

# 体積型力覚呈示装置への画像投影に関する研究

小野 直人\*<sup>1</sup> 矢野 博明\*<sup>2</sup> 岩田 洋夫\*<sup>2</sup>

## Image projection to the Volumetric Haptic Display

Naoto Ono\*<sup>1</sup>, Hiroaki Yano\*<sup>2</sup> and Hiroo Iwata\*<sup>2</sup>

**Abstract** – This paper describes image projection to the volumetric haptic display. The volumetric haptic display can represent a physical characteristic of 3-D virtual objects, such as shape and elasticity, as a real object in the real world. We try to project image around this 3-D object with using projector and create integrated environment that contains haptic information and visual sense, but there are two problems. One is distortion of the image on the screen, and the other is that the image has been projected on the user's hand during interaction. These problems destroy the feeling of unity in the haptic information and visual sense. To solve them, we approached distortion collection method using simulator and image extraction method using rotary mechanical shutter. Experimental result shows that these methods enable more natural projection.

**Keywords:** Volumetric haptic interface, 3-D virtual object, distortion collection

### 1. はじめに

日常生活において物体の形状を認識する場合、人は視覚と触覚から多くの情報を得る。視覚は物体の形や表面の特徴、色などを認識することができ、また力覚は、物体の硬さや質感を認識することができる。力覚と視覚から得られる情報を合わせることで、より確かな物体認識ができる。それはバーチャル物体に対しても同様であり、複数の感覚を統合することで現実感を高める研究が現在盛んに行われている。

視覚の呈示には、モニタ画面に投影する、HMD(Head Mounted Display)を装着する、プロジェクタからスクリーンに画像を投影する、等の方法がある。また、力触覚の呈示については、既に様々な装置 (Haptic Interface) が研究されている。

これまで、視覚と力覚それぞれの呈示装置を用いた、より現実感あるシステムを開発する試みが行われてきた。その中に、対象指向型 Haptic Interface の力覚呈示部へプロジェクタによる映像投影を行うという方法がある。この方法は、力覚情報である「硬さ」と視覚情報である「表面のテクスチャ」を、人間が触れる位置に同時に呈示することが可能である。これは、人間が実在の物体に対して触れた場合と非常に似ており、HMD を装着しながら、もしくはディスプレイを見ながら Haptic Interfac を操作するよりも、高い現実感を感じることができる利点がある。

過去、上記のような方法で力覚と視覚の統合を目指した研究の一つとして、対象指向型 Haptic Interface である FEELEX1[1]にプロジェクタから画像を投影する研究が行われた。しかし、FEELEX1は主として「触れる」ことに重点が置かれており、一方向のみしか意図した力覚を呈示することができない。また、連続面の呈示能力を見ると、二次元平面上に凹凸を表現することはできるが、三次元立体は表現することができない。

立体形状を呈示し、三次元の力覚を得ることができる Haptic Interface として、体積型ハプティックディスプレイがある[2]。体積型ハプティックディスプレイは複数のバルーンにより立体的なバーチャル物体を力覚により認識でき、さらにその物体に対して任意の変形を与えることが可能である。

これまでの研究で、体積型ハプティックディスプレイにプロジェクタから画像を投影し、視覚からも現実感を得ようとする試みを行ってきた。しかし、そのまま映像投影した場合、呈示形状によって映像に歪みが発生してしまう問題があった。また、インタラクションを行う際、呈示物体に触れた手の表面に映像が投影されてしまう問題があった。

本稿では、まず体積型ハプティックディスプレイへの自然な映像投影を行うための歪み補正手法について述べる。また、手のマスク画像を実際の投影画像と合成し、手の上に映る映像を隠す手法について述べる。その上で、これらの手法を用いた結果を報告する。

\*1 : 筑波大学大学院システム情報工学研究科

\*2 : 筑波大学 システム情報工学研究科

\*1 : Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

\*2 : Department of Intelligent Interaction Technologies, Univ. of Tsukuba

## 2. 体積型ハプティックディスプレイ

### 2.1 システム概要

本研究で使用した体積型ハプティックディスプレイ(図 1)は、実物体と同様にボリュームを持つバーチャル物体を呈示する手法として、複数のバルーンの体積をそれぞれ制御して、全体として1つの物体を呈示する方法を取っている[3]。バルーンはその特性から、全方向に等しい力を発生させ、また形状も等方的に変化する。また、任意の方向からの力の入力ができ、バルーン内のどこからでもその影響が検出できる。

本装置は、図 2 のような送りねじ機構を持った駆動部のユニット 25 個から構成される。各ユニットのピストンをアクチュエータによって駆動することで、バルーン体積を制御している。また、バルーンと空気圧シリンダの間に空気圧センサを接続し、バルーン内圧力の変化から力の入力を検出している。

力覚呈示部は、上記の機構によって体積を制御した 25 個のバルーンから構成される。各バルーンはポリウレタン製のチューブに固定されている。これを、体心立方格子を基本として三次元空間上にできるだけ均一になるように配置している。さらに周囲をネット包帯で覆うことでバルーン同士の隙間を補間している。また、それぞれの配管の位置が基準位置から大きく離れないように、ゴムによる拘束をしている。

この力覚呈示部に対してプロジェクタによる映像投影を行い、力覚と同時に視覚の呈示を行う。プロジェクタには、PLUS 製 U3-880 を使用した。力覚呈示部は制御体積によってダイナミックに変形するため、任意の形状でも呈示部全体に画像が投影でき、かつ全投影範囲で十分にフォーカスが合う位置にプロジェクタを配置している(図 3)。本システムの概要を図 4 に示す。

### 2.2 画像投影の問題点

体積型ハプティックディスプレイは、プロジェクタから力覚呈示部へ映像を投影することで、力覚と視覚によりバーチャル物体を認識できる。しかし、像投影に関して大きな問題が2つ存在する。

まず、力各呈示部の形状が変化することにより映像に歪みが生じてしまうという問題がある。物体表面にテクスチャ画像を投影することで、より高い現実感が得られることが期待できるが、部分ごとに歪みが見られては現実感を損なう結果となる。

次に、呈示部へのインタラクションを行う際に、手の表面に映像が投影されてしまう問題がある。現実の物体に触れる際、その物体の模様が手の表面に現れることはあり得ず、力覚と視覚の一体感が損なわれる結果となる。

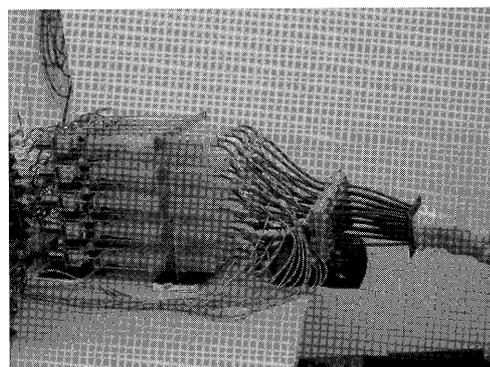


図 1 : 体積型ハプティックディスプレイ

Fig.1 Volumetric haptic display

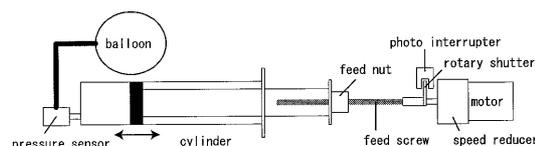


図 2 : 駆動部 (1 ユニット)

Fig.2 (One) drive unit

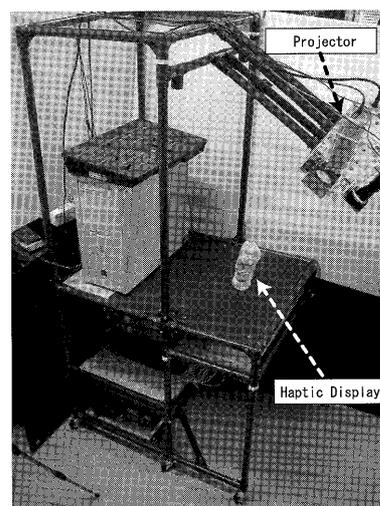


図 3 : システム全景

Fig.3 View of system

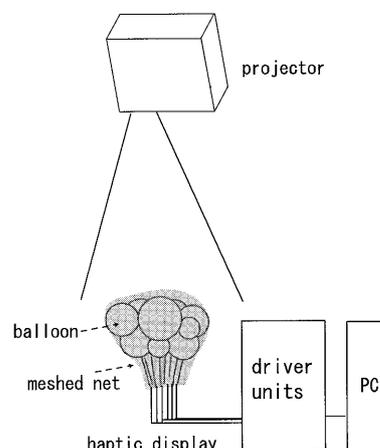


図 4 : システム概要

Fig.4 Outline of system

### 3. 画像補正

映像をそのまま形状呈示部に投影した場合、呈示部の形状により歪みが発生してしまう。もしプロジェクタをユーザの目の位置に配置できれば、歪みが発生することはない。ハーフミラーを用いることで光学的にプロジェクタ位置を目の位置に一致させることはできるが[4]、ハーフミラーを通して物体を見るこの手法では現実感が低下してしまう。実生活の中で物体を見るような自然なコンタクトを行うためには、プロジェクタによって呈示部表面へ直接映像を投影する方法が適していると考えられるが、そのためには投影映像を呈示部の形状に合わせて変形させる必要がある。

歪みを補正するには、形状呈示部の形状を知る必要がある。視体積交差法を用いて、複数のカメラの撮影画像から三次元形状を算出することは可能であるが、形状呈示部に対してインタラクションが行われることを考慮すると、形状が正しく算出できない可能性がある。

また、全てのバルーンの影響範囲内の形状をあらかじめデータベースとして保存しておけば、任意の体積での形状は算出可能である。しかし、これを実現するためには非常に大きな記憶領域を必要とするため、現実的ではない。

本研究では、呈示部の形状を知るために、呈示部のシミュレータを利用することを提案する。そこで、バルーンの影響範囲によって起こるバルーン間の接触・干渉を考慮に入れてバルーン的位置を算出し、それによって形状呈示部全体の形状をリアルタイムに算出するシミュレータを作成した。

#### 3.1 形状シミュレータ

体積型ハプティックディスプレイがバルーンの状態について検出できるのは、バルーン内圧力とバルーン内体積である。バルーンから空気の流出がなく、同様に温度変化がないと仮定すれば、これらの要素からバルーンの半径は容易に算出できる。各バルーン的位置を直接測定することはできないので、バルーン半径から全体の形状を推測する。

各バルーンには、主に図5に示されるような3つの力が働く。(1)配管の復元力、(2)接したバルーンとの間に生じる力、(3)ネットによる呈示部中心方向への力、である。シミュレータでは、この3つの力による簡略化したモデルを作成し、以下のようなアルゴリズムで解析的にバルーン位置を算出している。解析的に算出しているため、バルーン全体が平衡状態になるまでタイムラグが存在する。

- (1) 他バルーンと接していない場合は、基準位置に移動する
- (2) 他のバルーンとの距離が互いの半径の和よ

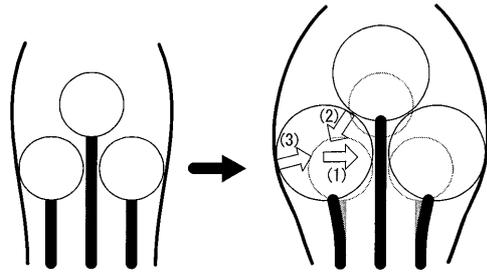
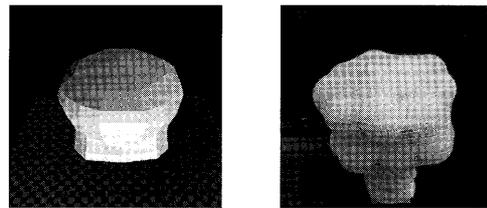


図5：バルーンにかかる力

Fig.5 Force effected to the balloon



シミュレーション

実際の呈示部

図6：シミュレータと呈示部の形状比較

Fig.6 Configuration comparison

りも近づいた場合は、両バルーンをお互いが接する位置まで移動する

- (3) 配管が他層のバルーンと接している場合、配管の位置を移動し、それに伴ってバルーンの基準位置を変更する

このタイムラグは、体積変化が大きいくほど大きくなる。バルーンの影響範囲は最大で24ml/sec（半径換算では9mm/sec）であり、この場合のタイムラグは約0.2秒程度となる。しかし、インタラクション時に最大速度で体積変化を行うことはまれであり、この程度のタイムラグは無視できると考えられる。

また、シミュレータでは、ネット包帯の代わりとして現在200程度のポリゴンにより平面でバルーン同士の隙間を補間している。例として、最大制御体積時のシミュレーション結果と実際の装置の様子を図6に示す。現在、シミュレータの精度は、バルーンがそれぞれ同じような体積である場合には呈示部の形状と近い結果となるが、一部のバルーンだけが大きい、もしくは小さい場合には誤差が大きく、改良が必要である。

#### 3.2 歪み補正テーブル

歪み補正とは、投影したい入力画像を力覚呈示部へ投影した際に正しく映るように変形させることである。ここで変形された画像が、プロジェクタから直接投影される出力画像となる。この変形前後の情報を記述した対応表を補正テーブルと呼んでいる。

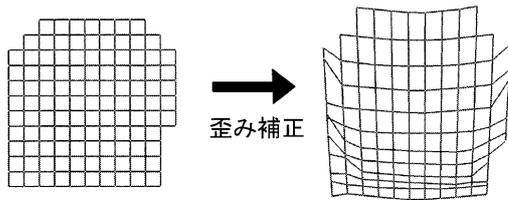


図7：歪み補正テーブル

Fig.7 Distortion collection table

前述のシミュレータを使用することにより、呈示部への画像的处理を行うことなく、各バルーンの圧力・体積から呈示部全体の形状を算出することができる。

算出した呈示部の形状より、プロジェクタで投影される画像の点が呈示部上で結像する位置が算出できる。これにより、用途によって様々な補正テーブルの作成が可能となる。

例として、ユーザがある位置から提示形状を見たときに、歪みなく元の画像が見えるための補正テーブル作成手順を以下に挙げる。

- (1) 視錐台を任意の分割数で等間隔に分割する
- (2) 分割した各光路のうち、バーチャル物体を通過するものについて逆光路追跡を行い、その光路を通るためのプロジェクタ投影座標を算出する
- (3) 算出したプロジェクタ投影座標をまとめて補正テーブルとする

呈示部の形状はユーザのインタラクションによって変形するので、補正テーブルはリアルタイムに作成する必要がある。上記の例の場合、分割の細かさに依存するが、14×14程度の分割数にした場合、歪み補正テーブルの更新レートは約1Hzである。これは、リアルタイム性を考えた場合、まだ改善が必要であると言える。実際に作成した補正テーブルを図7に示す。

#### 4. 画像処理法

体積型ハプティックディスプレイでは、インタラクションを行う場合、プロジェクタと呈示物体の間に手を入れることになり、当然手の上に映像が投影されてしまう。

本装置に限らず、プロジェクタで投影した映像に直接触れようとする装置の場合、手の上に映像が映ることが大きな問題となる。そこで、この問題を解決する方法として、手のマスク画像を作成し、その画像を投影画像と重ね合わせる手法を提案する。

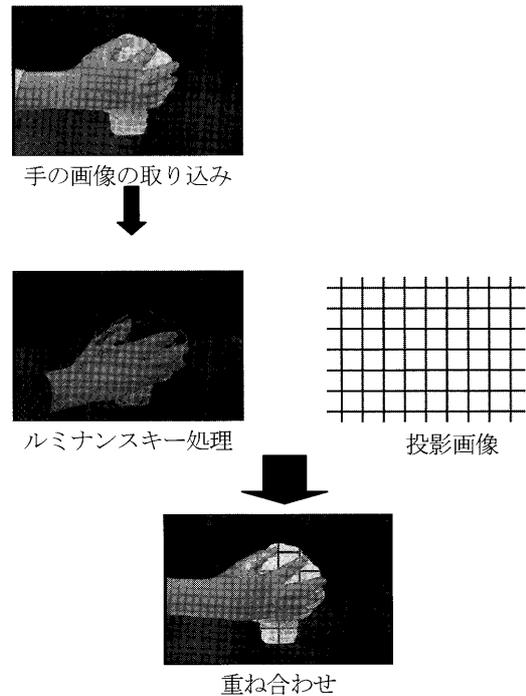


図8：画像合成過程

Fig.8 Image synthesis process

#### 4.1 画像抽出

ある画像から任意の部分を抽出するためには様々な方法がある。その手法を以下に挙げる。

- 赤外線画像法

赤外光の強度により分離を行う方法。撮影にはサーマルビジョンカメラを用いるが、非常に高価である。[5]

- 背景差分法

抽出対象物体の含まれていない画像を用意し、その画像と入力画像を比較することによって物体を抽出する方法。計算コストは低く、安定した結果を得ることができるが、背景の変動に弱い。本装置では、背景の一部となる呈示部が大きく変形するため適さない。

- クロマキー手法

背景を青色に統一し、クロマ（色）信号の値により分離を行う方法。手の背景となる形状呈示部が白色以外では投影結果に影響が出るため、本装置では適さない。

- ルミネンスキー手法

画像の輝度の値により分離を行う手法。分離対象とそれ以外の輝度が異なるように光源の設定を行う必要がある。

体積型ハプティックディスプレイでの使用を考えた場合、ルミネンスキー手法以外の方法では実現が難しい。そこで、本研究ではルミネンスキー手法で手のマスク画像を生成する。マスク画像を生成し投影画像と合成する過程は、図8のようになる。

## 4.2 画像投影と撮影の分離

抽出にいずれの手法を用いた場合でも、プロジェクタから映像が投影された状態では、投影映像の影響によって任意の部分の抽出することは困難である[6]。そこで、カメラでの撮影の際、何らかの方法でプロジェクタからの投影光を遮断する機構が必要となる。上記を可能とする機構を以下に挙げる。

### ・ 偏光板の利用

プロジェクタからの映像を偏光板に通し、カメラ前にはそれに直交するような偏光板を設置することで、呈示部で反射した投影光を遮光する方法。偏光を崩れずに反射させるためには、アルミ粉末等を含む塗料を呈示部に塗布する必要があるが、呈示部であるバルーンに塗料を均一に塗布することは難しい。さらに、偏光板の透過率は低く、投影画像の輝度が落ちてしまう。

### ・ 液晶シャッターの利用

カメラ撮影とプロジェクタ投影を交互に行うという理論に基づき、液晶シャッターを用いて時分割を行う方法。制御は簡単に行うことができるが、偏光板と同様透過率は低く、投影画像の輝度が落ちてしまう。

### ・ メカニカルシャッターの利用

カメラとプロジェクタの前に、それぞれを物理的に遮光するシャッターを設置する方法。正確な制御が必要とされるが、輝度は落ちにくい。

投影画像の輝度を考慮すると、本研究ではメカニカルシャッターを利用した方法が適していると考えられる。本研究では、メカニカルシャッターを用いて撮影と投影とを分割する。

## 5. メカニカルシャッター

### 5.1 シャッターの原理

従来、メカニカルシャッターはカメラの露光装置として用いられてきた。カメラのシャッターには、人間の瞳孔のような働きをするレンズシャッターと、2枚の膜が上下または左右に動くフォーカルプレーンシャッターがある。

本研究では、シャッターとして一部を黒く塗った無色透明の円盤をモータにより回転させたものを用いた。これは回転式フォーカルプレーンシャッターと呼ぶこともできる。

カメラ、プロジェクタそれぞれで別のシャッター機構を取り付け、同期をとることで撮影と投影を分離することは可能である。しかし、2枚のシャッターを同期させることは難しく、機構も大型になってしまう。そこで本研究では、1枚のシャッターでカメラ、プロジェクタそれぞれを遮光する。シャッター

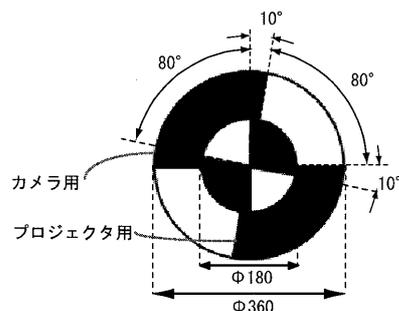


図 9：シャッターパターン

Fig.9 Pattern of the shutter

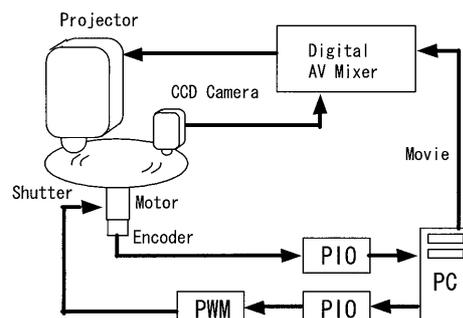


図 10：システム構成

Fig.10 System configuration

一とする円盤の内周部分をプロジェクタ用シャッター、外周部分をカメラ用シャッターとし、1枚でのシャッターリングを可能とした。

今回利用したカメラは NTSC 方式の撮影であるため、1秒あたり 30 フレーム、60 フィールドの構成となる。すなわち、1秒間に 60 枚の静止画を連続して投影していることと等しい。各フィールドで均等にシャッターリングを行うために、1秒当たり 60 回シャッターリングを行うことにした。

プロジェクタ、カメラそれぞれのシャッタースピードは、シャッターの黒塗りの面積を変化させることで任意に変更が可能である。しかし、プロジェクタのシャッタースピードを短くすることは投影画像の輝度を落とすことにつながる。逆にプロジェクタのシャッタースピードを長くすることは、カメラのシャッタースピードを短くすることにつながる。これは撮影画像の輝度を落とす結果となり、手のマスク画像生成が困難になる。

これらを踏まえ、本研究で用いたシャッターパターンは図 9 である。このシャッターを秒間 30 回転することで、1秒当たり 60 回のシャッターリングを行う。カメラ側、プロジェクタ側ともにシャッタースピードは 1/135 秒である。

### 5.2 システム構成

シャッター部のシステム構成を図 10 に示す。手を撮影するカメラは、ワテック製 CCD カメラ (WAT-202B) を用いた。カメラで撮影した映像は NTSC

方式で Panasonic 製デジタル AV ミキサ (WJ-AVE7) に送信される。ミキサ内でルミナンスキー処理を行い、PC からの画像と合成した映像をプロジェクタにより投影する。

メカニカルシャッターには、上記のようなパターンのアクリル製の円板を使用した。シャッターを回転させるモータは三洋電器製 SuperMini を使用し、フォトインタラプタを用いたエンコーダによりモータの回転数を計測している。計測した回転数より、PI 制御でモータの速度制御を行う。

## 6. 投影実験

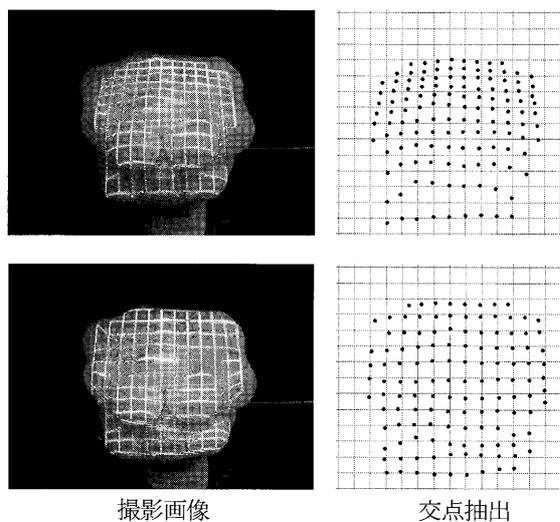
シミュレータを用いた歪み補正テーブル作成手法の有効性、またシャッターの効果を確かめるために、実際に形状呈示部への画像投影実験を行った。

### 6.1 補正画像投影実験

本実験では、補正による効果が明確に現れるように、ユーザが指定の位置から 10mm の大きさに見えるような格子模様を投影した。それを歪み補正ありの場合と歪み補正なしの場合それぞれ最大体積にした呈示物体に投影し、元画像と比較した。

図 11 は補正あり・補正なしそれぞれの投影結果と、投影された格子の交点の位置を抽出したものである。この交点の位置と、元画像での交点の位置を比較し、それら 2 点間の距離を測定した。

結果として、補正なしの投影結果では最大誤差 16.2mm、各点の平均誤差が 8.9mm であった。歪み補正ありの場合では、最大誤差は 6.9mm、各点の平均誤差は 2.1mm となり、十分元画像に近い投影結果となった。



撮影画像 交点抽出  
(上: 補正なし・下: 補正あり)

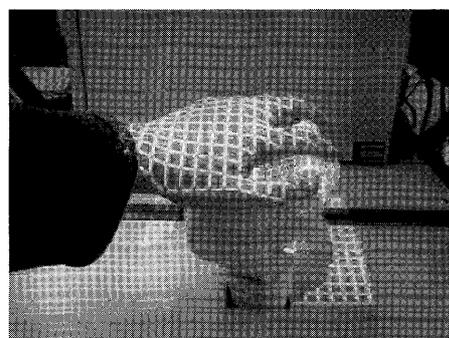
図 11: 格子画像投影結果

Fig.11 Result of projection

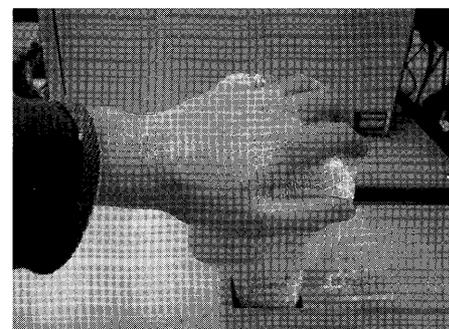
### 6.2 メカニカルシャッターの効果

メカニカルシャッターによる手の分離ができていることを確認するため、投影実験を行った。実験では、まず効果が明確に現れるように、格子模様の映像を投影した。図 12 は、メカニカルシャッターを使用しない場合と使用した場合の投影結果である。メカニカルシャッターを使用することで、手の位置に重なる映像を隠すこと可能であることがわかる。また、格子模様の代わりにテクスチャ画像を投影した場合も、手の上に映る映像を取り除くことができた (図 13)。シャッターによって多少映像が暗くなったが、模様を崩さずに投影することが可能であった。

一般にこのような手法を取った場合、画面の更新速度の低下により「フリッカ」と呼ばれる画面のちらつきが見られる場合がある。しかし、実験中には



プロジェクタのみの投影結果



シャッター使用時の投影結果

図 12: シャッターの効果

Fig.11 Effect of using mechanical shutter

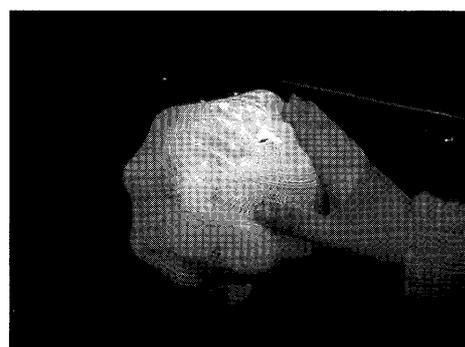


図 13: テクスチャ画像での投影結果

Fig.13 Result of projection at texture image

そのようなちらつきも見えず、鮮明な映像が投影された。

## 7. 考察

実験より、シミュレータによる歪み補正テーブル算出が可能であることが確認できた。また、この歪み補正テーブルの精度は、インタラクションによる形状呈示部の移動・ずれを考慮すると十分であると言える。

まれに、インタラクションを行った場合やバルーンを膨張させる順序などにより呈示形状がシミュレーション結果と大きく異なってしまう場合が見られた。また、実際の呈示部では、バルーン同士の隙間はネット包帯により曲面で補間されているが、シミュレータではポリゴン平面で補間しているため、それに基因した誤差も見られた。これらはシミュレータの精度を向上させることで改善できると考えられる。

手の像の分離に関しては、プロジェクタから投影されたマスク画像と実際の手の大きさ、位置が異なるという問題があった。これは、プロジェクタとカメラの位置の差による。本稿で述べたメカニカルシャッターを用いる手法では、カメラとプロジェクタを並列に配置する必要があった。この場合、カメラとプロジェクタの光軸を一致させることは不可能である。

本装置では、プロジェクタの光軸に対してカメラの光軸は約  $11^\circ$  傾いており、プロジェクタ映像の中心とカメラ画像の中心は、呈示部の中心座標で一致させている。中心位置であれば、投影されるマスク画像と実際の手のずれはほぼ 0 となるが、呈示形状は三次元的に大きく変化する。それに従い、手の位置も呈示部の中心から離れ、大きな誤差が生じる結果となる。この誤差を軽減することは、手の三次元位置を取得し、その位置情報よりマスク画像を補正することで可能となると考えられる。

## 8. まとめと展望

本稿では、体積型ハプティックディスプレイを用いた視覚を伴った力覚呈示システムの構築を目的とし、映像投影に関する歪み補正の手法を提案した。また、手に映る映像を隠すために、メカニカルシャッターを使用する手法を提案した。

今後の展望としては、実際に視覚呈示と力覚呈示を同期したコンテンツ制作、さらに複数のプロジェクタを使用した形状呈示部全体への投影が挙げられる。プロジェクタを増やすことで、投影範囲の拡大とともに画像の投影解像度を上げる効果が期待できるが、高い形状シミュレーション精度が必要とされ、また複数の投影画像が重なる問題も生じてしまう。

これらを踏まえ、プロジェクタ台数の検討を行いながら呈示部全範囲への投影環境の構築を目指す。

## 参考文献

- [1] Iwata, Yano, Nakaizumi, Kawamura: Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, SIGGRAPH 2001 Conference Proceedings, pp. 469-475 (2001)
- [2] 阿部、岩田：空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ；筑波大学理工学研究所修士論文 (2003)
- [3] 阿部、矢野、岩田：空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ；ヒューマンインヤーフエース学会研究報告集, Vol. 4, No. 3, pp. 67-70 (2002)
- [4] Masahiko Inami, Naoki Kawakami, Dairoku Sekiguchi, Yasuyuki Yanagida, Taro Maeda and Susumu Tachi: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000, pp. 232-240 (2000)
- [5] 川原、松下、新田、苗村、原島：透過型ビデオアパタの提案と実装～熱画像を利用した実時間システム；日本バーチャリアリティ学会第 5 回大会論文集 pp333-336 (2000)
- [6] 山下、葛岡、山崎：臨場感のある遠隔共同作業空間の構築；第 14 回ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集 pp463-468 (1998)

(2005 年 1 月 25 日受付)

## 著者紹介

小野 直人 (学生会員)



平成 16 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。現在、同大学院博士課程システム情報工学研究科在学中。力覚呈示装置に関する研究に従事。日本バーチャリアリティ学会学生会員。

矢野 博明 (正会員)



1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員 (PD)、99 年筑波大学機能工学系講師、04 年同大システム情報工学研究科講師、現在に至る。力覚呈示、移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫 (正会員)



1986 年東京大学大学院工学系研究科修了、同年筑波大学構造工学系助手、88 年同講師、93 年同助教授、99 年同大機能工学系助教授、02 年同教授、04 年同大システム情報工学研究科教授、現在に至る。人工現実感に関する研究に従事 (工学博士)。