いた。

#### 4.3.3 矩形を基準とした平面上での変形処理

次に、本実装で行ったローカル仮想シール座標系と共有仮想シール座標系間の変換処理を具体的に説明する。

3.5 節における 1 枚の仮想シールの変形処理として最も基本的なものは、2 次元平面上での伸縮変形処理である。このとき、3.1 節で述べたように、有用性が得られるシンタックスの異なる実物体の組合せとしては、規模が異なる関係にあるものが考えられるが、一部の楽器などにおいては、完全に相似ではなく特定の方向の比率が異なるものもいくつか存在する。本実装ではこれらに対応付けるために仮想シールを変形する規則として、矩形が任意の凸四辺形に変形される 2 次元射影変換を利用した。2 次元射影変換は次式で表される。

$$\lambda \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$\left( \begin{array}{l} h_0 \sim h_7, \text{ および } \lambda \text{ は, 変形} \\ \text{前後における 4 頂点の座標の} \\ \text{代入により求まる係数} \end{array} \right)$

本実装におけるこの 2 次元射影変換を利用した変形処理では、共有仮想シール座標系上に矩形を定義し、その 4 頂点を変形の初期制御点とする。この制御点を、計測された実物体の平面領域を囲むあるいはそれに等しい四辺形をなすように配置し、変換を行うことで、矩形（共有仮想シール座標系）から実物体にあわせた四辺形（ローカル仮想シール座標系）への変形を行う。この処理を同じ共有仮想シール座標系を基にして各実物体に行うことで、異なる凸四辺形内部のローカル仮想シール領域間の対応付けが可能となる。

本実装では、2 次元射影変換を利用したアプリケーションとして、図 3 に示すような遠隔木琴共有システムを構築した。このシステムでは、木琴に磁気センサー、パチにスタイラスを取り付けて位置姿勢をセンシングすることで、木琴上に仮想シールを、パチに共有仮想モデルを重畳する。このとき 2 次元射影変換により鍵盤の長さの比が異なる木琴間で仮想シールを対応付けることで、ユーザ間で共有仮想モデルによるパチの動きを共有し、加えて音声を伝えあうことで総合的に演奏情報の共有を実現している。これによって、かたちの違う木琴を共有している環境で、遠隔合

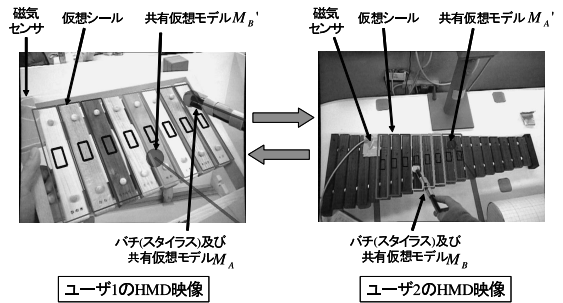


図 3 遠隔木琴共有システム

Fig. 3 MR Shared Xylophone.

奏・学習を視野に入れたコラボレーションを行うことができる。

#### 4.3.4 平面を基準とした可展面への変形処理

仮想シールの平面上での変形の次に考えられるのが、平面から曲面への変形処理である。

本実装で変形に利用する曲面は、面を伸ばしたり縮めたりすることなしに平面に展開可能な「可展面」と呼ばれる面のみを対象とした。

可展面は、円柱の側面にあたる柱面、円錐の側面にあたる錘面、そして、円柱に巻き付けられた糸を解くときに糸が掃過する曲面を表す接線曲面の 3 種類のみが存在する。ここで、柱面・錘面は一般的な曲面として実世界でも数多く存在するが、接線曲面は一般的にはあまり用いられず、造船などの設計において副次的に設計結果として発生するような特殊な曲面であるので、本実装で利用する曲面は柱面・錘面の 2 種類に限定する。

仮想シールが平面であるときを共有仮想シール座標系とし、それをローカル仮想シール座標系であるこれら 2 種類の曲面に変形する処理を以下で説明する。

4.3.1 項で述べたように、共有仮想モデルは仮想シールの面上のモデル対応点からのばした面の法線線上において同じ高さを保ったまま変換が行われる。

この処理は、平面から柱面・錘面のどちらの曲面に変形する場合も共通である。したがって、処理が異なるのは仮想シールの変形の際のモデル対応点の座標の変換処理であるので、以下では平面から柱面、そして平面から錘面への変形処理の順に、別々にモデル対応点の座標の変換処理についての説明を行う。

まず最初に、平面から柱面への変形処理におけるモデル対応点の座標の変換処理を説明する。

図 4 に示すような、平面の仮想シール上のモデル対応点 X から柱面の仮想シール上のモデル対応点 X' への変換を行う。説明を分かりやすくするため、底面の半円の半径が R の半円柱の側面になるように平面



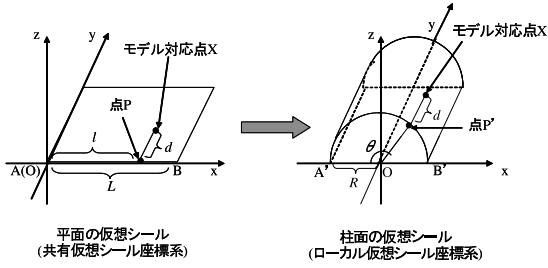


図 4 平面から柱面への変形処理

Fig. 4 Transformation from flat to cylinder.

を対応付けたものを柱面として用いる。平面はこの柱面を展開した長方形の面となる。ここで、平面側の線分 AB の長さを  $L$  とするとき、これは柱面側では弧  $A'B'$  で表される。さらに、平面側における点 X から  $x$  軸に下ろした垂線と  $x$  軸の交点を点 P とし、柱面側でそれに対応する点を点  $P'$  とすると、平面側の線分 AP および線分 XP は、柱面側の弧  $A'P'$  および線分  $X'P'$  に相当し、長さはそれぞれ  $d, l$  で共通である。また、平面側の線分 AB の長さを  $L$ 、弧  $A'P'$  の中心角を  $\theta$  とすると、 $\theta$  は

$$\theta = \pi \times \frac{l}{L}$$

で表すことができる。このとき、平面側において点 A (原点 O) を  $x$  軸と平行に  $l$  だけ移動した点が点 P、点 P を  $y$  軸と平行に  $d$  だけ移動した点が点 X である。点 X は平面の仮想シール上の任意の点を表すので、変数  $d$  と  $l$  を用いて表されることになる。

また、柱面側において点  $X'$  は、点  $A' (-R, 0, 0)$  を  $y$  軸中心に  $\theta$  回転させ (このときの点が点  $P'$ )、この点  $P'$  を  $y$  軸に平行に  $d$  だけ移動するという変換によってここで求めることができる。このときの変換は、平面側の変数 ( $d$  と  $l$ ) および定数 ( $L \cdot R \cdot \pi$ ) のみを用いて表されるため、点  $X'$  は点 X を表すパラメータにより表現された、つまり点 X から点  $X'$  への変換が実現されたことになる。

次に、平面から錐面への変形処理におけるモデル対応点の座標の変換処理を説明する。

図 4 と同様、図 5 においてもモデル対応点 X から点  $X'$  への変換を行うものとし、説明を分かりやすくするため、底面の半円の半径が  $R$  の半円錐の側面になるように平面を対応付けたものを錐面として用いる。平面はこの錐面を展開した扇方の面となる。ここで、平面における線分 CA の長さを  $L$  とするとき、これは錐面側では線分  $CA$  で表される。さらに、平面側における直線 CX と弧 AB の交点を点 P とし、錐面側でそれに対応する点を  $P'$  とすると、平面側の線分 CX

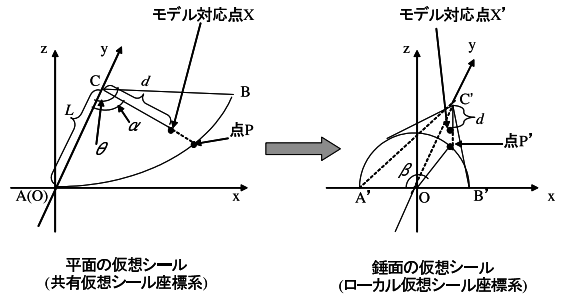


図 5 平面から錐面への変形処理

Fig. 5 Transformation from flat to cone.

は、錐面側の線分  $C'X'$  に相当し、長さはそれぞれ  $d$  である。このとき、平面における弧 AB の中心角を  $\theta$ 、弧 AP の中心角を  $\alpha$  とし、錐面における弧  $A'P'$  の中心角を  $\beta$  とすると、 $\theta$  は

$$\theta = \pi \times \frac{R}{L}$$

と表されるので、 $\beta$  は

$$\beta = \left( \alpha \times \frac{\pi}{\theta} = \right) \alpha \times \frac{L}{R}$$

と表すことができる。このとき、平面側において点 A (原点) を点 C 中心に  $\alpha$  だけ回転させた点が点 P、点 P を線分 CP に平行に点 C との距離が  $d$  になるまで移動させた点が点 X である。点 X は平面の仮想シール上の任意の点を表すので、変数  $d, \alpha$  を用いて表されることになる。

また、錐面側において点  $X'$  は、点  $A (-R, 0, 0)$  を  $y$  軸中心に  $\beta$  回転させ (このときの点が点  $P'$ )、この点  $P'$  を線分  $C'P'$  に平行に点  $C'$  との距離が  $d$  になるまで移動させるという変換によって求めることができる。このときの変換は、平面側の変数 ( $d \cdot \alpha$ ) および定数 ( $L \cdot R \cdot \pi$ ) のみを用いて表されるため、点  $X'$  は点 X を表すパラメータを用いて表現された、つまり点 X から点  $X'$  への変換が実現されたことになる。

#### 4.3.5 展開図を基準とした複数の仮想シールの貼り合わせ処理

複数の仮想シールを組み合わせて、実物体形状に合うように貼り合わせるという処理を行うことで、実物体の間で複数の面に基づいて作業情報を共有することが可能になる。

本実装では、4.3.4 項で述べたように、仮想シールの初期状態を表す共有仮想シール座標系は、平面の仮想シールを基準とした座標系である。このとき、立体を展開した展開図はすべての面が同一の平面に存在するという特徴から、複数の仮想シールを貼り合わせる場合の共有仮想シール座標系として、立体の展開図を用

いた。展開図を介した立体間の対応付けにより、その全体または一部の面に同じ構成の展開図を有する実物体の間での作業情報の共有が可能になった。また単純に、設計図のように一部に展開図を含む 2D のものと立体 (3D の実物体) の間の対応付けも可能となった。

ただし、この場合の立体は平面と可展面 (柱面・錐面) からのみで構成されるものに限られる。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験目的

提案概念である、遠隔に存在するシンタクスの違う実物体の間で物体共有仮想シールを用いて作業のセマンティクスが共有できるか確認することを目的に実験を行った。

このとき、本実装では平面が共有仮想シール座標系として用いられており、またこれまで例示した電子機器や描画用の媒体、ボードゲーム、設計図・マニュアル、楽器の一部 (鍵盤楽器や打楽器) などに見られるように、日常生活においても実物体に含まれる平面の部分とインタラクションを行う作業が一般的かつ基本的であるので、本実験では少なくとももう一方のユーザは平面の仮想シールを利用する場合について、提案概念の検証を行った。

さらに本実験では、ユーザが実物体に行う作業として、最も基本的であるポインティング作業を用いた。

### 5.2 実験内容

本実験では、遠隔の 2 地点にいるユーザのうち 1 人が、実験を実行する実験者、もう 1 人が実験を受ける被験者という構成で実験タスクを行った。このとき遠隔地間で実物体に貼り付けて利用する仮想シールの基本形は、1 辺が 6 cm の正方形のマス目によってメッシュ状に全体が区切られており、それぞれのマス目には、0 から順に数字が割り振られている (ただし、マス目の大きさに関して、変形処理を行った後の仮想シールではこれと異なる)。

以下に、実験タスクの流れを説明する。

一方の地点では実験者がこの仮想シールの貼られた実物体に対して、図 6 に示す 3 種類の異なる動作を用いて仮想シール上の異なるマス目の場所を連続でポインティングしていく。この 3 種類のポインティング動作の特徴は以下のとおりである。

- 「a」のポインティング動作  
仮想シールの面上の空中でポインタを山なりに動かしながらポインティングする動作
- 「b」のポインティング動作  
仮想シールの面に対してポインタを垂直下向きに

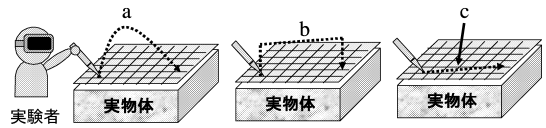


図 6 3 種類のポインティング動作  
Fig. 6 The type of painting motion.

傾けたまま直角に動かしながらポインティングする動作

- 「c」のポインティング動作

仮想シールの面上に沿ってポインタを動かしながらポインティングする動作

これらのポインティング動作は、仮想シールの面に対する鉛直方向成分の動きのみが異なるため、仮想シールの真上からポインタの動きを観察しても違いを把握することはできなくなっている。これは、一般的なプロジェクタなどで投影された 2D のポインタ表示では表現できない、MR の技術を用いた本システムの特徴である 3D のインタラクションが認識されるかを純粋に評価するためである。

このとき実験者は、ポインティングの動作・場所の結果に偏りが生じないようなポインティングの組合せをあらかじめ作成しておき、実験を行う際はそれに従ってポインティングを行う。この組合せの情報は被験者には知らされない。

もう一方の地点にいる被験者は、所有する実物体に貼られた仮想シール上に表示される実験者によるポインティングの様子を確認しながら、ポインティング動作の種類とポインティングされたマス目の場所に書かれた数字をそのつど回答する。

さらに、実験者と被験者の環境を入れ替えてこれと同じタスクを行った。これは、遠隔の 2 地点間で作業のセマンティクスの共有が行われているかを確認するためには、双方向で作業情報が伝わっているかを確認する必要があるためである。

本実験では、仮想シールの中で 4.3 節で説明したような変換を行う仮想シールの組合せを対象として、実験タスクを行った。表 2 が実験タスクで用いた仮想シールの組合せである。なお、本実験における展開図と立体の組合せに関しては、立体が平面と曲面の両方を持つように、表 2 のような四角柱の柱の角の部分に置き換えて丸みを持たせた立体を用いた。

上述のように、双方向の作業情報の伝達確認のため、1 つの組合せに対して、実験者と被験者の環境を入れ替えることで情報伝達の方向を変えて 2 回タスクを行っている (ただし、合同な仮想シールの組合せに関

表 2 実験における仮想シールの組合せ

Table 2 The combination of virtual sheets.









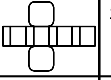

| 変換の種類      | 仮想シールの関係      | 仮想シールの組合せ  |  |
|------------|---------------|--|--|
|            |               | 実験者  | 被験者  |
| 変換なし       | 合同な関係         | 正方形     | 正方形     |
| 平面上の変形     | 相似の関係         | 正方形(小)  | 正方形(大)  |
|            |               | 正方形(大) (図略)  | 正方形(小) (図略)  |
|            | 一般的な2D射影変換の関係 | 長方形     | 台形      |
|            |               | 台形 (図略)  | 長方形 (図略)   |
| 平面から曲面への変形 | 平面と柱面の関係      | 平面      | 柱面      |
|            |               | 柱面 (図略)  | 平面 (図略)  |
| 異なる貼り合せ方   | 展開図と立体の関係     | 展開図     | 立体      |
|            |               | 立体 (図略)  | 展開図 (図略)   |

表 3 実験における被験者の母集団

Table 3 The population.

| 種別 | 学生            |
|----|---------------|
| 人数 | 15名(男14名,女1名) |
| 年齢 | 21-25歳        |

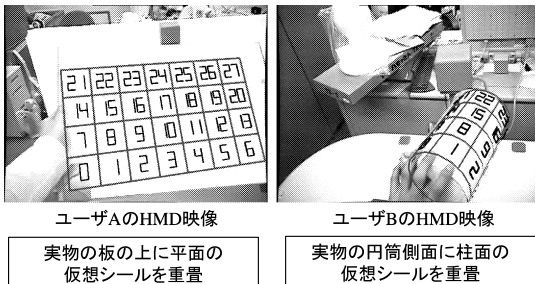


図 7 評価用アプリケーションを利用する様子

Fig. 7 The scene of using evaluation system.

しては両者の環境が等しいため1方向のみである)。このとき、1回のタスクに関して実験者は5回のポインティングを1セットとしてこれを2セット(合計10回のポインティング)試行した。

本実験では、被験者の回答をすべて記録し、それを実験者が実際に行った正解のポインティング動作・場所と比較することで、すべてのタスクの試行に関して正解率を求め、これを実験結果とした。

なお、実験における被験者の母集団は表3のようになる。

また図7は、評価用に構築した評価用アプリケーションをユーザが利用している様子を表している。これは、平面と柱面の仮想シールの組合せの例であり、一方のユーザA側では、実物の板の上に平面の仮想シールが重畳されており、もう一方のユーザB側では実物の円筒側面上に柱面の仮想シールが重畳されて

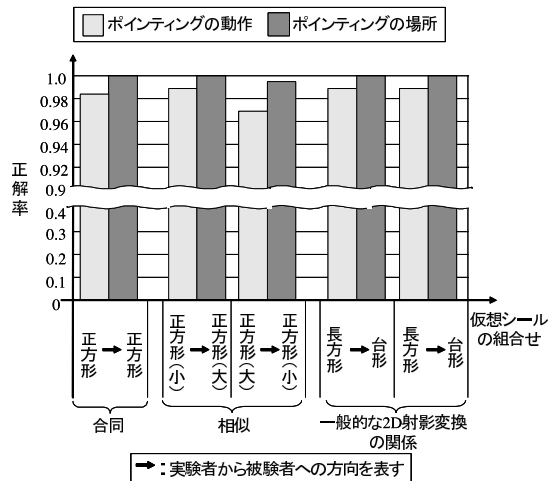


図 8 実験結果 1: 平面の仮想シールの組合せにおける正解率

Fig. 8 Result 1.

いる。仮想シールは、上記で説明したように正方形のマス目に区切られており、その中に数字が表示されている。その他の仮想シールの組合せにおいても本アプリケーションにより、同様の表示を行っている。

### 5.3 実験結果と考察

図8は、平面の仮想シールの組合せに関する被験者の正解率の結果(実験結果1)を示している。

図8が示すように、相似の関係における正方形(大)から正方形(小)の方向の場合を除いて、ポインティング動作・場所のどちらにおいても正解率が98%以上という非常に高い値となった。特にポインティングの場所の正解率は100%であった。このときのポインティング動作における2%の間違いの要因としては、被験者は仮想シールが貼り付けられた実物体(実物の板)を自由に移動・回転させることで、本来ならば自由な視点でポインティングの様子を確認できるが、実物の板の真上から観察してしまったために、5.2節で述べたポインティング動作の性質から、その種類を判別できなかったことが考えられる。

相似の関係における正方形(大)から正方形(小)の方向の結果に関しては、図8の全組合せの中で唯一場所に誤りが生じたが、すべて隣りのマス目を指してしまう誤りであったことが判明している。これは、正方形(小)のマス目が他の図形よりも小さい(基本形の1/4)にもかかわらず、表示するポインタの大きさは変わらないことや、使用したHMDの解像度が十分ではなかった(640×480)ことが原因であったと考えられる。さらに、ポインティング動作の正解率が他よりも低かった原因としては、面に平行な方向の動作の規模が小さく表現されるが、垂直な方向はそのまま

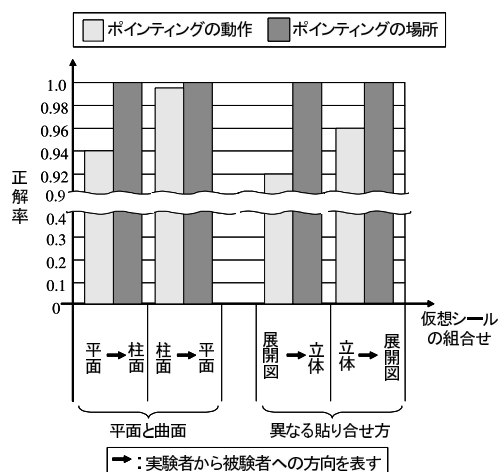


図 9 実験結果 2:平面とそれ以外の仮想シールの組合せにおける正解率

Fig. 9 Result 2.

あるために動きのバランスが不自然になったことが考えられる。これより、明らかに実物体の間でスケールが異なる場合、より精度良くセマンティクスを共有するためには、表面積などの特徴量に基づいてスケールの違いの度合いを導出し、それに応じて共有仮想モデルの表示の大きさや高さを変更する必要がある。

いずれにしても、すべての正解率が 96% を超えており、記録としてはどのパターンも、被験者 15 人に対して実験者がそれぞれタスク中に 10 回ポインティングした (5.2 節参照) 中で間違い回数が 6 回未満であった、つまり実際に 150 回のポインティングのうち間違いが 6 回未満であったことを意味する。したがって、この程度の誤りであれば、極端にインタラクションの正確さを要求されるタスクを除いて、作業情報が十分に伝わったと見なすことができる。

このことから、平面上での変形処理を行った仮想シールの組合せに関しては、インタラクションの整合がとれているということが出来る。

次に、図 9 は、平面とそれ以外の間で変換処理を行ったときの仮想シールの組合せに関する被験者の正解率の結果 (実験結果 2) を示している。

図 9 が示すように、ポインティングの場所に関する結果はすべて正解率が 100% になった。これらにおいては、先ほどの相似の関係における正方形 (大) から正方形 (小) の方向のポインティング認識の場合のように、インタラクションの規模や仮想シールのマス目が小さく表現されていない。したがって、適当なサイズの仮想シールを利用している限り、ポインティングの場所の認識を誤ることはないことが分かる。

また、平面から柱面および展開図から立体の方向のポインティング動作の認識の正解率が、他に比べ低くなっていることが分かる。この 2 つの共通点は、実験者のポインティング環境が平面であるのに対して、被験者は 3D でポインティングを認識する環境であるということである。これは、実験者は 2D の平面との位置関係はそのまま容易にインタラクションを行えるが、被験者はそれを把握するために、3D の実物体を様々な方向に回転させて観察する必要があることを意味する。被験者は、実物体を回転させるという負荷がある分、実験者のポインティングを完全に把握できない場面もあり、それが正解率の低下の要因になったと考えられる。

さらに、展開図と立体の組合せにおける双方向のポインティング動作の認識の正解率が低くなっていることが分かる。この組合せにおいては、複数の仮想シールの集合が実物体に貼り付けられており、ユーザによる作業情報は、1 つ 1 つの仮想シールに基づいて表示されるため、隣接する仮想シールの面の角度の間に大きな差がある場合には、その間で作業情報の表示が大きく変化する。この要因により、実験者が行ったポインティングの動きが、被験者に正しく認識されなかった可能性がある。また、展開図から立体の方向のポインティング認識の結果が 0.92 と最も低い値をとっているのは、この要因に加えて上記の実物体を回転させるという負荷が合わさったためであると考えられる。

しかしながら、すべての正解率が 92% を超えており、どのパターンも実際に 150 回のポインティングのうち間違い回数が 12 回未満であるので、実験結果 1 と同様に極端にインタラクションの正確さを要求されるタスクを除いて、インタラクション情報が十分に伝わったということが出来る。

以上、実験結果 1・2 を総合すると、少なくとも一方のユーザが平面の仮想シールを用いて遠隔コラボレーションを行うとき、その間でのポインティングによる作業情報を、十分に整合がとられた状態で共有可能であるということが出来る。特にポインティングされた場所の情報は確実に共有できることが証明された。

これにより、ポインティングによる電子機器の操作の指導を遠隔の間で行う (作業者が実物を所有し、指導者はマニュアルや実物のミニチュアを所有) 作業などで有効性が生じると考えられる。

## 6. まとめと今後の展望

本稿では、「シール」の性質に着目し、それを MR の技術と組み合わせて応用したアプローチとして、「MR

空間における仮想シールを介したシンタックスの異なる実物体間での作業情報の遠隔共有手法」を提案した。

ここでは、遠隔ユーザ間で互いに実物体に貼り付けることで実物体への作業情報を共有できる物体共有仮想シールを定義した。この仮想シールを実物体の表面に合わせて貼り付けることで、実物体の間のシンタックスの差異を吸収して、作業のセマンティックスを共有できる。ユーザは、互いに実物体を共有するような環境下で、相手のインタラクションを直感的にウェアしながらコラボレーションを行うことができる。

この提案概念を実現するためのプロトタイプシステム (MR Shared Surface) を実装し、少なくとも一方が平面である実物体の組合せの間でポインティング作業を行うという条件下で、提案概念の機能が実現されるかを検証した。その結果、実験で利用したシンタックスの異なる実物体のすべての組合せの間において、ユーザ間で作業情報を認識する際に極端に作業の正確さを要求されるタスクを除いて、実物体とのインタラクションが十分に整合のとれた状態で共有できたことが確認された。

今後は、ポインティング以外にも実物体への操作は様々に考えられるので、それらを共有可能なシステムを目指す必要がある。さらに、ユーザ間で用いる実物体に関しても、様々なバリエーションが考えられる。たとえば今回曲面への変形として利用した可展面である柱面・推面の集合で様々な複雑な形状を近似するという研究が行われている<sup>11)~13)</sup>。したがって、複数の仮想シールを用いて、複雑な形状を持つ立体とその展開図を対応付けるといった応用も考えられる。さらに、より多様でより構造の異なる組合せにも対応できるシステム作りを目指す予定である。また、仮想シールの貼り付け処理に関しても、本実装では、実物体の計測データを基にシステム内で貼り付け処理を行ったが、3.3節の仮想シールの機能(3)を実装することで、ユーザが動的に仮想シールを変形させて容易に実物体に貼り付けられるような仕組みを作り、ユーザインタフェースの観点からも、より「シール」らしさを表現する試みを行う予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Watabe, K., Sakata, S., Maeno, K., Fukuoka, H. and Ohmori, T.: Distributed Multiparty Desktop Conferencing System: MERMAID, *Proc. CSCW '90*, pp.27-38 (1990).
- 2) Emmanuel, F. and Marten, S.: DIVE: A scalable network architecture for distributed virtual environments, *Distributed Systems Engineer-*

*ing Journal* (special issue on Distributed Virtual Environments), Vol.5, No.3, pp.91-100 (1998).

- 3) Fukui, K., Miyata, A. and Okada, K.: Implementation of Avatar Mediated Communication Environment with Thinking Awareness, *Joint 2nd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 5th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2004)* THE-7, pp.116-120 (2004).
- 4) 坂内祐一, 玉木秀和, 宮狭和夫, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一: タンジブルレプリカを用いた MR 空間での遠隔コラボレーション, *インタラクション 2006*, pp.140-133 (2006).
- 5) Ishii, H.: Tangible Bits: User Interface Design towards Seamless Integration of Digital and Physical Worlds (in Japanese), *IPSJ Magazine*, Vol.43, No.3, pp.222-229 (2002).
- 6) Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication, *Proc. CSCW'98*, pp.169-178, ACM Press (1998).
- 7) 上杉 繁, 三輪敬之: 身体の映像表現と実体ツールとのインタラクションによる共存的存在のコミュニケーションシステム, *ヒューマンインタフェース学会誌・論文誌*, Vol.6, No.3, pp.295-305 (2004).
- 8) 磯 和之, 八木貴史, 小林 稔, 岩城 敏, 石橋 聡: 生活融合通信: 空間情報整合化機能 "ComAdapter", *日本 VR 学会論文誌*, Vol.9, No.2, pp.169-178 (2004).
- 9) Sekiguchi, D., Inami, M., Kawakami, N. and Tachi, S.: The design of internet-based RobotPHONE, *Proc. ICAT'04*, pp.223-228 (2004).
- 10) Uchiyama, S., Takemoto, K., Satoh, K., Yamamoto, H. and Tamura, H.: MR Platform: A basic body on which mixed reality applications are built, *Proc. IEEE and ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002)*, pp.246-253 (2002).
- 11) Elber, G.: Model Fabrication using Surface Layout Projection, *CAD*, Vol.27, No.4, pp.283-291 (1995).
- 12) Pottmann, H. and Farin, G.: Developable rational Bezier and B-spline surfaces, *CAGD*, Vol.12, No.5, pp.513-531 (1995).
- 13) Hoschek, J.: Approximation of surfaces of revolution by developable surfaces, *CAD*, Vol.30, No.10, pp.757-763 (1998).

(平成 18 年 5 月 29 日受付)

(平成 18 年 11 月 2 日採録)



宮狭 和夫 (正会員)

2004 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2006 年同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻修士課程修了。2006 年キャノン (株) 入社。画像処理の研究に従事。



坂内 祐一 (正会員)

1978 年早稲田大学理工学部卒業。1980 年同大学院修士課程修了。1988 年ミシガン州立大学コンピュータサイエンス学科修士課程修了。1980 年キャノン (株) 入社。画像処理、ヒューマンインタフェース、グループウェア、複合現実感等の研究開発に従事して現在に至る。当学会 GN 研究会幹事、論文誌編集委員等を歴任。日本 VR 学会会員。



鈴木 雄士 (正会員)

2005 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻修士課程に在学中。複合現実感の研究に従事。



玉木 秀和 (正会員)

2006 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻修士課程に在学中。複合現実感の研究に従事。



重野 寛 (正会員)

1990 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1998 年同大学理工学部情報工学科助手 (有期)。現在、同大学理工学部情報工学科助教授。工学博士。計算機ネットワーク・プロトコル、モバイル・コンピューティング、マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



岡田 謙一 (正会員)

慶應義塾大学理工学部情報工学科教授、工学博士。専門は、CSCW、グループウェア、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション。現在、情報処理学会 MBL 研究会運営委員、BCC 研究グループ幹事、日本 VR 学会 CS 研究会副委員長。情報処理学会論文賞 (1996 年, 2001 年)、情報処理学会 40 周年記念論文賞、日本 VR 学会サイバースペース研究賞、IEEE SAINT'04 最優秀論文賞を受賞。情報処理学会フェロー、IEEE、ACM、電子情報通信学会、人工知能学会各会員。