

## 基礎論文

## 多種触覚デバイスに対応した HapticWorkBench の開発

矢野 博明\*<sup>1</sup> 笥 直之\*<sup>2</sup> 小木 哲朗\*<sup>3</sup> 廣瀬 通孝\*<sup>3</sup> 中垣 好之\*<sup>3</sup>

## Development of HapticWorkBench Supporting Various Types of Haptic Devices

Hiroaki Yano \*<sup>1</sup>, Naoyuki Kakehi \*<sup>2</sup>, Tetsuro Ogi \*<sup>3</sup>, Michitaka Hirose \*<sup>3</sup>, Yoshiyuki Nakagaki \*<sup>3</sup>

**Abstract** – This paper describes the HapticWorkBench, which can support haptic feedback device. There are various types of haptic devices which have various shapes and functions. Most of immersive displays are rear projection type display and can not be used with some types of haptic devices because those devices hide the images projected on the screen. We developed an immersive display called HapticWorkBench which can be used by both front projection and rear projection freely. Therefore, it can be used with various types of haptic devices. The calibration method and the influence of the tracking error are also discussed.

**Keywords** : Virtual reality, Immersive projection technology, Haptic device

## 1. はじめに

仮想物体からの反力を呈示するために種々の触覚デバイスの研究開発がおこなわれ、視覚と触覚を融合したより高度な仮想空間の構築が可能となってきた。これまでに開発された触覚デバイスはデスクトップ用の PHANTOM [1](Sensable Technologies), HapticMaster [2] (日商エレクトロニクス) や手に装着してデバイス自身を自由に移動させて仮想物体とインタラクションするタイプの RutgersMaster [3], CyberTouch (Virtual Technologies) など、用途や機能、形状も多岐に渡る。

一方、視覚提示手法では CAVE [4] や ImmersaDesk [5](Pyramid Systems) など高解像度のプロジェクタを用いて大型スクリーンに仮想空間の立体映像を提示する Immersive Projection Display (没入型ディスプレイ) [6] が注目されている。これはユーザの視野角のほとんどを大画面によって覆い、ヘッドトラッキングにより視点に応じた立体映像を提示することでユーザに対して仮想空間への高い没入感を生成する。

これらの触覚デバイスと没入型ディスプレイとを組み合わせることで、立体表示された仮想物体からの反力等をユーザに呈示したり、視覚提示位置と触覚提示位置を一致させることができるなど、操作性の向上や仮想空間の認識等でさまざまな効果が期待される。しかし、これまでの没入型ディスプレイは背面投射型ス

クリーンが主であり、デスクトップ用の触覚デバイスを使用する場合、触覚デバイス自身によって一部の映像が隠れてしまうなど不都合が生じるために手に装着するタイプか比較的小型の触覚デバイスしか用いることができなかった。そこで本研究では、触覚デバイスをスクリーンの前後どちらにでも配置できるようにすることで種々の触覚デバイスに対応した没入型ディスプレイ HapticWorkBench の開発をおこなった。

## 2. 従来の研究

本研究では、種々の触覚デバイスに対応した没入型ディスプレイの開発を目指している。

没入型ディスプレイは立体映像空間の中にいながら自分自身の体が直接見えるため没入感が高く、また HMD に見られる視野角の不足や酔い、重量による首の疲労などの問題に有効である。没入型ディスプレイのスクリーンには平面スクリーンが一面のものと複数面のもの、あるいは曲面スクリーンのもの [7] があり、形状と大きさによって映像の提示可能範囲が変わる。触覚デバイスには東京大学の HapticGEAR [8] など大きな可動範囲を持つものもあるが、多くはデスクトップ型で可動範囲が大きくない。そこで本研究では HMD やデスクトップ CRT と比べて画面が大きく高精細な画像提示が可能な一面のみの没入型ディスプレイに注目する。

一面の大画面没入型ディスプレイとしては Responsive WorkBench [9], ImmersaDesk, Immersive WorkBench [10], Visionmaker PS [11] が開発されており、CAD、手術シミュレータ等に利用されるようになってきた。これらはすべて背面投射型のスクリーンを用

\*1: 筑波大学

\*2: NTT

\*3: 東京大学

\*1: University of Tsukuba

\*2: NTT

\*3: the University of Tokyo

いている。

一方、触覚提示環境は様々な触覚デバイスが開発されたが、視覚提示についてはCRTやHMDを用いたものがほとんどであった。大型、高精細のスクリーンを用いた例としては、PHANToMを背面投射型の没入型ディスプレイに取り付けたノースカロライナ大のNanoWorkBench [12]がある。これは、光学式位置センサを用いてヘッドトラッキングをおこない、PHANToMによってトンネル走査型顕微鏡のデータに触れることを目的として作られている。しかし、PHANToMのみに対応しており、その他の様々な触覚デバイスには対応していない。また、ハーフミラーにより虚像を生成し視覚情報と触覚情報を重ねあわせるシステムも開発されている [13]。これは虚像によって映像と作業空間を重畳させ、前面投射でありながらユーザーの手も見える優れた手法であるが、本システムで利用するHapticGEAR等ではミラーの奥に提示される視覚情報に触れる際にはワイヤーがミラーに触れ不都合が生じる。

これらに対して本研究で開発したHapticWorkBenchは、触覚デバイスをスクリーンの前面あるいは背面に使用目的に応じて配置でき、これまで開発されてきた種々の触覚デバイスと組み合わせて使用する事が可能である。またHapticGEARなどの可動範囲の大きい触覚デバイスと組み合わせて使用する事も出来る。

### 3. HapticWorkBench の設計指針

これまでの没入型ディスプレイは背面投射型スクリーンを用いることが多く、触覚デバイスをスクリーンとユーザーの間に置いて使用しなければならなかった。しかし、触覚デバイスによっては、その構成部品によって画面が隠れて見えないという問題があるためPHANToMのような小型の触覚デバイス以外は、没入型ディスプレイと同時に用いられることがなかった。

しかしながら、大画面の立体映像を用いて触覚を提示することは、前述のHMDに見られる欠点を補い、また視覚的な仮想物体の提示位置と触覚の提示位置を一致させることが可能で、没入感が高いというメリットがある。そこで本研究では、種々の触覚デバイスに対応した没入型ディスプレイとして

- (1) 立体視が可能
- (2) ヘッドトラッキングによる視点連動
- (3) スクリーンの前後どちらにも触覚デバイスを置く

という条件を満たす没入型ディスプレイを開発した。

まず、(1)の立体視と(2)のヘッドトラッキングにより、ユーザーの視点にあわせた立体映像をリアルタイ

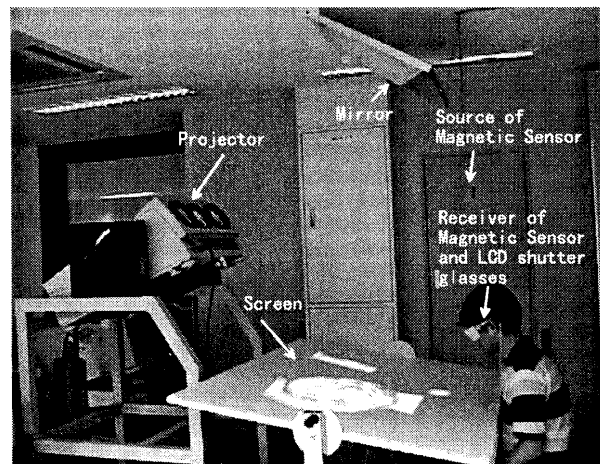


図1 前面投射型 HapticWorkBench  
Fig.1 Configuration in front projection

ムで提示し、仮想物体と触覚提示位置を一致させることが可能になる。さらに(3)のスクリーンを挟んで前後どちらでも触覚デバイスを配置できるようにすることで、どのような触覚デバイスであっても対応可能となる。たとえばスクリーンの背後に触覚デバイスを配置することで、触覚デバイスが大きなものであっても映像を隠すことなく使用できる。また小さい触覚デバイスについてはスクリーンの前後どちらでも使用できる。これはプラズマディスプレイや液晶ディスプレイなど薄型のディスプレイを用いることでも可能である。しかし現時点では映像の更新レートが低い為、(1)の立体視の手法としてよく用いられる時分割方式の立体視の場合にちらつきが目立ち実用に耐えない。さらにスクリーン自体が厚くなるためスクリーンの後ろに触覚デバイスを配置した時に可動範囲が狭くなるという問題がある。そこで本システムでは、立体視が可能でスクリーン自体を薄く出来るCRT型のプロジェクタを用いることとした。プロジェクタとスクリーンを可動式にし、前面投射と背面投射を自由に切り替えることでスクリーンの手前であっても裏側であっても触覚デバイスを配置できるようにし、様々なタイプの触覚デバイスに対応する。なお、スクリーンはHMDやCRTと比べて画面が大きく高精細で、機構を単純にすることができる1面の平面スクリーンを用いるものとした。

以上の点を考慮して、本研究ではHapticWorkBenchという種々の触覚デバイスに対応した没入型ディスプレイを開発した。

## 4. HapticWorkBench のシステム構成

### 4.1 ハードウェア構成

HapticWorkBenchは映像提示部(プロジェクタ、スクリーン、ミラーおよび触覚デバイス支持台)、位置

## : 多種触覚デバイスに対応した HapticWorkBench の開発

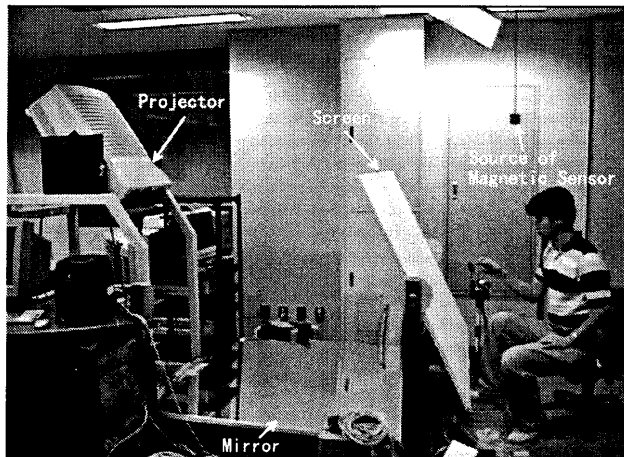


図2 背面投射型 HapticWorkBench  
Fig.2 HapticWorkBench in back projection

センサによって構成される (図1, 図2)。

高解像度プロジェクタとしては NEC XG-1101J (三管式 CRT プロジェクタ 単残光型) を使用した。映像は  $1280 \times 492$  ドットを 120Hz で表示し、液晶シャッターめがねによる時分割方式の両眼立体視をおこなっている。スクリーンは、透明アクリル板 ( $1450\text{mm} \times 1150\text{mm}$ ) に白色ビニルシートを張ったものを使用した。ソフトスクリーンを使うことも考えられるが、スクリーンが経年変化でたるむことやスクリーン上に軽いものであれば載せて使えることを考慮した。また、画面の大きさは、ミラーを用いるので使用する部屋の天井の高さ (本研究で用いた部屋の天井高は  $2.4\text{m}$ )、プロジェクタの投射距離からスクリーンが最大になるよう考慮して決定した。

前面投射と背面投射の切り替えは、図1に示すように前面投射はプロジェクタを上に向け、天井面に取り付けたミラーを用いて光路を反転させて実現する。背面投射の場合は図2に示すようにプロジェクタを下に向け、床面に設置したミラーで映像を反射させて実現する。

HapticWorkBench ではプロジェクタやスクリーンの傾斜角度を無段階で調節することが出来るように、それらの側面に支持台の支柱からゴムパッドをネジで押し付け、水平面より  $\pm 90^\circ$  の範囲であれば任意の傾斜角度で固定できるようにした。またスクリーンとプロジェクタの支持台にはキャスターが付いており、スクリーンの角度に応じてスクリーンとプロジェクタの距離を自由に変えることができる。プロジェクタの高さは重量の関係で  $1500\text{mm}$  で固定し、スクリーンの高さは  $25\text{mm}$  間隔で中央位置を  $870\text{mm}$  から  $1270\text{mm}$  まで調節できるようにした。

天井に配置するミラーは天井の強度を考えると軽い必要がある。また床面のミラーもサイズが大きく、ガ

ラス製のミラーで精度の高い反射面を作り出すことが難しい。そこで HapticWorkBench では2枚のミラーにはフィルムミラーを用いた。天井面のミラーの大きさは  $750\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、床面のミラーは  $1600\text{mm} \times 1300\text{mm}$  である。ミラーの角度も変更できるように天井面のミラーは、一端を回転軸にしてもう一端を天井面から伸ばした鎖によって支持し、鎖の長さを調節することで角度を変更する。

なおプロジェクタの光軸とスクリーン面は垂直に交わるほうが良いが、プロジェクタの画角調整によりある程度まで対応できる。HapticWorkBench で用いたプロジェクタは  $\pm 12^\circ$  まで調整可能である。

触覚デバイスの支持台は、重量の大きい触覚デバイス用の台と、小さい触覚デバイス (例えば PHANTOM) 用の2種類を用意している。重量の大きい触覚デバイスの台は、本体をスクリーンの裏側に設置するために高さ  $360\text{mm}$ 、幅  $440\text{mm}$  奥行き  $300\text{mm}$  のスチール製の台とした。重量の小さい触覚デバイスの台は、前面、背面の両方で用いることが考えられるため、高さを自由に調節できる。支持棒は直径  $30\text{mm}$  で、先端に固定された支持台の高さは  $600\text{mm}$  (前面投射用最下点) から  $1000\text{mm}$  (背面投射用最上点) まで無段階で変更することができる。

ヘッドトラッキングや、触覚デバイスの種類によっては手先の位置を計測するため、位置センサとして磁気センサ (Polhemus 社製 FastTrak) を使用している。

#### 4.2 ソフトウェア構成

HapticWorkBench を用いるには、触覚デバイスの制御と仮想空間の映像をユーザにフィードバックする為のソフトウェアが必要である。本システムでは触覚デバイスの制御には、触覚基本ソフトウェア (HIP) [16] を用いている。HIP は、触覚デバイスの種類によらず同じ仮想空間を操作可能とするためのソフトウェアライブラリであり、HapticWorkBench との整合性が良い。さらにこのライブラリは、VRML などの共通フォーマットデータをフィルタで変換することにより簡単に仮想物体に触れることが出来る。これにより、HIP を利用して他のユーザが開発したデータや、従来のデスクトップ環境で HIP を使って構築した仮想空間を直ちに体験することが出来る。視覚提示プログラムは OpenGL を用いて作成する。視覚のプログラムは没入型ディスプレイ CABIN [17] で使われているプログラムと互換性があり、視覚ディスプレイ用ソフトウェアと共に触覚デバイスにも依存しない開発環境を構築することができる。

なお、触覚フィードバックは視覚フィードバックに比べて数十倍から数百倍のアップデートレートを必要とする。そのためにプログラムを視覚用と触覚用にプ



## : 多種触覚デバイスに対応した HapticWorkBench の開発

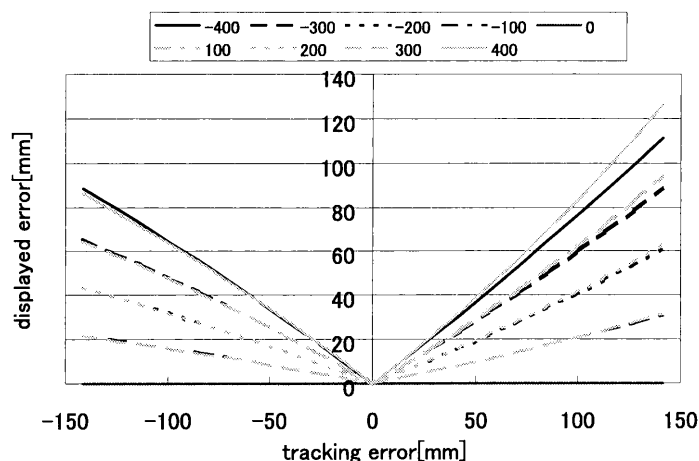


図 4 計測誤差と表示位置誤差の関係

Fig.4 relationship between tracking error and displayed error

caption

の誤差の大小が逆転する。図 4 の誤差-50mm 以下ではこの影響が出ていると考えられる。

また、仮想物体がスクリーンに近いほど誤差は少なくなる。

なお、視点位置を変えるとずれ量は変わるが全体としての傾向は同じである。

### 5.3 位置センサ

ヘッドトラッキングの方式としては、ゴニオメータを用いた機械式、光学センサを用いた光学式、磁気センサを用いた磁気式、画像処理を用いる方法 [18] が考えられる。ゴニオメータを用いれば正確にトラッキング可能であるが、ユーザに対する拘束感が大きい。光学式は正確であるが装置が大掛かりで、また高価である。画像処理は位置精度が高くユーザに対する負担は少ないが、処理が複雑で時間遅れの点で本システムには不向きである。磁気式は、精度も数ミリで時間遅れもそれほど無く、ユーザに対する拘束感もそれほどない。そこで HapticWorkBench では、ヘッドトラッキングのために磁気センサ (Polhemus 社製 FastTrak) を使用している。ユーザの頭の位置を正確に計測するため、磁気センサのソースを高さ 1700mm、スクリーンとユーザの着座位置との中間点 (スクリーン中央から手前に 400mm の位置) に天井から吊るして、位置を計測する。触覚デバイスのモータ等の磁気による影響で計測結果が微小変動するが、触覚デバイスとの距離が数百 mm 離れているので、モータが動作している状態でも注意していない限り気にならない程度の変動である。ただし、センサの絶対誤差はスクリーン中心付近は数 mm 程度であるが、スクリーンの中心から約 400mm 左右にずれると急激に大きくなり最大で 30mm 以上あった。仮想物体を提示すると、スクリー

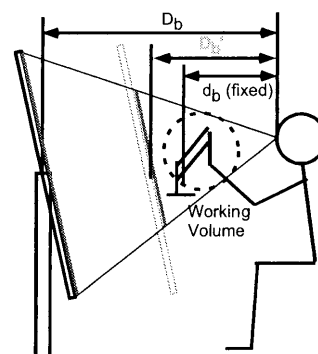


図 5 背面投射型 HapticWorkBench の配置

Fig.5 Usage of HapticWorkBench in back projection

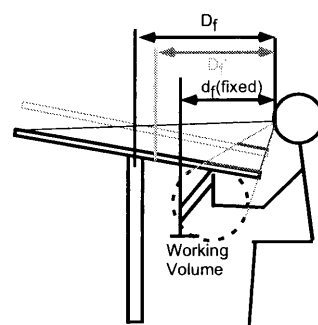


図 6 前面投射型 HapticWorkBench の配置

Fig.6 usage of HapticWorkBench in front projection

ン中央部では気にならないが、スクリーンの端のほうで誤差が増えるので頭を動かすと物体が必要以上にずれて投影され、その場に物体が静止しているようには見えなくなる。これは計測誤差が大きくなると表示誤差も大きくなるという計算結果とも一致する。これほど大きく頭を動かすことはほとんどないので実用上は問題ないが、可動範囲の大きい触覚デバイスを用いる場合は補正テーブルを用意して誤差の修正を厳密に行う必要がある。

### 5.4 配置の決定

HapticWorkBench を用いて前面、背面投射を切り替えて用いる場合には、それぞれの方式の特徴を踏まえて、スクリーンと触覚デバイス、ユーザの位置関係を定める必要がある。人間と触覚デバイスの距離 (図 5 の  $d_b$  や図 6 の  $d_f$ ) は、腕の長さの制限から無理なく使える距離ということになりほとんど変更できない。本システムでは  $d_b = d_f = 300\text{mm}$  程度として使用している。スクリーンを有効に利用する為に HapticWorkBench では次のような方策にしたがって配置を決定した。

<背面投射の場合>

背面投射の場合は、図 5 に示すように、スクリーンから離れれば離れるほど ( $D_b$  を大きくすればする

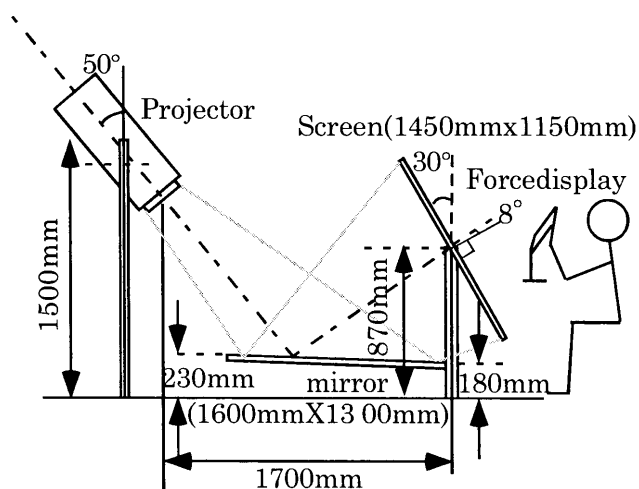


図7 背面投射型ディスプレイとして使用する場合の配置

Fig.7 Configuration of back projection

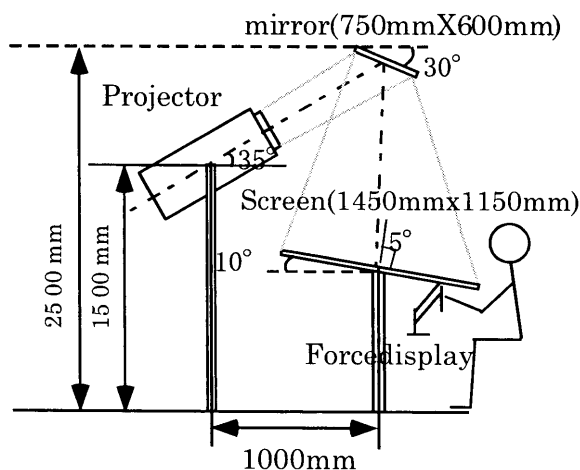


図8 前面投射型ディスプレイとして使用する場合の配置

Fig.8 Configuration of front projection

ほど), スクリーンの有効利用範囲を大きく出来る。しかし, あまり  $D_b$  を大きくするとスクリーンそのものの視野角が小さくなるので上限は, 触覚デバイスの可動範囲が視野を占める率とスクリーンが視野を占める割合がちょうど重なるころといえる。たとえば PHANTOM であれば, 可動範囲がおよそ 300mm の球とすると空間の制約がなければ  $D_b=1200\text{mm}$  程度が HapticWorkBench において触覚ディスプレイの可動範囲がユーザの視野を占める割合と映像が視野を占める割合が等しくなる距離ということになる。反対に小さくすると  $D_b'$  のように有効利用範囲は小さくなるが, スクリーンが人間の視野を占める割合が増えるので没入感が高くなる。しかし近づけすぎても見づらい。

また, 使用可能な空間の大きさ (部屋の大きさ) にも依存する。本研究では, 部屋の大きさの制約から,

$D_b$  は 600mm 程度として使用している。

CyberTouch や VibroGlove などの装着型の触覚デバイスを使用する場合は, 支持台を使う必要がないので, スクリーンの角度も垂直に近い角度 ( $30^\circ$ ) から水平に近い角度 ( $70^\circ$  程度) まで使用可能である。水平に近い角度の構成は手術シミュレータなどに応用できる。

#### <前面投射の場合>

前面投射の場合は, 触覚デバイスとユーザの間にスクリーンが入るがスクリーンの端に腕があたるので, 画面全体を有効に使用する事は出来ない。また, スクリーンに傾斜をつけるとその分, 腕を下に下げなくてはならず無理な姿勢を取らなくてはならなくなる。ユーザと触覚デバイスの距離は一定としているので, スクリーンがユーザの目に近い (図6の  $D_f'$ ) より, スクリーンと触覚デバイスの距離に近い ( $D_f$ ) ほうが画面の有効利用につながる。そこで, HapticWorkBench では図6に示すように, スクリーンを水平に近い角度にし, スクリーンを触覚デバイスと当たらないギリギリの高さまで下げて, 画面の有効利用を計っている。あるいは, 高解像度映像が必要な場合, プロジェクタを調整し, 没入感が薄れるが投影範囲を手元に集中させる方法も考えられる。HapticWorkBench では,  $D_f$  は 500mm 程度として使用している。

なお, 今回の配置では光軸とスクリーン面の法線は背面投射が約  $8^\circ$ , 前面投射が約  $5^\circ$  傾いている。プロジェクタの仕様として光軸がスクリーン面から  $\pm 12^\circ$  傾いても図形の歪みを補正できるので, 本配置は補正の範囲内であり傾きが原因で誤差は生じない。

#### 5.5 プロジェクタの調整およびキャリブレーション

触覚デバイスとともに用いる場合, 視覚映像と触覚情報の提示位置が一致することは重要である。そのため HapticWorkBench では, スクリーン上に正確に映像が投影されるようにプロジェクタの調整をおこなった。

##### (1) スクリーン上の映像のゆがみ補正

光学系の歪み等によりスクリーン上での映像には歪みが生じているので, まずはじめに歪みの補正を行う。具体的にはスクリーン上にプロジェクタの調整用グリッドを表示し, グリッドの中心をスクリーンの中心になるよう調節する。次にスクリーンと同じ大きさの方眼用紙をスクリーン上にのせ, プロジェクタの画幅調整 (アライメント) 用格子を表示し, 格子の間隔が等間隔になるように格子点位置を調整する。ただし 3 管式プロジェクタの為, RGB のグリッドが画面の端のほうで正確に重ならないことがある。このときは端についてはなるべく近くなるよう調整する。このようにして映像に歪みが生じないようにする。

## ：多種触覚デバイスに対応した HapticWorkBench の開発

## (2) 実空間と仮想空間のスケールあわせ

次に実空間と仮想空間のスケールをあわせる。このとき視体積を求めるために画面の大きさが必要となる。しかしながら、構成によってはスクリーンより画面が大きくなることもあり、また RGB のグリットも画面端で正確に重ならないこともあるので画面の大きさそのものを計るのは困難である。しかしながらスクリーン面上にある仮想物体の映像は、視線方向がスクリーン面を向いていれば視点がどこにあらうともスクリーン面上に固定され、なおかつ物体の大きさも変化しないという性質を持つ。そこで実空間と仮想空間のスケールを合わせるための係数を、スクリーン面上に配置した仮想物体の映像の大きさを実測することで視体積を求めるための係数を求める。具体的には仮想空間で定義したスクリーンの任意の位置に一辺 100mm の正方形を表示し、スクリーン上でその大きさが表示したい大きさになるように、プログラム上でスクリーンの大きさの係数を調節する。この手法は磁気センサーの計測誤差の影響を受けないという利点もある。

## 6. 視覚と触覚のずれ認識の閾値測定実験

HapticWorkBench の性能を評価するために、センサ誤差による視覚と触覚の提示位置のずれがどの程度あると認識されるのかを求める実験を行った。触覚デバイスには PHANToM を用いた。実験で提示したのは、1 辺 150mm の立方体である。実験は、(1) まず実際に仮想物体を触りながら被験者に視覚と触覚の位置が合うように触覚デバイスの支持台を動かしてもらい、台の位置を測定する。(2) そこから右側と左側それぞれにデバイスの支持台を動かしてもらい、視覚と触覚の不一致がわかるようになった時の台の位置を測定した。また、実際にどこを触っているのかを表すため、PHANToM のペン先の位置を表す仮想ポイントを直径 30mm の球で表現しそれがあ場合と無い場合とでの比較も行った。なお、実験では立方体の側面およびエッジを被験者に自由に触ってもらい、反力の提示位置と映像の提示位置がずれていることが認識できた位置を閾値として測定した。前面投射と背面投射、それぞれ仮想ポイントを表示したものとしないものの 4 パターンについて、被験者 5 人に対し、左右シフトを 3 回ずつ計 6 回測定した。実験の様子を図 9 に示す。

実験の結果を図 10 に示す。f-p は前面投射でポイントあり、f-np は前面投射でポイント無し、b-p は背面投射でポイントあり、b-np は背面投射でポイント無しをあらわす。ポイントありの場合、背面投射で誤差の認識の閾値は平均で 16mm 程度であった。前面投射では 48mm であった。両者は最小有意差法によ

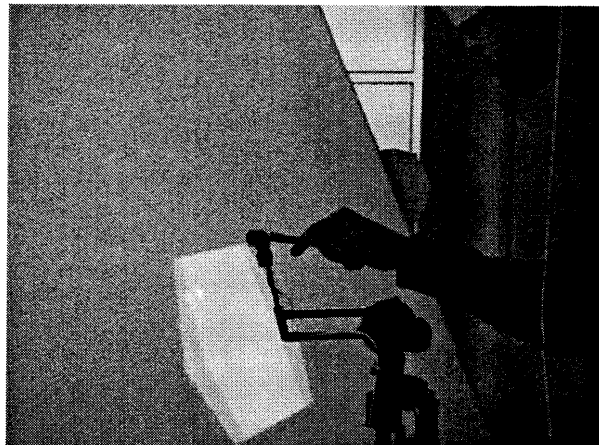


図 9 視覚と触覚のずれの許容限界測定実験の様子

Fig. 9 overview of limitation measuring experiment

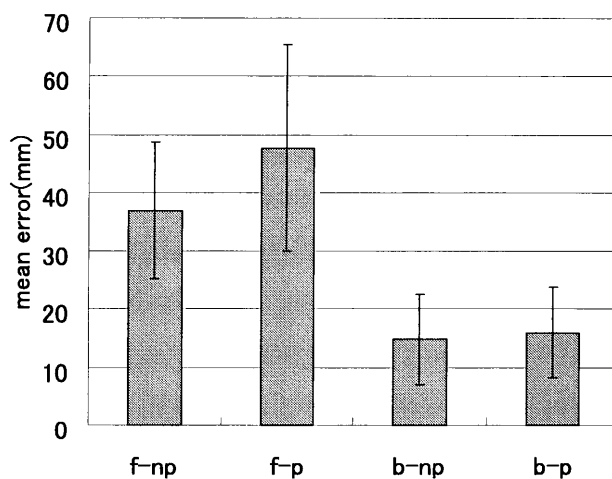


図 10 視覚と触覚のずれの許容限界測定実験の結果

Fig. 10 result of limitation measuring experiment

る平均の検定を行ったところ前面と背面とでは 1% の危険率で有意であった。前面投射の方が大きくなった理由としては、自分の手が直接見えないため誤差が大きくてもそのずれを認識しにくいことが考えられる。HapticWorkBench の映像提示位置精度は図 4 を考慮すると 16mm より小さい値であるため、本システムは十分使用可能であると結論づけられる。

図 4 によると前面投射の方がセンサーの誤差がより映像のずれに影響を与えるが、本実験結果からは人間が認識できるずれの閾値に関しては前面投射の方が高い。したがって前面投射で用いることが可能な触覚デバイスであれば、センサーの精度を 16mm 以下に下げられない場合には、前面投射で使用することで誤差の影響を低減できるといえる。

仮想のポイントを提示しない場合は背面投射で

15mm, 前面投射で 37mm で, さらに厳密な計測が必要となる. 背面投射ではポイントの有無による有意差は見られないが, 前面投射の場合顕著に値が小さくなっており, ポイントによる視覚キューが自分の手先位置の認識に大きな影響を与えていることがわかる.

左右にシフトさせた場合の閾値の大きさには各投射方法ごとに有意差は見られなかった. これは館らの物体の回転に関する視覚と触覚のずれ認識の実験結果が左右対称になっていた傾向 [19] とも物体の回転と並進とではモードが違うが符合している.

また, 実験時の被験者の感想からポイントを提示しない場合は, 仮想物体のどのあたりを触っているのか被験者が明確にわからないことが多かった. この理由としては触覚デバイスによって映像が隠れること, 触覚デバイスの影が仮想物体に映らないことなどが考えられる.

## 7. まとめ

本研究では, CRT 型プロジェクタを用いて背面, 前面投射を自由に切り替えることで, さまざまな触覚デバイスに対応した没入型ディスプレイ HapticWorkBench の開発を行った. また, 触覚デバイスと同時に用いるために, 本システムでは特に視覚と触覚の提示位置が一致することが重要である. そこで本研究では視覚位置の計測誤差が視覚と触覚のずれにおよぼす影響について検討を行った. 今後の課題としては, 位置センサのトラッキング精度を向上させ, 操作性を改善していくことが挙げられる.

## 付録

位置センサの誤差による見えの誤差の計算方法を示す. 図 3 より実際の両目の中点を  $(x_e, y_e)$ , 眼間距離を  $d_e$ , 物体の座標が  $(0, d)$  にあるとする. 物体の方を向いているとすると, 片目の変位  $(e_x, e_y)$  は  $e_x = d_e \cos \theta, e_y = d_e \sin \theta, \theta = \arctan(\frac{-x_e}{-y_e + d})$  で右目, 左目の座標はそれぞれ  $(x_e + e_x, y_e + e_y), (x_e - e_x, y_e - e_y)$  となる.

ノイズにより両目の中点が  $(dx, dy)$  変位したとすると, 右目, 左目の座標はそれぞれ  $(x_e + e_x + dx, y_e + e_y + dy), (x_e - e_x + dx, y_e - e_y + dy)$  となる. (ここでは角度の誤差は小さいものとして無視した.)

ノイズが含まれた目の位置からみたスクリーン上の物体の像 (誤差を含んだ像) は, 物体と目を通る直線と x 軸との交点なので  $(D_{rx}, 0), (D_{lx}, 0)$  となる. なお,  $D_{rx} = \frac{(x_e + e_x + dx)}{d - (y_e + e_y + dy)} d, D_{lx} = \frac{(x_e - e_x - dx)}{d - (y_e - e_y + dy)} d$  である.

実際の目の位置と誤差を含んだ像を通る直線の方程式は, 右目が  $y = a_r(x - b_r)$ , 左目が  $y = a_l(x - b_l)$ , なお,  $a_r = \frac{-(y_e + e_y)}{D_{rx} - (x_e + e_x)}, b_r = D_{rx}, a_l =$

$\frac{-(y_e - e_y)}{D_{lx} - (x_e - e_x)}, b_l = D_{lx}$  である. この 2 直線の交点を求めると  $(\frac{a_r b_r - a_l b_l}{a_r - a_l}, \frac{a_r a_l (b_r - b_l)}{a_r - a_l})$  となる. 求める誤差はこの交点と  $(0, d)$  との距離となる.

## 参考文献

- [1] Thomas H.Massie: "Virtual Touch Through point Interaction" ICAT'96 pp19-38 (1996)
- [2] 浅野, 矢野, 岩田: "フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発", 日本バーチャルリアリティ学会第一回大会論文集, pp95-98 (1996)
- [3] Burdea, et al: "Computerized Hand Diagnostic Rehabilitation System Using a Force Feedback Glove", Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality V, San Diego, CA., January, (1997).
- [4] C.Cruz-Neira, D.J.Sandin, T. A. DeFanti, : "Surround - Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", Computer Graphics, pp.135 - 142, (1993)
- [5] DeFanti et al: "High-resolution and High-bandwidth Immersive Interactivity", SPIE Proceedings of Very High resolution and Quality Imaging Conference, Vol.2663, pp.28(1996)
- [6] Bullinger, Riedel, Breining: "Immersive Projection Technology - Benefits for the Industry", 1. International IPT Workshop, pp.13-25 (1997)
- [7] 岩田: "シームレス全周球面ディスプレイ", 第 3 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.155-158(1998)
- [8] 廣瀬, 小木, 矢野, 算, 中垣: "ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発", 第 3 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.1-4(1998)
- [9] Lawrence et al.: "Two-Handed Direct manipulation on the Responsive Workbench", Computer Graphics: Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.107-114(1997)
- [10] <http://www.fakespace.com/products/immersive.html>
- [11] <http://www.iti-visionmaker.com>
- [12] Grant, Helser: "Adding Force Display to a Stereoscopic Head-Tracked Projection Display", Proceedings of VRAIS'98 pp.81-88(1998)
- [13] 広田, 橋本, 廣瀬: "力覚ディスプレイの CAD/CAE への応用", 第 7 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム 論文集 和文編 pp.95-98 (1991)
- [14] 矢野, 廣瀬, 小木, 田村: "振動子型触覚デバイスを用いた流れ場表現", 情報処理学会 Interaction-98 論文集 pp.61-66 (1998)
- [15] 広田, 廣瀬: "面提示型触覚ディスプレイのための面表現デバイス", 第 10 回ヒューマンインタフェースシンポジウム pp.193-196(1994)
- [16] 廣瀬, 小木, 矢野, 算: "異種デバイス間の触覚協調作業の実現", Human Interface News and Report Vol.13 No.2 pp.121-126(1998)
- [17] 廣瀬, 小木, 石綿, 山田: "没入型多面ディスプレイ (CABIN) の開発", 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会論文集 pp.137-140 (1997)
- [18] 横小路, ホリス, 金出: "仮想環境への視覚/力覚インタフェース: WYSIWYF ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文集 第 2 巻第 4 号 pp.17-26(1997)
- [19] 館, 前田: "感覚統合と認知に関する研究", 文部省重点領域研究 人工現実感に関する基礎的研究 平成 9 年度研究成果報告書, pp.9-10(1998)

(1999 年 6 月 25 日受付)