

## 対話型 3次元仮想陶芸作業環境の設計と実現

### The Design and Implementation of an Interactive 3D Virtual Ceramic Work Environment

凍田 和美      西野 浩明<sup>1</sup>      宇津宮 孝一<sup>1</sup>  
Kazuyoshi KORIDA      Hiroaki NISHINO      Kouichi UTSUMIYA

#### 概 要

我々は、ワードプロセッサを使って文書（1次元の文字列）を作成するような感覚で、また、ペイントソフトを使ってコンピュータディスプレイ上に（2次元の）絵を描くような感覚で、3次元仮想環境の中で仮想物体を対話的に創作する仮想陶芸作業環境の構築を試みている。この3次元インタフェースは、利用者がつけた両手電子グローブで、液晶シャッタ眼鏡を介して観察される立体映像を直接操作しながら造形し、目的とする仮想物体を対話的に創作していくものである。

本稿では、我々が考案した従来とはことなるアプローチによる両手による対話型3次元インタフェース機能を紹介するとともに、仮想物制作の題材として陶芸を取り上げ、実際の陶芸制作空間に近い、利便性の高い効果的な仮想陶芸環境の実現について述べる。

キーワード：陶芸、電子グローブ、立体視、仮想環境、ジェスチャ

#### はじめに

仮想環境を構築するための新しいヒューマンインタフェースとして、人の動作を手軽に入力するための画像処理技術を用いた非接触型手法に基づく研究が進展している。人が日常生活の中で行っているように、両手を使って仮想環境に働きかけができることが理想的である。しかしながら、簡単な指示や2次元的な形状表現はできても、接触型装置をまったく使用せずに、動きを伴う操作や3次元物体の造形を行うことは、現時点では困難である。

そこで我々は、将来の究極的なヒューマンインタフェースを念頭におきながら、仮想環境に働きかけるよりよい3次元インタフェースの構築を目標として、現在、仮想陶芸作業環境の構築を試みている。これは、両手電子グローブ<sup>[1]</sup>と立体視に基づく。両手電子グローブによる、ジェスチャ表現、位置・大きさの表現、移動・回転・変形などの空間的操作により、3次元空間内で立体視を使いながら立体的な仮想物体を創作する作業を支援するものである。機器を装着するものの、実際の手で、“視覚的な触覚フィードバック”を受けながら、仮想物体を作成できる。そのため、実際の陶芸における造形過程の手の動作を模擬することにより、繁雑で、

<sup>1</sup>大分大学工学部 知能情報システム工学科

Dep.of Computer Science and Intelligent Systems, Faculty of Technology, Oita University

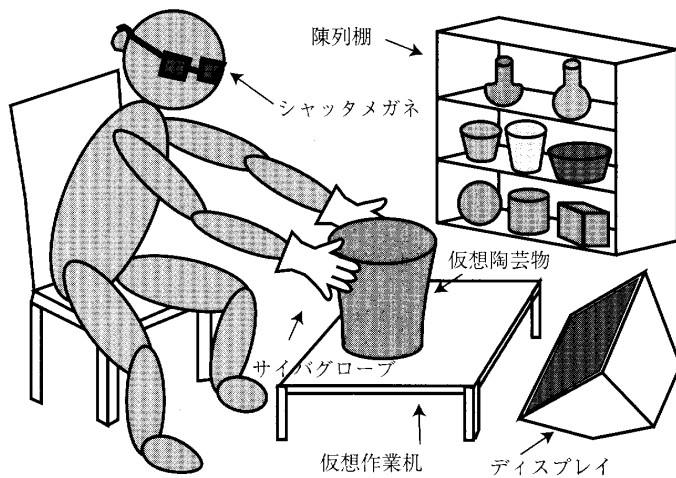


図1 仮想陶芸システム概念

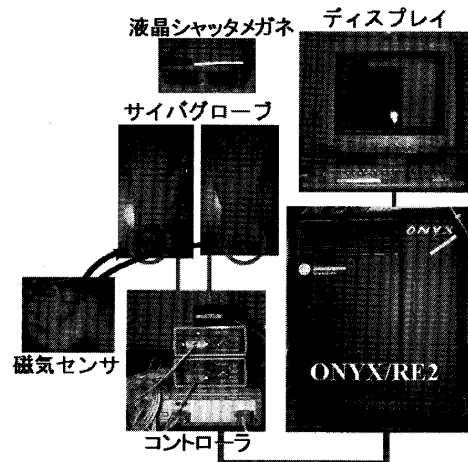


図2 仮想現実感実現計算機環境

多くの時間と労力を必要とする陶芸作品のすばやいプロットタイピングが行える。

## 仮想陶芸システムの設計概念と概要

### (1) 基本設計概念

仮想物制作の目的には、完成した作品使用とその作成過程の2つが考えられる。陶芸の世界も、作品の使用（用途や鑑賞）と陶芸作業の2つがある。陶芸作業には、デザイン、土練り、造形、絵付け、焼成りなど、種々の工程がある。本稿では、両手を使った典型的創作作業である造形過程に焦点をあて、造形作業をサポートする作業空間と必要なインタフェース機能を対象とする。

マウスやキーボードを使った従来の3次元空間の位置座標値の指定方法は、実際の陶芸動作とはまったく違った操作を必要とするため、実際の制作過程の経験は生かされず、実際の制作方法と違う熟練した操作を要し、造形に多くの時間や労力を必要とする、などの操作性に対する問題点がある。さらに直接操作が困難なため、作成者がイメージしたものを直感的に作成することは難しく、芸術性の強い陶芸の場での利用は困難である。

図1に、我々が目標とする仮想陶芸システムの概念を示す。利用者は、仮想の陶芸作品を、実際に自分の両手を使って加工することで造形する。仮想造形物には、造形過程の再現、途中からのやり直し、以前に作った物との合成などの仮想システム独特な機能がある。また、仮想のろくろがあり、回転体の造形ができる。造形物の素材（粘土）や造形途中の物、完成物は、近くの陳列棚に並んでいて、いつでも取り出したり、収めたりできる。

我々は、入力デバイスとしては、左右の両手電子グローブ（Virtual Technologies社製 CyberGlove）と磁気センサ（Polhemus社製 FASTRAK）を用意し、3次元空間における利用者の手の位置情報を仮想空間に取り込む。出力デバイスとしては、液晶シャッターメガネ（Stereo Graphics社製 CrystalEyes）を使用し、仮想空間を立体情報として利用者に提示する。仮想世界は、ONYX/RE2上に、GLおよびOpenGLを使用して構築する（図2参照）。

実世界と仮想世界両方の陶芸のノウハウを共有し、仮想環境という特別な意識や知識がなくても利用が可能のように、以下の設計方針で仮想陶芸システムを構築している。

- 1) 自分の手と仮想物を同一視野に置く対話的3Dインタフェースの開発
- 2) 両手利用による自由な立体形状の造形
- 3) 立体視と実際の陶芸に近い手のジェスチャによる直接操作
- 4) 触覚に代わる視覚的機能の工夫

### (2) 仮想陶芸作業空間

芸術的意味あいの強い陶芸の場合、手と目および創造物を含む空間と手の動作は、最も重要な作業の要因となる。自分の手と目および創造物を一つの作業空間に置き、手の動きで、仮想物を加工し、目で確認するという実際の陶芸環境に極めて近い仮想環境を我々が目標とする仮想陶芸環境とした。この環境は、次の利点をもつ。

- 1) 実世界と仮想世界の陶芸のノウハウを共有することで、高い現実感を得る。
- 2) 陶芸に興味をもつ初心者でも容易に利用できる。さらに、陶芸作業の再現、創作物の再利用、幾何学的計算処理などのコンピュータならではの機能の利用が期待できる。

一般に、手を直接使った作業空間は、人の静止場所から1～2m以内の四方空間に限られる。特に陶芸においては、特別大きな作品の作成を除いては、作業空間は、目と体から30～40cm離れた点を中心にして、半径30cmの球内に入る。

こうした限定された空間における作業にとっては、現実感を高めるために、以下の様な条件が求められる。

- 1) 仮想物は、陶芸の作業空間（両手が作る空間）の中にある。
- 2) 実際の手を使って、仮想物を造形するための、仮想物と実際の手との対話的なユーザインタフェースがある。
- 3) 実際の陶芸の場合のように、手と造形物、双方が見やすい位置関係にある。

### (3) 手の動作によるインタフェース

仮想環境に於いて、利用者に現実感を感じさせるには、システムは、なんらかの方法で手の動きを認識し、それに対する現実には存在しない仮想物からの返答を手に返す必要がある。

手による物体の変形を、次のように考える。

- 1) 変形しようとする物体の形状イメージを、手の動作により物に対して表現する。
- 2) 物は、形を変えるという反応を視覚的に返す。また、触覚作用や反力を手に返す。

こうした考えから、手と物は、ある意味で、相互にコミュニケーションを行っていると考えることができる。一般のコミュニケーションに於いては、手の動作は、言葉では表しにくい表現を、言葉の代用として、あるいは、言葉の補完として用いるノンバーバルなコミュニケーションと言われている<sup>[2]</sup>。情感動作や無意識の動作を除いた手の表現動作には、以下の5動作が考えられる（図3参照）。

- 1) 標識 (emblem) : 音声語句に翻訳可能な動作
- 2) 指示動作 (deictic movement) : 対象を示す動作
- 3) 空間動作 (spatial movement) : 空間関係を示す動作
- 4) 活動動作 (kinetographic movement) : 人や物の動きを描写する動作

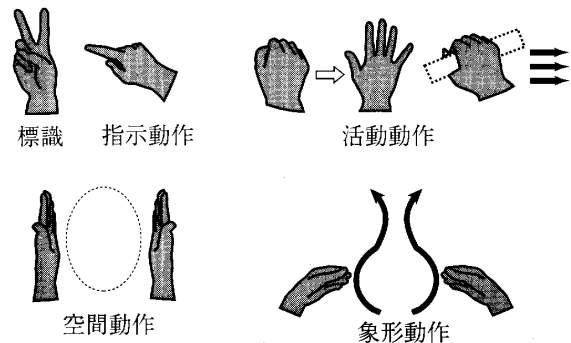


図3 ノンバーバルコミュニケーションのための手の動作

手の動き	基本機能
標識	静的ジェスチャ認識
指示動作	静的ジェスチャ認識 空間的位置検出
空間動作	静的ジェスチャ認識 空間的位置検出
活動動作	動的ジェスチャ認識 動きのパターン認識 空間的位置検出
象形動作	静的ジェスチャ認識 動きのパターン認識



図4 陶芸で使う手の動作

表1 手の動きとそれを認識する基本機能の関係

#### 5) 象形動作 (pictographic movement) : 対象の姿を空中に描く動作

1) ~ 3) は、静的なジェスチャを主とする表現動作である。4)、5) は、動的なジェスチャ表現であり、従来、コンピュータとのインタフェースで扱われていない動作であった。これらの動作を基盤として、我々は、陶芸独特な、手の動的な振る舞いをあつかう、実際の陶芸作業に極めて近いインタフェースを提供する。

図4に、陶芸作業で使われる主な手の動作を表わす。これらの陶芸作業独特の手の動作を認識するため、電子グローブに、「静的ジェスチャ認識」「空間的位置検出」「動的ジェスチャ認識」「動きのパターン認識」の4つの基本機能を用意した。表1は、5つの手の動きのカテゴリとそれを認識する4つの電子グローブの機能の関係を表わす。両手電子グローブの使用は、対象物への直接操作が可能という点で、より実際の陶芸における手の動きをとりいれたインターフェースの実現を可能にする。特に、陶芸などのように、物の変形を表す動作には、動的ジェスチャや動きの認識機能は必須である。現実世界で使用する表現法を基本機能として採用することで、仮想環境との違和感のないインタフェースを実現することができる。

### 仮想陶芸作業環境の構成と実現

#### (1) システム構成

図5に、仮想陶芸作業環境の構成を示す。この環境は、両手サイバグローブ、左右のグローブ情報提示部、仮想物造形部、立体表示部、LCDシャッターメガネから成る。グローブ情報提示部は、サイバグローブの出力から手の形のパターン情報を認識する「静的ジェスチャ認識部」、手の形の変化パターン情報を認識する「動的ジェスチャ認識部」、と磁気センサの出力から動きのパターンを認識する「動きのパターン認識部」、そして、サイバグローブ、磁気センサから位置情報を検出する「位置情報検出部」の4つから成る。陶芸における手の動作は、左右それぞれの手の動作に対して、4つの検出機構を複合的に使い認識の精度を上げるとともに、動作の開始時点、終了時点の推定を行う。造形部は、グローブ情報提示部からの出力によって制

## 対話型 3次元仮想陶芸作業環境の設計と実現

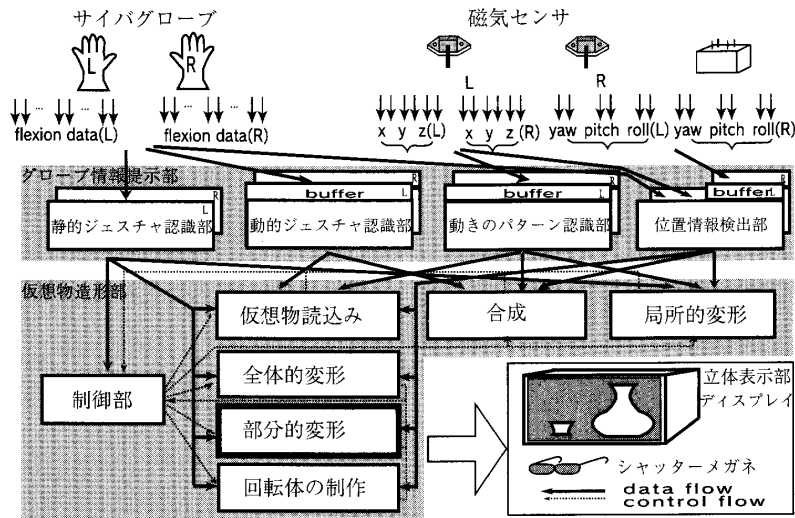


図5 仮想陶芸環境のシステム構成

御される。全操作は、グローブを使って行う。変形作業は、主に、部分変形部で行われるが、全体の大きさを変える、全体的変形や細かい変形を行う機能ももっている。また、陶芸独特な操作として、仮想のろくろの機能を用意した。立体表示部は、仮想物をディスプレイの前面に立体表示する。電子グローブと仮想物の位置関係を調節して、シャッターメガネを介して、手と仮想物の位置を対応づけて感じるようにする。

### 1) 仮想物読み込み

あらかじめ用意された、球、立方体、円柱3つの基本物体や作成途中の物体、完成した物体を作業机上に読み込む。球、立方体、円柱は、両手のジェスチャにより読み込まれる。作成途中、完成した物は、両手で、物体の形状を模擬するか、似た形状がある場合は、番号を示すことで選ばれる。

### 2) 全体的変形

基本物体や完成物体を全体的に、拡大・縮小する。両手グローブの間隔に対応した大きさや方向で、拡大・縮小が行われる。静的ジェスチャ認識部と位置情報検出部の出力を使う。非接触で、物体の変形を行う。

### 3) 部分的変形

物体の表面で、両手を動かすことで、両手で囲まれた部分の縮小、拡大の変形や表面をなめらかにするなどの操作を行う。動作を繰り返す回数に比例して、その効果が増す。静的ジェスチャ認識部、動きのパターン認識部、位置情報検出部からの電子グローブ情報を使い仮想物と接触する手の面や手の形を決める。

### 4) 局所的変形

片手(右手)指先や掌と物体との接触により、接触部分の変形(押しつける、引き延ばし)を行う。左手を握る、開くなどの形状変化を併用して変形動作の開始、終了を指示する必要がある。グローブからの位置情報に基づいて、線や面、立体を変形させる。静的ジェスチャ認識部、位置情報検出部からの電子グローブ情報を使う。

### 5) 回転体の制作

両手親指と人差し指で、水平な円を描き、それにより回転体の外形を描くことで、両手弧

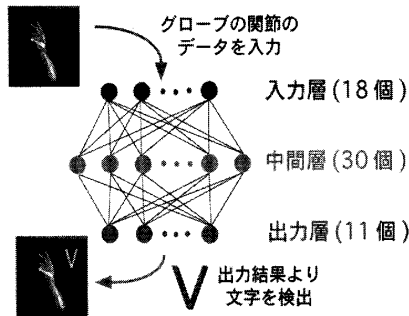


図6 静的ジェスチャ認識に用いたニューラルネット

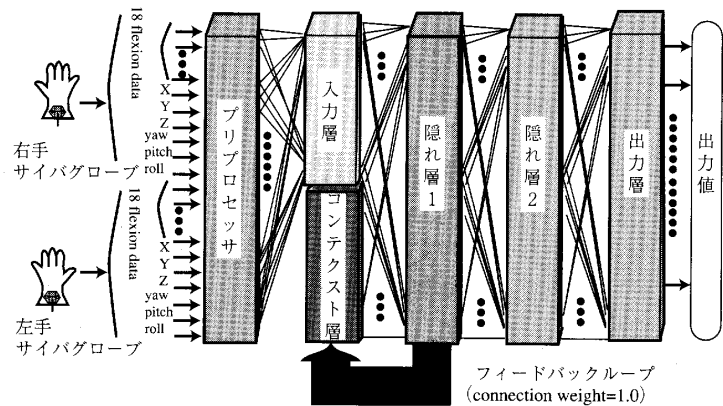


図7 動きの認識のためのニューラルネットワーク

の中央の距離に対応した回転体が出来上がる。静的ジェスチャ認識部、動きのパターン認識部、位置情報検出部からの電子グローブ情報を使う。

6) 合成

両手を用いて2つの物体を移動させ、物体の合成を行う。静的ジェスチャ認識部、動的ジェスチャ認識部、位置情報検出部からの電子グローブ情報を使う。動的ジェスチャ認識により、物を握る、離す、移動するなどの動作を認識させる。

7) 保存

作成途中の物体や完成物の保存を行う。物体は陳列棚に登録され、再利用が可能になる。

8) その他の機能

操作の再現、途中からのやり直し、中断など、コンピュータならではの機能をそれぞれの変形サブシステムで用意する。

(2) 手の動作の認識機能

手の動作を認識する「グローブ情報提示部」における「静的ジェスチャ認識」「動的ジェスチャ認識」「動きのパターン認識」の機能を以下に説明する。

1) 静的ジェスチャ認識

電子グローブによって得られる形状データと、あらかじめ定義されている手の形状情報とを照合し、手の形を認識する。マッチングの高速化、認識率の向上、個人差の解消を図るため、ニューラルネットワークを用いたマッチング法を採用した<sup>[4]</sup>。図6に、静的ジェスチャ認識に用いたニューラルネットワークを示す。

2) 動的ジェスチャ、動きのパターン認識

両手電子グローブの動きと、あらかじめ定義されている手の動きとのマッチングを行う。リカレント型のニューラルネットワークを用いたマッチング法を採用した。手の形の変化には、電子グローブのデータを使い、位置の変化には、磁気センサの出力を使った。図7に、手の動きを認識するためのニューラルネットワークを示す。

3) 3次元位置・方向、空間的大きさの検出

電子グローブの各指の先端にあるセンサの位置データから3次元空間の座標を特定する。さらに、手の形状情報を併用することで、手のひら(面)の位置情報、人差し指の位置と方向を検出する。

電子グローブの人差し指と親指の間隔、両手の掌の間隔などの空間的位置情報を検出する。

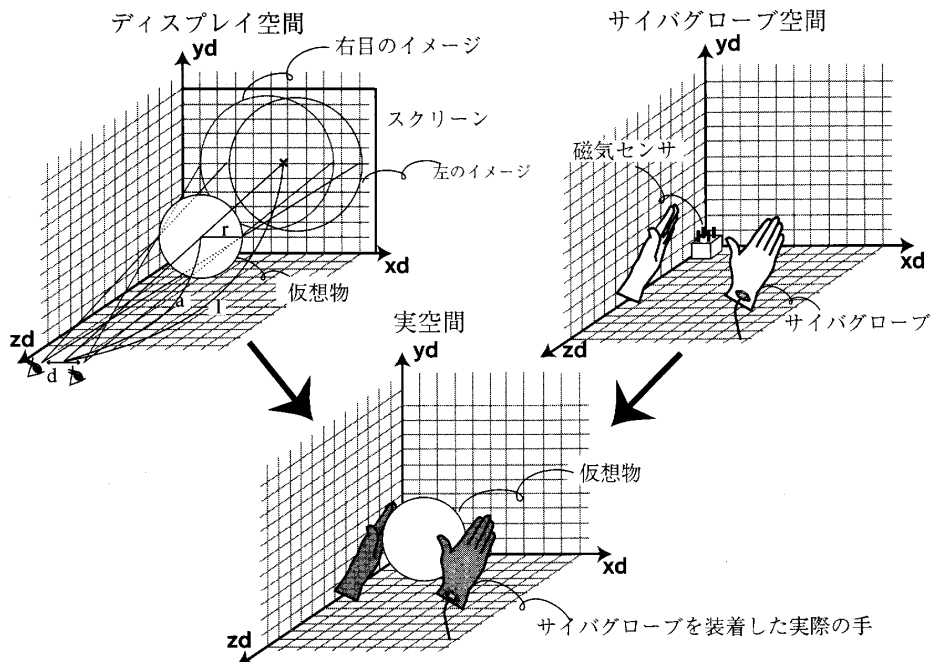


図8 立体視と電子グローブのキャリブレーション

グローブの形状認識のルーチンを併用する。この機能により、空間的大きさの検出や3次元空間内の利用者の作業中心点を検出できる。

### (3) 手の動作と仮想物変形との関係

仮想物は、仮想空間での手と仮想物の位置関係（直接接触）、または、手の動作が示す意味、つまり手の動きのコマンド（間接接触）により変形される。グローブ情報提示部で認識された手の動作により、仮想物造形部の制御部は、電子グローブをはめた手の動きが、直接変形である「部分変形」「局所変形」「合成」の処理を行うのか、間接変形である「全体変形」「回転体の制作」「仮想物の読み込み」なのかを判断し、各々の変形が仮想物に対し作用することになる。手の移動動作を含めた人の手の動きは複雑であるため、間接変形と実陶芸にはない変形部分を引っぱる動作には、左手による付加的動作を準備した。

また、磁気センサの精度、人の立体視の精度の理由から、人の手の形や動きにより、接触面を平面、球面に近似し、変形の意図を含めた変形を行なえるようにした。

### (4) 立体視と電子グローブの位置補正

3D仮想物の変形には、立体視は必須である。当初、立体視を用いずに陶芸作品の制作を試みた。その結果、グラフィックス表示される仮想のグローブと陶芸品オブジェクトの間の相対距離、特に奥行き方向の距離の知覚は困難であった。

左目に写る仮想物像と右目に写る仮想物像の交点がちょうど利用者の手元になるように、ディスプレイ画面上にある仮想物を移動する。さらに、磁気センサが手元にきた仮想物の位置で反応するようにセンサの位置を変えた。960×680の解像度と、108Hzの実効周波数でフリッカのないオブジェクトの立体映像描画を実現している。

これにより、実際の手に仮想の手を重ねることができ、実世界で陶芸品制作を行うのと同じ感覚で、自分の手で仮想オブジェクトを変形・加工することを可能にした。図8を参考に本機能の実現手順を説明する。

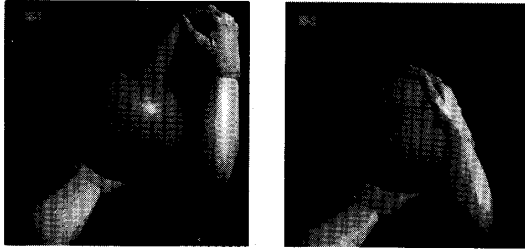


図9 仮想物をポリゴン表現した場合の手の直接操作（再生画面）

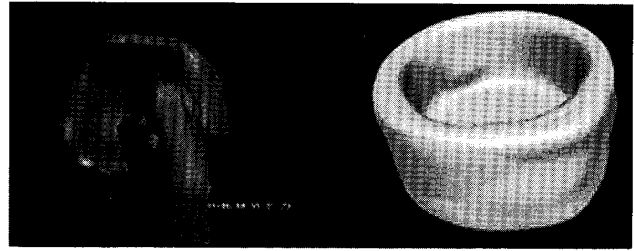


図10 仮想物を曲面表現した場合の手の直接操作と完成物

#### 【電子グローブの位置調整】

- 1) 左右両手の磁気センサによる計測値が、実際の手の位置と XY 平面上ではほぼ同じ位置になるように磁気ソースの場所を決める。
- 2) スクリーン中央に描画されるオブジェクトを、仮想作業内の実際の手の位置まで前にずらす。
- 3) 作業空間内の磁場を測定し、歪みの大きいところの修正をおこなう。

#### 【立体視の位置調整】

- 4) 手の磁気センサ位置とオブジェクトの先端が重なるように左右目に投射する像の間隔をきめる。これはユーザの視覚に対して、感覚的かつ対話的に決定する。

#### 【個人差による調整】

異なるユーザ間でより良好な立体視映像を描画するために、両眼視差を個人別に調整する機能を付加した。

以上の調整で、ほぼ見たところを触ることが可能になる。

#### (5) 仮想物の変形

実際の粘土を手で押して変形すると、造形物に手がくいこんだ部分がきれいに凹む。仮想物をポリゴン表現し、この変形を行うと仮想物は凸凹に変形する。仮想物をなめらかに変形するには、場所を少しずつ変えて、何度も同じ動作を繰り返す必要がある。これは、粘土の材質に、粘性と弾性が適度にあること、変形による時間遅れを考慮すると、ポリゴン数が制限されるなどの理由による。図9に、ポリゴン表現の変形を示す。仮想物をなめらかに変形するためには、仮想物を曲面で表現する必要がある。さらに、仮想物変形の利点を考え、つかんで引く変形も可能にした。図10に曲面表現による変形とそれによる完成品を示す。

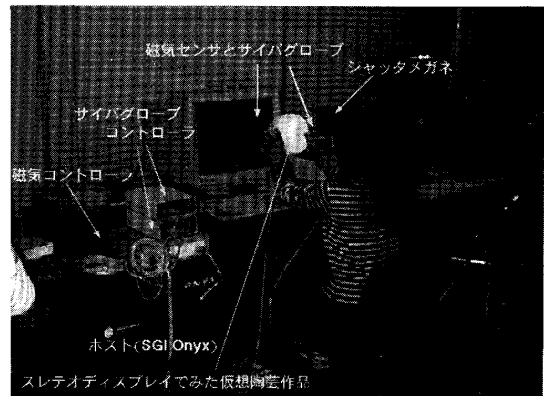


図11 仮想陶芸作業の様子

## 仮想陶芸の予備実験とその考察

仮想陶芸作業環境を使用して予備的利用実験を行った。図11に、実験の様子を示す。また、図12に、本仮想陶芸環境で作成した仮想陶芸物の作品例を示す。

予備実験では、本仮想陶芸環境は、直感的な3次元形状の表現、直接的な形状の操作、物体



の感覚的な変形指示、に適していることが分かった。しかし、細かく指定された物体の造形操作には逆に多くの時間を要した。

予備実験から得られた問題点について、以下に考察する。

- 1) 手の動きのパターンによって、部分的に仮想物を変形する方法は、期待する結果を得たが、陶芸物の一点を指で指示し、視覚だけにたよる局所変形方法は、磁気センサ精度の影響などを受けやすく、磁場のノイズなどのため正確に位置指定するのは難しい。磁気の乱れを起こすものの排除や幾つか前のセンサ値を使った補正などの安定した位置指示を検討中である。
- 2) 部分的変形部で用いている衝突検出の現バージョンは、仮想物のポリゴンの全頂点と手とのユークリッド距離による基本的な方法なので、複雑なオブジェクトになると、CPUの負荷が急増する。これにより、手の動きから目へのフィードバックの時間遅れが生じ、スムーズな、自然な動きを表示する障害になっている。効率的な衝突検出アルゴリズムの使用が必要である<sup>[3]</sup>。
- 3) ポリゴンベースの物体表示は、リアルタイムの表示としては適しているが、物体表面の加工やスムージングなど、利用に問題が残った。曲線・曲面による物体表示法では、なめらかな変形が可能であった。しかし、変形を重ねていくと、制御点が大きく変動し、変形が困難になってくる。制御点移動後の曲面から新しい制御点を求め、新しい制御点を使って、次の変形をするように工夫する必要がある<sup>[5,6]</sup>。
- 4) シャッターメガネの利用では、仮想物の裏に手を置くと、ディスプレイから目への視覚情報を遮るため、その部分の表示ができない。シースルーメガネを採用することも考えられるが、逆に、前面の手に仮想物が投影される。陶芸の場合は、前面の手の動作が主体となり、裏にある部分は物体を回転させて表にすればよいので、シャッターメガネの方が適していると考えられる。
- 5) 仮想物と手の接触による触覚は、電子グローブの指の先端についたバイブレーションによる触覚表示機能を付加中である。視覚的な表現として、動作回数に応じた対象物の変形の変速変化や色や点滅速度の変化などの表示法を工夫し、触覚の視覚化効果を現在検討している。
- 6) 現在、物体の材質（弾性、塑性）を考慮した変形を検討中である。ニューラルネットワークを用いたジェスチャ認識については、文献[4]に詳細を述べている。

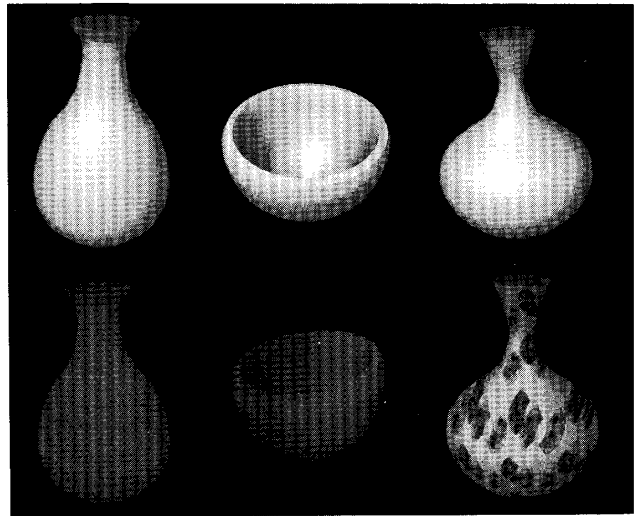


図12 仮想陶芸の作品例

## おわりに

身体に装着する機器を利用した従来の3次元インタフェースでは、仮想空間の中に表示された仮想の手を電子グローブにより間接的に動かすことにより、仮想物体の操作をするもので

あったために使いにくく、操作に熟練を必要とした。これに対して、本インタフェースは、両手電子グローブを実際の手のように、液晶シャッタ眼鏡は実際の眼鏡のようにして、実物を想起させる仮想物体を取り扱えるところに特徴がある。

両手が有する空間的操作機能を立体表示された仮想物体に直接的に反映させることにより、現実世界により類似した形態での取扱いができるようになるのではないかとというのが、開発の初期段階の印象である。将来、より低価格で、容易に装着可能なコードレス電子グローブとより精度のよい位置センサが出現すれば、機器の違和感も少なく、効果的な利用が可能になるのではないかと期待される。

このシステムの応用としては、直接人手により仮想物を作成することで、CADなどによる人工物とは違った手作りの仮想物生成が可能となり芸術の面での利用が広がると考えられる。また、陶芸の弟子が教師の手の動きを教師の目線で見たり、自分の手の動きと教師の手の動きとを比較するなどの教育の場での利用が可能であると考えられる。

今後は、外部ノイズの多い位置センサからの座標データの補正、立体像を画面より手前に表示することの人間の目への影響の調査、視覚による疑似的力覚フィードバックの実装、造形以外の工程の支援機能の実現、分散環境での共同利用、仮想陶芸環境の実験とその評価などを実施して、本インタフェースの有効性を検証しなければならない。

## 謝 辞

本研究を始めるきっかけとなった、本学の芸術的環境と熱心な創作活動、教育をされておられる先生方に感謝いたします。特に、陶芸について丁寧にお教えいただいた久保木真人助教授に深く感謝の意を表します。また、本稿の作成に協力していただいた本学コミュニケーション学科2年、姫野久美子さんに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Sturman,D.J. and Zeltzer,D. : A Survey of Glove-based Input, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.14, No.1, pp.30-39, 1994.
- [2] Ekman,P. and Friesen,W.V. : The Repertoire of Nonverbal Behavior, Semiotica 1, pp.49-98, 1969.
- [3] Shaw,C. and Green.,M. : THREAD: A Two-Handed Design System, ACM Multimedia Systems, Vol.5, March, pp.126-139, 1997.
- [4] Nishino,H., Utsumiya, K., Kuraoka, D., Yoshioka, K. and Korida, K. : Interactive Two-handed Gesture Interface in 3D Virtual Environments, Proc of the ACM VRST'97,pp.1-8, 1997.
- [5] Watt,A. and Watt,M. : Advanced Animation and Rendering Techniques, Chapter 3 The Theory and Practice of Parametric Representation Techniques, Addison-Wesley, 1994.
- [6] Korida,K.,Nishino.H.,Utsumiya.K. : An Interactive 3D Interface for A Virtual Ceramic Work Environment, Proc. of VSMM'97, pp.227-234, 1997.