

2007年度 卒業論文

# 3D Visuo-Haptic VR環境の構築

2008年2月19日

大阪大学 基礎工学部  
システム科学科 生物工学コース  
芦田 洋敏

主査: \_\_\_\_\_ 日付: \_\_\_\_\_

副査: \_\_\_\_\_ 日付: \_\_\_\_\_

# 概要

情報処理技術の発達により、コンピュータを用いて人工的に視覚、触覚などの感覚を提供する VR 技術の研究が盛んである。従来から利用されている VR 環境は、視覚・力覚の提示空間が別々の場所に存在している。力覚提示される仮想物体は触ることができても、実際に目で”その場”に見ることはできない。本研究の目的は、裸眼型の立体視覚ディスプレイを用いて、視覚と力覚を一致させ、より直感的でリアリティの高い 3D Visuo-Haptic VR 環境の構築を行うことである。

力覚ディスプレイ PHANToM と、パララックスバリア方式の裸眼型立体視覚ディスプレイを使用してシステムを構築した。まず、立体視覚ディスプレイの画面中心を原点とし、コンピュータ内で立体物を描画し、両眼視差画像として表示した。現実の立体視空間での再生位置を幾何学上の計算から求めた。また PHANToM のペン先の位置 (力覚提示位置) を導出した。さらに、立体視覚ディスプレイ上に対応点を指定し、PHANToM でその対応点の位置座標を計測し、二つのディスプレイの座標系を統合した。

両眼視差画像を利用した立体視においては、書割効果をはじめ、さまざまな知覚的要因から歪みが生じ、表示位置からのずれを伴うことがある。本研究では、各ユーザーに対して立体オブジェクトを提示し、あらかじめ知覚歪み度を計測した。計測した歪み度に基づいて立体像の知覚位置を推定した。知覚歪み度を用いて力覚の提示空間を補正することで、表示した 3 次元仮想物体の推定知覚位置に PHANToM のペン先が接触判定された際、力覚を提示した。

主観評価を行った結果、視覚・力覚空間が分離した VR 環境よりも視覚・力覚空間を統合した Visuo-Haptic 環境の方が直観的に仮想物体の特徴が理解しやすいというコメントが得られた。

# Abstract

Information processing technology accelerates the study of Virtual Reality that artificially produces visual and haptic senses. Typical virtual environment so far has visual and haptic spaces in a separate place. A touched object is not visually placed at the position where a user feels force sensation. The aim of this study is to match the visual and haptic spaces by using binocular stereoscopic vision display of naked-eye type, and to construct 3D Visuo-Haptic VR environment that enables more intuitive and realistic interaction

The system equipped haptic display PHANToM and the naked-eye type binocular stereoscopic vision display of parallax barrier method. The system drew 3D objects with center position of a screen as coordinates origin and produced binocular parallax images. Replayed positions in the binocular vision space were calculated from the geometry. A tip of tool (position in which haptic sensation is presented) was calculated. The corresponding point was specified for the binocular stereoscopic vision display. Positions of the corresponding point were measured with PHANToM, and coordinate systems of visual and haptic displays calibrated.

However, in the binocular vision using the binocular parallax image, the distortion might be caused from various, perceptual factors including the cardboard effect, and perceived positions might shift. In this study, a 3D object was presented to each user, and perceptual distortion was measured. The position where a 3D image was perceived was presumed based on each measured distortion. When collision between haptic cursor and the object was detected, the system enabled force display at the position where virtual 3D object is visually displayed by binocular images.

This study constructed 3D Visuo-Haptic VR environment. A result of subjective evaluation showed that the constructed environment has higher reality and more intuitiveness than the foregoing VR environment with visual and haptic spaces separated.

# 目次

第 1 章 序論	0
第 2 章 力覚ディスプレイ	3
2.1 道具媒介型力覚ディスプレイ	3
2.2 装着型力覚ディスプレイ	4
2.3 対象指向型力覚ディスプレイ	5
第 3 章 立体視覚ディスプレイ	6
3.1 両眼視差による立体知覚	6
3.2 メガネ型立体視覚ディスプレイ	7
3.3 裸眼型立体視覚ディスプレイ	9
3.4 3D Visuo-Haptic VR 環境の研究事例	11
第 4 章 システムの設計	12
4.1 システムの概要	12
4.2 立体像の表示	13
4.3 力覚ポイントの導出	20
4.4 視覚・力覚ディスプレイのキャリブレーション	22
4.5 立体像の知覚歪みの補正	23
第 5 章 システムの実装と評価	24
5.1 実験環境	24
5.2 視覚・力覚ディスプレイのキャリブレーション結果	26
5.3 立体像の知覚歪み度の計測	27
5.4 知覚歪み補正によるシステムの実装と評価	29
5.5 3D Visuo-Haptic VR 環境の評価	30
第 6 章 結論	31
謝辞	32



# 第1章 序論

人間には視覚、触覚など多様な感覚機能が備わっている。昨今の情報処理技術の発達により、視覚、触覚などの感覚器官に対して、コンピュータで生成された情報を直感的に提示できるようにするバーチャルリアリティ(VR)技術の研究が盛んに行われている。VRとは「人工的な現実感」を意味し、現実には存在しないにも関わらず、実際にそこに物体が存在するかのような感覚を、コンピュータを用いて表現する技術を指す [1]。

現在、VRの研究において立体視覚ディスプレイの研究・開発が活発である。立体視覚ディスプレイは、実物体を見ているのと同様に奥行感があり、近くにある物体はディスプレイの手前に見えたり、遠くにある物体はディスプレイの奥に存在するように見える。医療分野では、例えば内視鏡カメラで撮影した血管画像は、血管が複雑に入り組んでおり隠れた部分も多く、2次元画像で細部の奥行きを推定し、処置するのは困難である。立体表示することにより、現実に近い環境を提供することができる。

一方、VR技術の中では、力覚を提示する技術の研究も注目を集めている [2]。力覚とは広い意味で触覚に含まれ、物体からの抗力や重力を感じる感覚を指す [3]。例えば手で物に触れた場合、鉄のような押し返す力が強いときは「硬い」と感じ、スポンジのような押し返す力が弱いときは「軟らかい」と感じる感覚である。現在のVR技術は、例えば図 1.1 のように、コンピュータ上に表現された仮想物体に触れた際、力覚を提示することができる。モニターの画面を見ながら、力覚ディスプレイという装置を操作する。力覚ディスプレイが仮想空間上でのポインタの位置を調べ、仮想物体に触れた際、ユーザーは力覚ディスプレイを介して力覚を認識することができる。

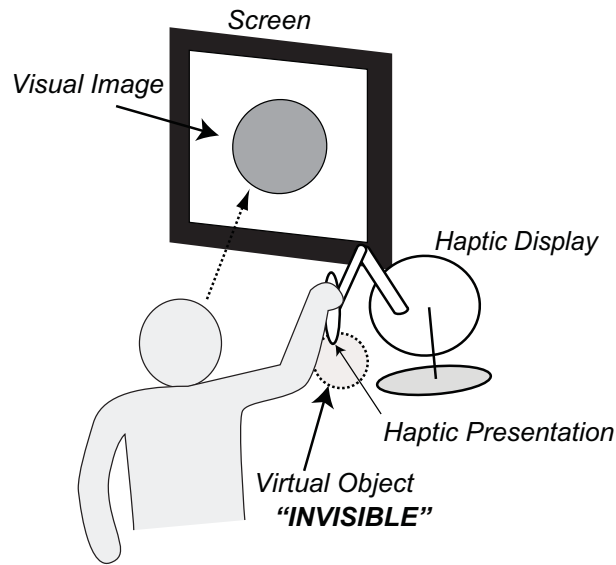


図 1.1: 力覚提示システム

この力覚の提示に関する VR 技術は、例えば医療の世界において、外科手術のシミュレーションへの利用に期待されている [4]。手術器具の先に力覚ディスプレイをつけて操作し、実際の手術時と同じような触感を与えることができる。触感は医療の世界において、視覚情報に次いで重要とされている情報であり、視覚情報のみでは理解し難い組織の性質や状態を直感的に理解する手助けとなっている。また医療分野以外では、製造業の設計現場でも力覚ディスプレイは活用され始めている。製造業者の多くは、3次元 CAD と呼ばれる立体図面を描くソフトを使っているが、この CAD のデータと力覚ディスプレイを組み合わせた設計支援ツールが増えている。CAD で設計した部品は、部品同士のサイズが合っていない、非常に組み立てにくい場合がある。試作品を作る前に、あらかじめ力覚ディスプレイを使って仮想の組み立てを行えば、そのような失敗を減らすことが可能である。

しかし従来から使用されている力覚提示システムでは、力覚と視覚の提示空間が異なっている。力覚の提示空間は手もとの操作領域であり、視覚の提示空間はモニター画面である。力覚ディスプレイで手もとの仮想物体に触れているが、仮想物体の形や大きさ、触れている位置は、モニター画面を通じて理解される。力覚提示される 3次元仮想物体は触れることはできても、実際に目で”その場”に見ることはできない。力覚ディスプレイの操作に不慣れなユーザーにとっては、視覚と力覚の提示空間が異なっているシステムでは、位置関係が直観的に理解しづらく、操作の慣れに時間を要する [5]。

本研究では、立体視覚ディスプレイを用いて、視覚と力覚の提示空間が一致した、3D Visuo-Haptic VR 環境の構築を行う。Visuo-Haptic とは、図 1.2 に示すように、視覚と力覚が統合された環境を指す [6],[7],[8]。力覚提示された仮想物体に触れることができ、立体視覚ディスプレイを用いて、触れた仮想物体を目で”その場”に見ることができる。本研究では、特殊なメガネの装用を避け、裸眼型の立体視覚ディスプレイを用いて、VR 環境の構築を行う。現在、立体視覚ディスプレイで最も広く使われるものは、特殊な立体視用メガネを装着する方式である。しかし、メガネの装着には煩わしさを伴ってしまう。特殊なメガネを装着せずに、裸眼型ディスプレイを使用して立体像を観察できるのは、より自然に近い環境であり、大きな魅力である。提示された 3 次元立体像に触れることが可能であれば、よりリアリティの高い環境を実現できる。本研究では、二つのディスプレイの座標系を統合し、あらかじめ各ユーザーの知覚歪み度を調べて、3D Visuo-Haptic VR 環境の構築を行う。

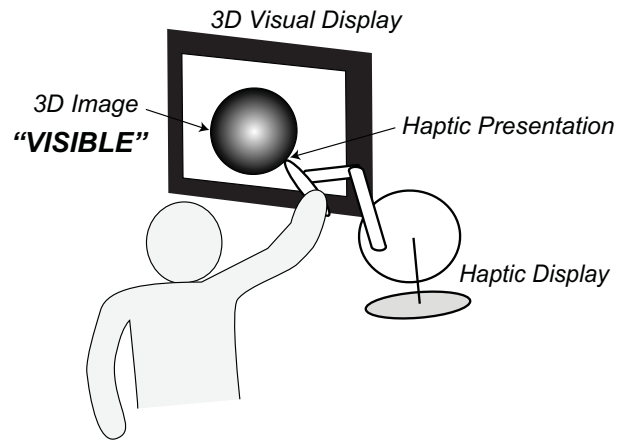


図 1.2: Visuo-Haptic 環境



## 第2章 力覚ディスプレイ

触覚や力覚などの触覚を提示できる装置として力覚ディスプレイが存在する [9],[10]。基本的な仕組みとしては、まず力覚の出力点の位置や回転情報をセンサで読み取る。計測されたパラメータをインターフェースを経由してコンピュータに送り、計算された結果のカベクトルを装置に返す。力覚をモータが出力することでユーザーの手の先に感覚が返る、という処理を高い周期で繰り返す。一般的に、人に自然な触覚を与えるには、最低でも1秒間に1000サイクル(1kHz)が必要である [11]。力覚フィードバックを行うための力覚ディスプレイの実現方法は主に、道具媒介型、装着型、対象指向型がある。本章では、それぞれの方式について、簡単に説明する。

### 2.1 道具媒介型力覚ディスプレイ

道具媒介型とはペンやボール等の把持部を媒介にして力覚提示を行う方式である

道具媒介型の代表はSensAble社のPHANToM Omni(以下PHANToM)である [12]。PHANToMはMITのTouch Labで開発されたものであり、作業空間の中で指先に3軸の力のベクトルを与えることができる。図2.1(a)にPHANToMの概観を示す。PHANToMはデスクトップ設置型で、アームを成す二つのリンク機構から構成され、ユーザーはアームの先についたペンを手に持って操作する。ユーザーはペンの先端部分を介して力覚を認識することができる。力覚提示位置は1点、入力自由度は空間座標及び回転の6、出力自由度は3ないし6である。出力自由度が6の場合、回転軸まわりの力のモーメントであるトルクの情報も得られる。

また道具媒介型には、PHANToMの他にSPIDAR(図2.1(b))がある。指サックをワイヤーで牽引することにより、力覚を提示し、指先位置を検出するデバイスである。この方式は手に接する部分が極めて軽量にできるメリットの反面、糸は推力を発生させることができないため、装置全体の大きさに対して力を提示できる領域が小さいこと、複数の作用点を設けると糸が相互に干渉してしまうことが問題になる。

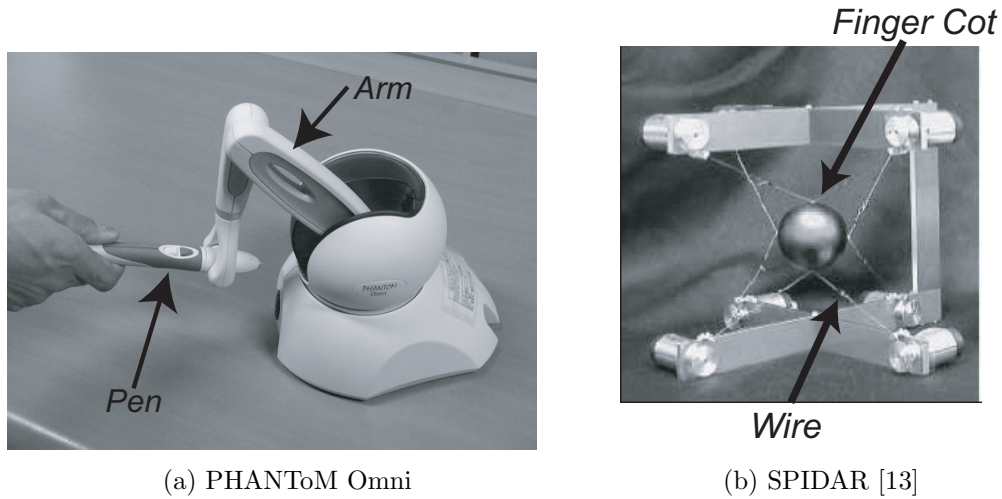


図 2.1: 道具媒介型力覚ディスプレイ

## 2.2 装着型力覚ディスプレイ

操作者が装置を直接装着して、力覚を提示する方式のものを指す。代表的なものが図 2.2 に示した Immersion 社の CyberGrasp である [14]。手にグローブをはめるように装着し、ワイヤ駆動により力覚を提示する。力覚の提示は各指の 5 点で、指の姿勢は指関節に設置された曲げセンサにより検出する。手と指に装置を装着するため、使用環境という点では道具媒介型に比べて多点に力覚を提示でき、自由度が高いといえる。しかし、人間の手に力伝達機構を装着するため重量感を感じ、装着が大掛かりで煩雑であるという欠点がある。



図 2.2: 装着型 (CyberGrasp) [14]

## 2.3 対象指向型力覚ディスプレイ

対象指向型とはインタフェースデバイス自体が変形、移動することで仮想物体の形状を模擬するものである。対象指向型の例としては、図 2.3 に示す FEELEX がある。スクリーン下部にある力センサつきアクチュエータによりユーザーに触覚を提示している。このアクチュエータの上下運動により、スクリーンを自由な形状と硬さに変化させることができ、ユーザーはスクリーンに投影された映像上の仮想物体に手のひら全体で触れて形状を感じることができる。対象指向型デバイスは手に何も付けなくとも仮想物体の力覚を提示できる反面、任意の形状を即座に生成することが技術的に困難である。

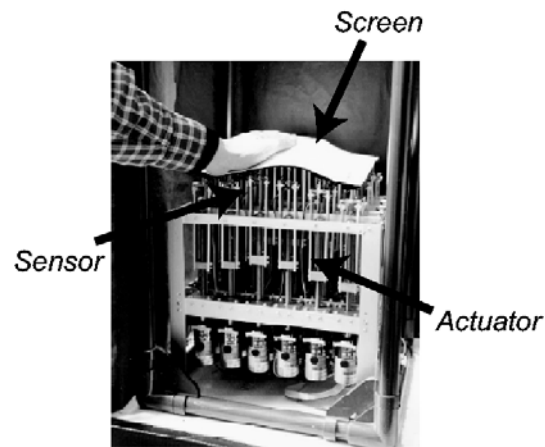


図 2.3: 対象指向型 (FEELEX)[15]

以上、道具媒介型、装着型、対象指向型の代表的な力覚ディスプレイについて概説した。本研究では道具媒介型力覚ディスプレイである PHANToM を用いる。PHANToM は力覚提示位置が 1 点であることから、他形式に比べてコンピュータによる力覚の計算処理速度が速く、容易に力覚を再現することができる。また力覚の提示環境において拘束条件が少なく、様々なアプリケーションへの応用が可能であることから PHANToM を使用する。

## 第3章 立体視覚ディスプレイ

ものを立体的に知覚するために人間はさまざまな手掛かりを利用している [16]。眼の焦点調節、運動視差など単眼情報のみも手掛かりになるが、両眼視差や輻輳などの両眼情報が奥行感を得る重要な手掛かりとなっている。このような両眼からの情報を巧みに利用して、画像に奥行感を与えようとする立体視覚ディスプレイがある。立体視覚ディスプレイは、これまでに数多くの方式が提案され、メガネ型と裸眼型の2種類に大別できる [17]。本章では、3.1節で立体視の要因である両眼視差の簡単な説明を行い、3.2、3.3節で両眼視差を利用した立体視覚ディスプレイを紹介する。3.4節では立体視覚ディスプレイを用いた3D Visuo-Haptic VR環境の研究事例を述べる。

### 3.1 両眼視差による立体知覚

人間の右眼と左眼は約 65mm 離れた位置にあり、図 3.1 に示すように、一つのものを見た場合でもそれぞれ異なった角度から見ていることになる。このため物体を観察する際、左右の眼の網膜には同一の像が結像するのではなく、異なった像が結像する。これらの像の差異を両眼視差という。人間は右眼と左眼の網膜に写った像の違いを脳内で処理して奥行を知覚すると考えられる。しかし、この像の違いは物体が遠方にある場合にはほとんど差異が生じないため、両眼視差は近距離において奥行知覚の最も重要な手掛かりとなる [18]。

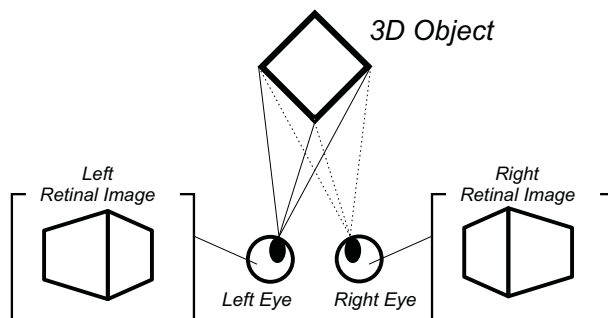


図 3.1: 両眼視差

## 3.2 メガネ型立体視覚ディスプレイ

両眼視差を利用したメガネ型の立体視覚ディスプレイには、アナグリフ方式、偏光フィルタ方式、時分割方式、ヘッドマウント方式などがある。

### 3.2.1 アナグリフ方式

アナグリフ方式は、主に赤緑色のレンズのメガネを装着して観賞する方式である。片方の眼に赤色のレンズを、他方の眼に緑色のレンズの入ったものをかけて、各々の眼には片方の画像しか提示されないようにしている。両眼視差のついた2枚の画像を提示することによって、立体視を可能としている。アナグリフ方式は立体ディスプレイとしては歴史上最も古いものであり、メガネが安価なことから、今日でも様々なところで使用されている。しかし、色フィルタを使用することから色の再現性に欠けるという欠点がある。

### 3.2.2 偏光フィルタ方式

偏光フィルタ方式は、偏光フィルタの遮光効果を利用した立体ディスプレイである。左右の眼の画像を、互いに直交した2枚の偏光フィルタを通して表示する。それらに対応するフィルタの付加されたメガネを用いて観察することで、左右の眼に分割して提示する。偏光フィルタ方式では色情報が失われることはない。その反面、直線偏光フィルタを使用する場合は、首を傾けると偏光性が崩れ、クロストーク（片方の眼の画像が、他方の眼にも残る効果）が生じ、立体視できなくなる。また円偏光の場合であっても、投影装置が2台ないしは特殊な画像を分離する装置を必要としたり、フィルタを二重に通過するため透過光量が低下する。

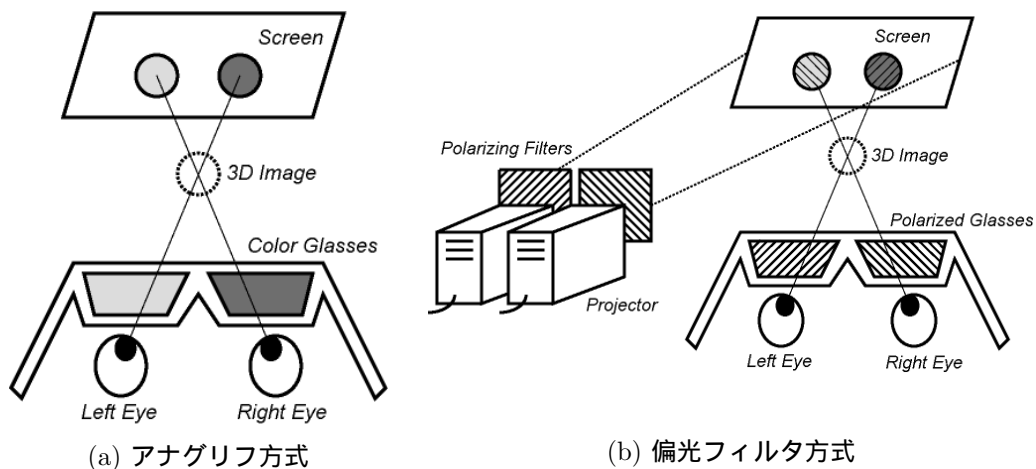


図 3.2: メガネ型立体視覚ディスプレイ (1)

### 3.2.3 時分割方式

時分割方式とは、左右の画像を時間で分割して表示する方式であり、液晶シャッターメガネを用いる。左右の画像を時間的に切替えて投影し、それと同期して左右の眼前の高速シャッターを切替えて開閉することで、立体視が可能となる。ステレオシャッター眼鏡の問題としては、高速でシャッターが開閉するために、映像がちらついて見えるフリッカ現象が起こる。15分～20分程度の使用で過度に眼が疲労する。

### 3.2.4 ヘッドマウント方式

一般的にHMD(ヘッドマウントディスプレイ)と呼ばれる装置を装着して観察する方式である。図3.3(b)のようにゴーグルやヘルメットに小型のCRT,または液晶ディスプレイが配置されており、両眼前に配置された小型ディスプレイの画面を光学系によって拡大することで、前方数メートル先に大画面スクリーンがあるかのような視覚効果(虚像)を創り出すことができる[19]。HMDはビデオシースルー型と光学シースルー型に分けられる。ビデオシースルー型はビデオカメラによる撮影画像と、3次元CGによる画像が重ねて表示される。一方、光学シースルー型では、ハーフミラーを通じて見える外の様子に、3次元CG画像が重ねて表示される。しかしHMDは操作中、頭部に常時装着しなければならないため装着感があり、他のメガネ型に比べても重量感があり煩わしさが残る。またHMDの使用の際は、身体は静止しているのに、映像が傾くことから、視覚系の情報と前庭系(体のバランスを司る器官)の情報が一致せず、不快感がある。自然視とは大きく異なる視覚状態が形成されるため、眼に対する疲労や負担等の生理的・心理的影響は大きい。

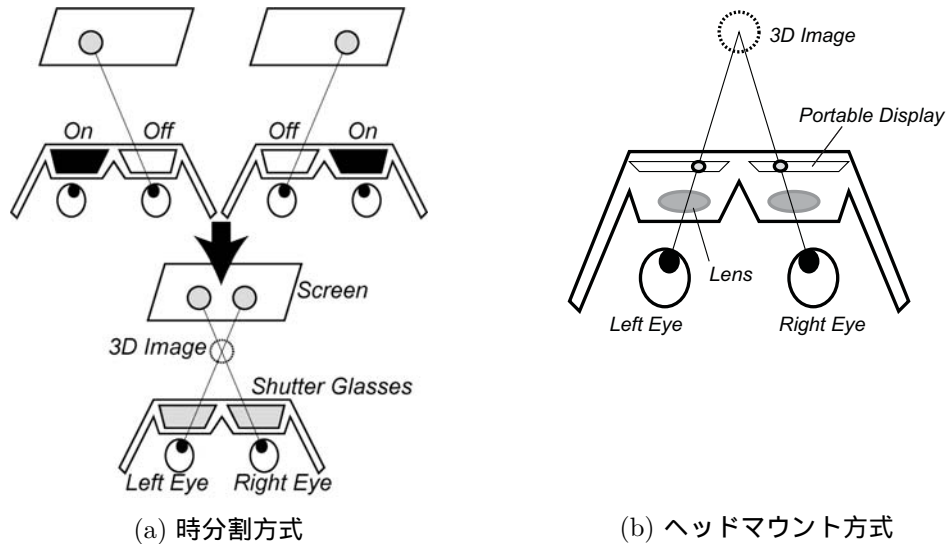


図 3.3: メガネ型立体視覚ディスプレイ (2)

### 3.3 裸眼型立体視覚ディスプレイ

裸眼型の立体視覚ディスプレイは観察時に特殊なメガネを必要としない方式である。パララックスバリア方式やレンチキュラ方式などがある。

#### 3.3.1 パララックスバリア方式

パララックスバリア方式は、1903年に Ives により提案された。「パララックスバリア」とは視差を生じるための障壁を意味する。ディスプレイのバックライトの前方にバリアが配置され、通常は垂直方向に細かいスリットをつくる(図 3.4)。左右の映像を鉛直方向に切り取って交互に配置し、特定の距離から観察することで、バリアは左右の映像を分割する障壁として働く [20]。つまり、バリアは右眼にとっては左の画像を、左眼にとっては右の画像をそれぞれ遮蔽する障壁として働き、左右の眼に分割して画像を表示することが可能となる。携帯電話の液晶ディスプレイや広告などで一部利用され始めている。パララックスバリア方式の欠点は、バリアで光が遮られるので像が暗くなることと、バリア自体が目障りと感じやすいことである。また適視位置が限定されることも課題である。

しかし、こうした従来からの課題は解消されつつある。ディスプレイのバックライトに明るい光源を用いることにより、画像が暗くなる問題は改善されている。またバリアが目障りな点も、ピクセル単位からサブピクセル単位(ピクセルの3分の1サイズ)へとバリアの幅を狭めることにより改善されている。さらに2視点から、多視点表示にすることで適視範囲が拡大し、他人数が並んで同時に立体像を観察できる。

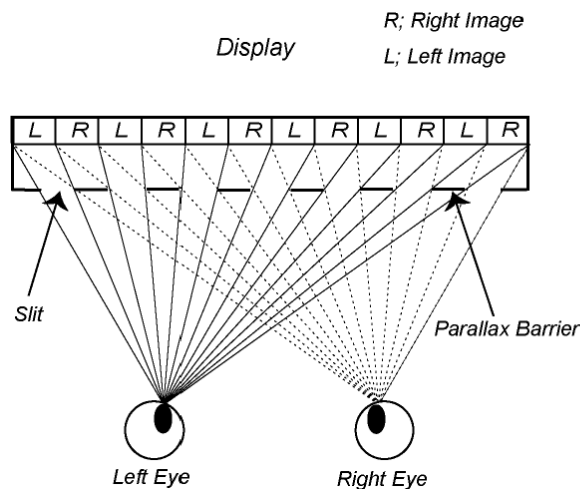


図 3.4: パララックスバリア方式

### 3.3.2 レンチキュラ方式

レンチキュラとは、図 3.5 のようにディスプレイの表面にかまぼこ状のレンズを並べて立体視を実現する方式である。パララックスバリア方式と同様、レンチキュラ方式ではレンズの後方に、左右の映像を垂直方向に切り取って、交互に配置する。レンチキュラレンズは指向性を持っており、視線の届く位置を変化させるプリズムとして働く(図 3.6)。これを特定の距離から観察すると、右眼の視線は右の映像のみに到達し、拡大して提示されるため、左右の映像の分割が可能となる。レンチキュラ方式の課題は、パララックスバリア方式と同様に、レンズの影響による解像度の低下のため、画質が低くなることと、適視位置が制限されることである。また、レンズ収差によって立体像の鮮明度が低下するといった欠点がある。

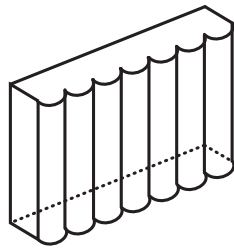


図 3.5: レンチキュラレンズ

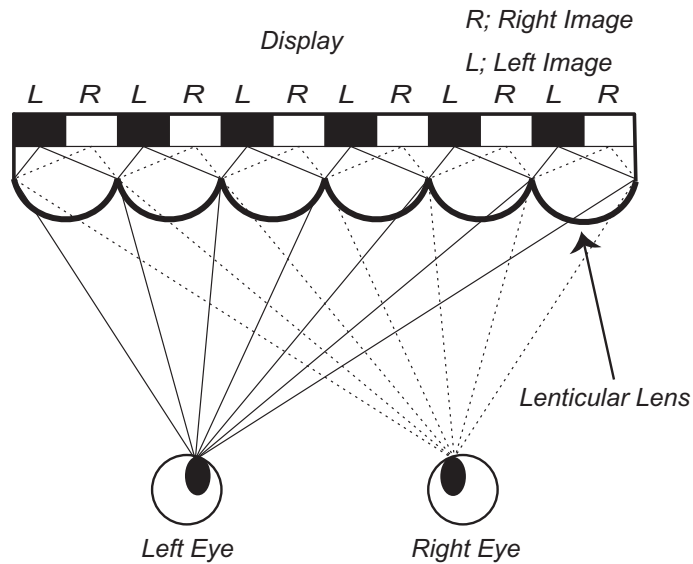


図 3.6: レンチキュラ方式



### 3.4 3D Visuo-Haptic VR 環境の研究事例

G.Bianchi[21],[22] や C.Sandor[23]、M.Ikits[24] らは、HMD を使って視覚空間と力覚空間の統合環境を提案している。図 3.7 は G.Bianchi が構築した 3D Visuo-Haptic VR 環境の一例である。HMD、PHANToM、トラッカーを用いてのシステム環境である。頭部に HMD を装着し 3 次元 CG でボールを表示させて、仮想空間で卓球ゲームを再現している。視点をトラッカーで追い、PHANToM で打球の感覚を与えている。

しかし HMD は操作中、頭部に常時装着しなければならないため、重量感、装着感があり煩わしさがある。また心理的・生理的影響も大きい。偏光フィルタ方式を含め他のメガネ型においても、透過光量が少なくなったり、外界の変化への対応が困難であるといった課題がある。裸眼型においても画面が暗くなるなどの同様の欠点があるが、特殊なメガネを装着することなしに立体視できるのは大きな魅力である。立体視の VR が身近になるためには、裸眼型のディスプレイが望ましいのは明らかである。そのため本研究では、裸眼型のディスプレイを使用する。パララックスバリア、レンチキュラ方式双方とも欠点はあるが、立体像をより鮮明に表示することができるパララックスバリア方式のディスプレイを使用して、システムの構築を行う。

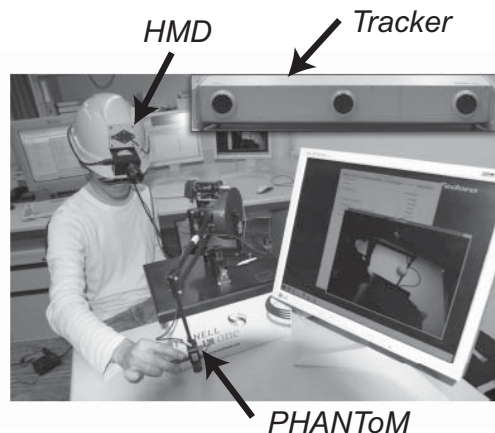


図 3.7: HMD を用いた Visuo-Haptic 環境 [21]

## 第4章 システムの設計

本研究では、裸眼型である斜め式4視点型パララックスバリア方式の立体視覚ディスプレイを用いた3D Visuo-Haptic VRシステムを提案する。4.1節で本システムの概要を記す。4.2節で今回用いる立体視覚ディスプレイでの立体像の表示方法と表示位置を述べ、4.3節では力覚提示位置(力覚ポイント)の導出方法を記す。4.4節において、視覚位置と力覚位置を統合させるために行う、力覚ディスプレイと立体視覚ディスプレイのキャリブレーション方法について説明する。また4.5節では、本研究で試みた立体像の知覚歪みの補正方法を述べる。

### 4.1 システムの概要

本研究で構築する裸眼型3D Visuo-Haptic VRシステムの概要と構成をそれぞれ、図4.1、図4.2に示す。まず立体視覚ディスプレイによって3次元空間上に立体画像を表示する。表示された仮想3次元物体の位置にユーザが力覚ディスプレイを移動すると、ユーザに力覚が提示される。ワールド座標系は図4.2に示すように立体視覚ディスプレイの画面中心とする。

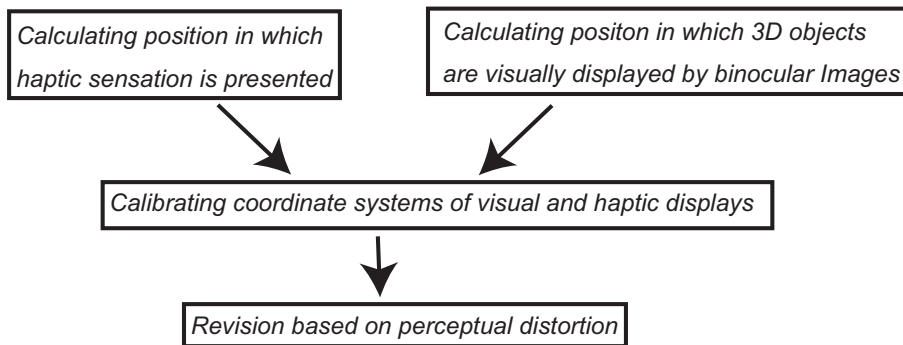


図 4.1: システムの概要

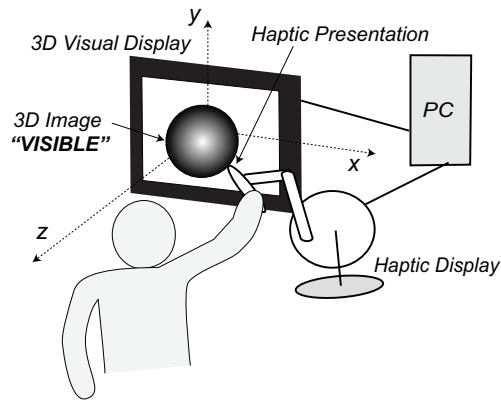


図 4.2: システムの構成

## 4.2 立体像の表示

### 4.2.1 両眼視差画像による立体像表示方法

4 視点型の立体視覚ディスプレイは、多視点からの立体像の観察を可能としている [25]。図 4.3 のように 4 つの視点領域があり、例えば、視点 2 では右眼で、視点 3 では左眼で観察すると立体視できる。つまり、視点 1 と視点 2、視点 2 と視点 3、視点 3 と視点 4 の三つの領域から立体視ができる。また、図 4.3 における視点 1~4 の画像は、図 4.4(a) のようにピクセルが配置される。1 ピクセル中の RGB の輝度値は、それぞれ異なる視点の画像の輝度値である。スリットが斜めに入っているため、サブピクセル単位で階段状に並んで画像が配置される。一方で、従来からのスリットが鉛直方向に入った 2 視点型のディスプレイはピクセルは図 4.4(b) のように配置されている。斜め式はスリットが垂直方向に入ったものに比べ、解像度の劣化を縦と横方向に振り分けているため、解像度の劣化が小さいという利点がある。

立体像の表示には、ステンシルバッファとカラーマスクを利用した。ステンシルとは型紙を意味しており、ステンシルバッファを用いれば、バッファの値に応じて効率よく特定の領域だけを描画することができる。

例として図 4.5 に、視点 1 の画像のみを表示する様子を示した。図 4.5 の (a) の原画像のうち、視点 1 の画像表示に用いるのは、(e) の画像で赤、緑、青色で示したサブピクセルである。まずステンシルバッファを使って、全てのピクセルを 4 種類に区分しておく。視点 1 の画像表示に用いるのは、4 区分されたピクセル領域の中で、(b) で示す 3 領域である。また一方で、(c) のようにカラーマスク処理をし、特定の色の輝度値のみを表示させる。その結果、(d) のようにステンシルバッファが参照され、カラーマスク処理されないサブピクセルのみが表示される。(d) の三つの画像を表示することによって、(e) で示すように視点 1 の画像を表示できる。視点 2~4 の画像も同様に表示させて、立体像を表示する。

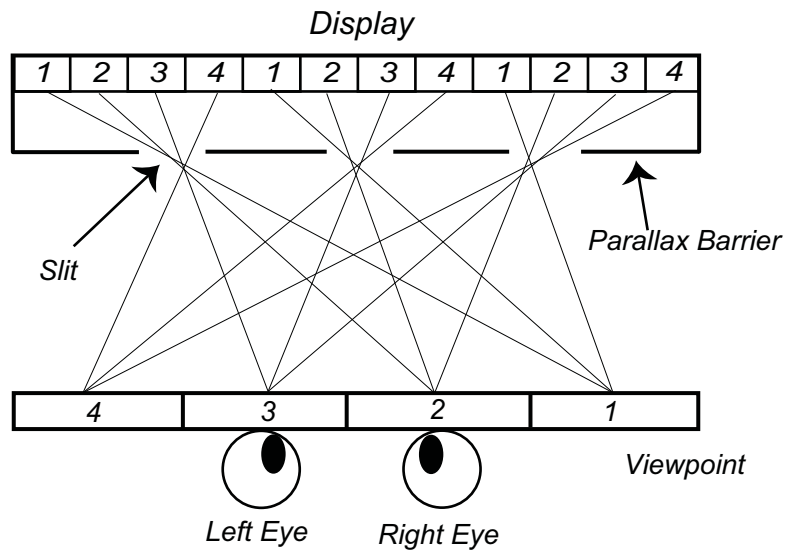


図 4.3: 4 視点表示

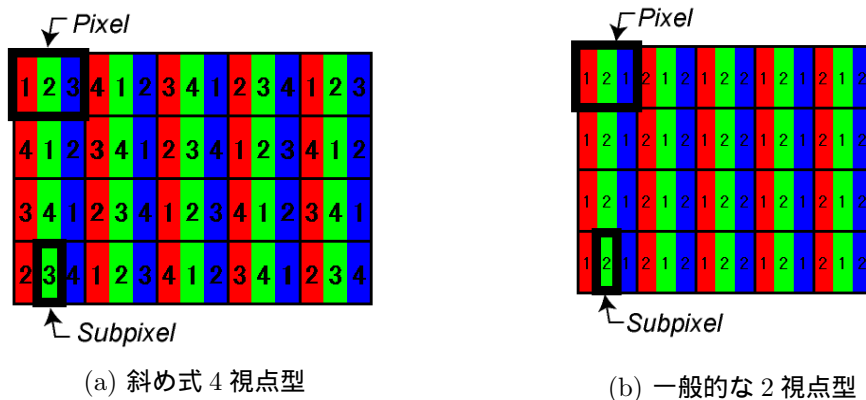


図 4.4: ピクセルの配置

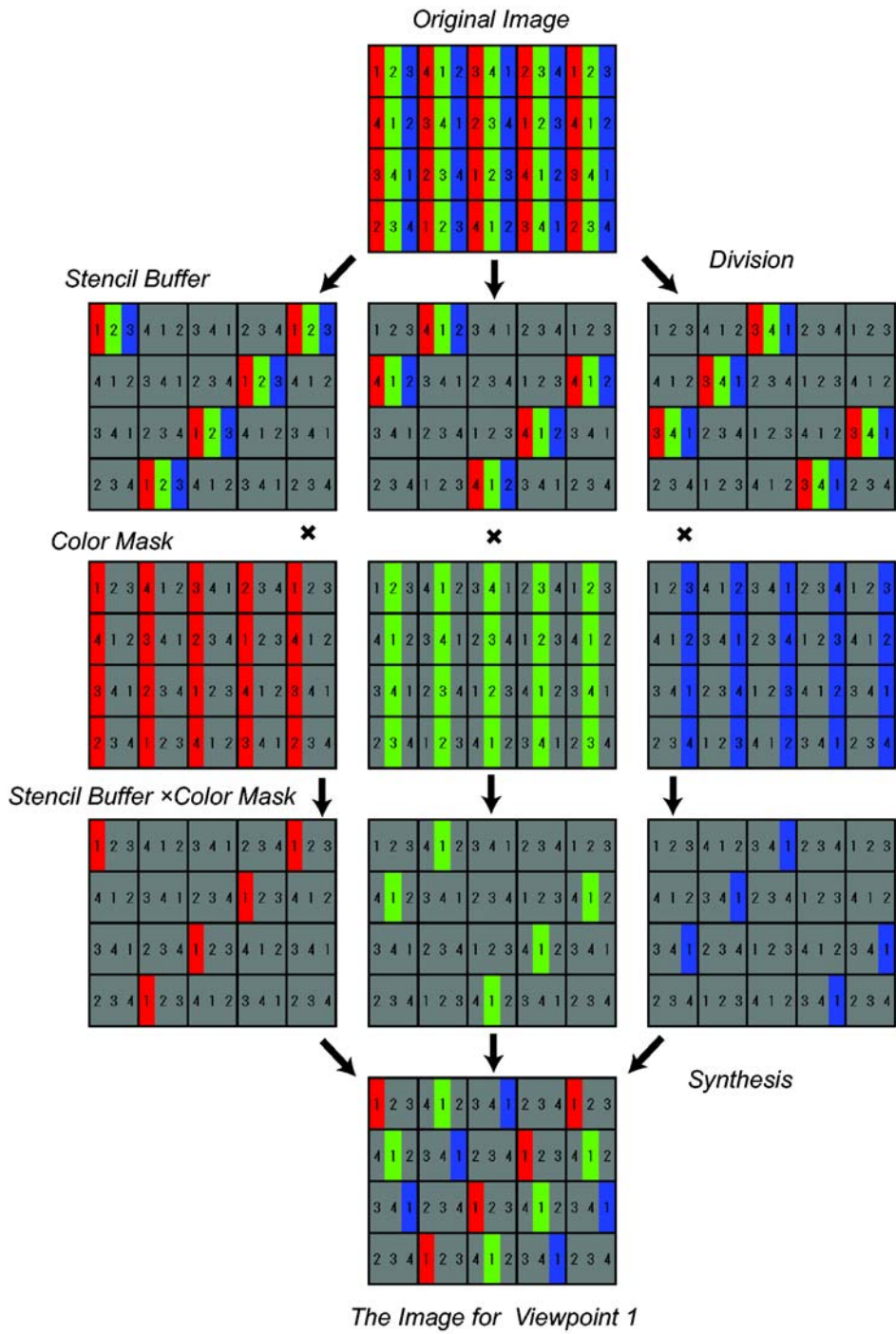


図 4.5: 視点 1 の画像表示方法

#### 4.2.2 両眼視差画像による立体像の幾何学的再生位置

コンピュータ上で立体物を描画し、両眼視差画像として提示する場合の、現実の立体視空間での再生位置を幾何学上の計算をもとに求めた。本節では2視点のみで考える。

まず、コンピュータ内空間で立体物を描画する。立体物を2つのある視点からとらえ、コンピュータ内の仮想スクリーンに透視変換させる。両眼に対応する透視原点  $C_r, C_l$  と3次元空間の任意点  $p$  は、コンピュータ内空間において図4.6のように配置する [26]。二つの透視原点間距離を  $2e$  とし、透視原点間の中点はスクリーン面中心の法線上に位置し、スクリーンとの距離は  $d$  とする。点  $p(x, y, z)$  は右の透視点  $C_r$  から見るとスクリーン上の点  $p_r$  に、左の透視点  $C_l$  から見ると点  $p_l$  にそれぞれ透視させる。透視変換させた表示点(点  $p_r, p_l$ ) を両眼視差画像として表示する。

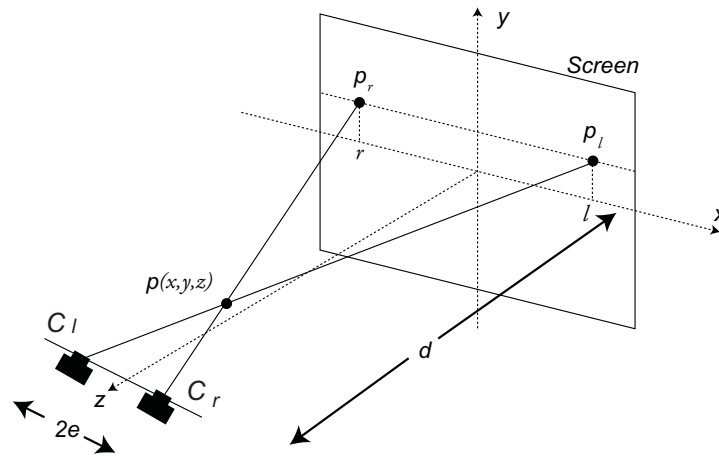


図 4.6: コンピュータ内空間

一方、図 4.7 のように両眼視差画像として点  $P_R, P_L$  が提示されたとき、点  $P$  に立体視できたとする。ただし、図 4.6 と同様に、両眼間距離を  $2E$ 、スクリーンとの距離を  $D$  とする。このときの  $p(x,y,z)$  と  $P(X,Y,Z)$  との関係を求める。

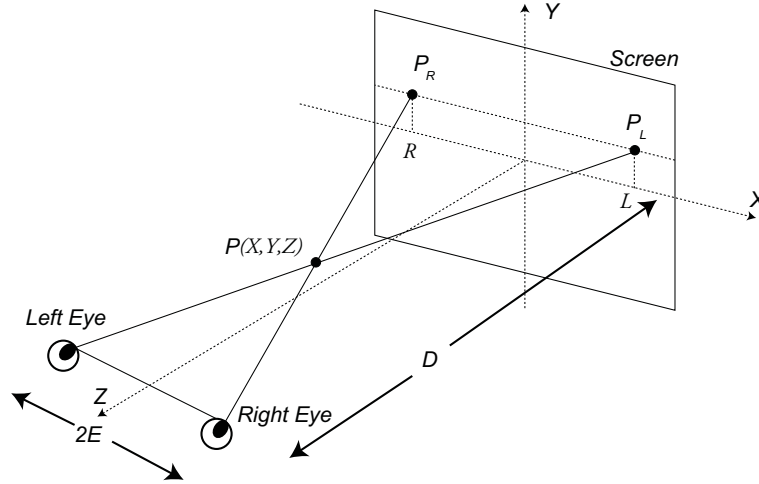


図 4.7: 立体視空間

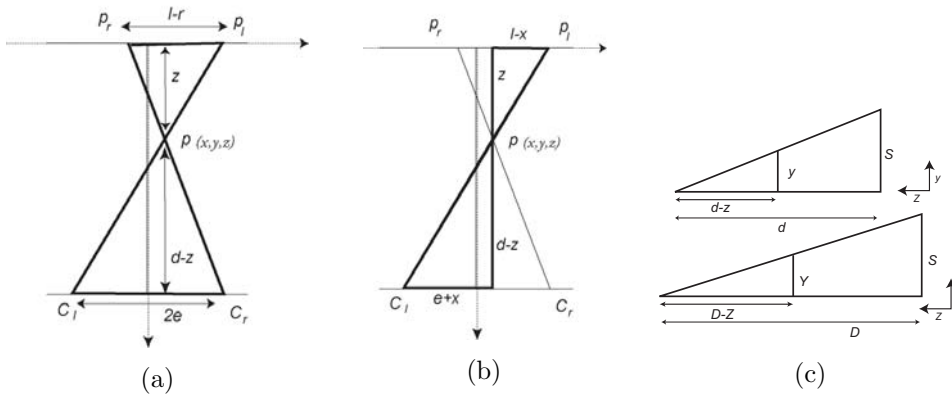


図 4.8: 立体知覚点

図 4.8(a) ~ (c) はそれぞれ、図 4.6 の  $xz$  平面、図 4.7 の  $xz$  平面、図 4.6, 4.7 の  $yz$  平面の様子を示す。図 4.8(a), (b) において、二つの三角形の相似の関係から

$$\frac{l-r}{2e} = \frac{z}{d-z} \quad (4.1)$$

$$\frac{l-x}{e+x} = \frac{z}{d-z} \quad (4.2)$$

が得られる。よって

$$r = \frac{dx - ez}{d - z} \quad (4.3)$$

$$l = \frac{dx + ez}{d - z} \quad (4.4)$$

と表される。また、図 4.7 においても同様にして

$$R = \frac{DX - EZ}{D - Z} \quad (4.5)$$

$$L = \frac{DX + EZ}{D - Z} \quad (4.6)$$

が得られる。コンピュータ内の仮想スクリーン面の  $r$  と  $l$  をそれぞれ、両眼視差画像表示面の  $R$  と  $L$  に提示しているから、 $p_r = P_R, p_l = P_L$  とすると、

$$r = R \quad (4.7)$$

$$l = L \quad (4.8)$$

である。したがって、

$$X = \frac{dE}{ez - Ez + dE}x \quad (4.9)$$

$$Z = \frac{eD}{ez - Ez + dE}z \quad (4.10)$$

と表すことができる。

また  $y$  と  $Y$  の関係は、図 4.8(c) から

$$Y = \frac{d(D - z)}{D(d - z)}y \quad (4.11)$$

と表せる。ゆえに両眼視差画像を用いて立体像を提示する場合、幾何学的にはコンピュータ内空間の  $p(x, y, z)$  は、立体視空間では式 (4.9) ~ (4.11) で求まる  $P(X, Y, Z)$  に対応することがわかる。また立体像の位置の変位を

$$\delta_x = X - x \quad (4.12)$$

$$\delta_y = Y - y \quad (4.13)$$

$$\delta_z = Z - z \quad (4.14)$$



とし、 $\frac{\partial\delta_x}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial\delta_y}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial\delta_z}{\partial z}$  を空間の伸縮変形を表す歪みとすると式 (4.12) ~ (4.14) より

$$\frac{\partial\delta_x}{\partial x} = \frac{dE}{ez - Ez + dE} - 1 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial\delta_y}{\partial y} = \frac{d(D - z)}{D(d - z)} - 1 \quad (4.16)$$

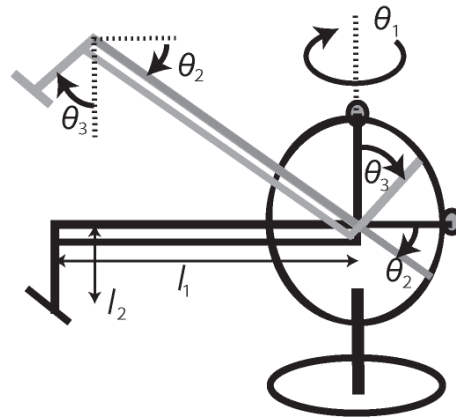
$$\frac{\partial\delta_z}{\partial z} = \frac{eEdD}{(ez - Ez + dE)^2} - 1 \quad (4.17)$$

として表すことができる。

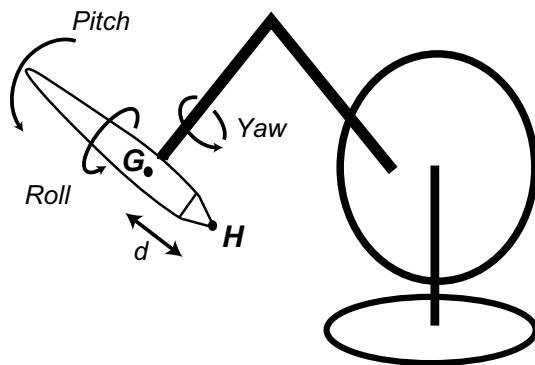
$E > e$  のとき、式 (4.15) ~ (4.17) より幾何学的には、表示空間の歪みは上下、左右方向 ( $x, y$  軸方向) では飛び出し距離 ( $z$  値) にも依存し、飛び出し距離が大きい程、一様に歪みが生じることがわかる。一方、奥行き方向 ( $z$  軸方向) の歪みは、飛び出し距離が大きい程、歪みの度合が大きくなることがわかる。

### 4.3 力覚ポイントの導出

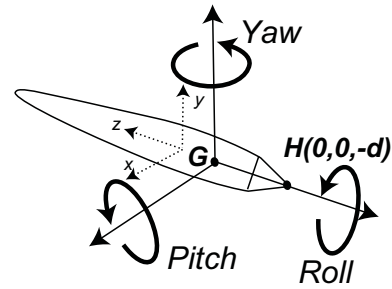
本システムで使用する力覚ディスプレイ PHANToM omni は、6 自由度のセンサ (入力部) を持つ。リンク機構による三つのジョイント角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ (図 4.9(a)) と、ペンの roll 角、pitch 角、yaw 角 (図 4.9(b)) である。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  はそれぞれ、アームの水平方向の振りの角度、右のリンクの上下振りの角度、左のリンクの上下振りの角度を示している。



(a) アームの回転角度



(b) PHANToM の roll,pitch,yaw



(c) roll 軸,pitch 軸,yaw 軸

図 4.9: 力覚ポイントの導出

ペン先の位置 (点  $H$ ) を力覚提示位置 (力覚ポイント) とし、PHANToM の中心を原点とする座標系 (PHANToM 座標系) で表現する。座標変換を容易に行うために、座標値  $(x, y, z)^T$  は同次座標系  $(x, y, z, 1)^T$  で表記する。

回転移動、平行移動に関する行列をそれぞれ  $R(R_x, R_y, R_z)$ 、 $T(T_x, T_y, T_z)$  とおくと、それぞれ

$$R(R_x, R_y, R_z) = \begin{bmatrix} \cos R_z & -\sin R_z & 0 & 0 \\ \sin R_z & \cos R_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos R_y & 0 & \sin R_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin R_y & 0 & \cos R_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x & -\sin R_x & 0 \\ 0 & \sin R_x & \cos R_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$T(T_x, T_y, T_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

と表せる。ただし、 $R_x, R_y, R_z$  はそれぞれ、x 軸、y 軸、z 軸まわりの回転角度を、 $T_x, T_y, T_z$  はそれぞれ、x 軸、y 軸、z 軸方向の移動ベクトルを表す。

点  $G$  と点  $H$  の距離を  $d$  とする。roll、pitch、yaw の角度と三つのジョイント角度が全て 0 のとき、点  $G$  を原点とする座標系 (G 座標系) においては、点  $H$  は  $(0, 0, -d, 1)^T$  とおける (図 4.9(c))。roll、pitch、yaw の回転角度がそれぞれ  $\alpha, \beta, \gamma$  のとき、点  $H$  は G 座標系では、

$$\begin{bmatrix} x_{g-h} \\ y_{g-h} \\ z_{g-h} \\ 1 \end{bmatrix} = R(-\theta_3, \theta_1, 0)R(\beta, \gamma, -\alpha) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

と表すことができる。

また、PHANToM 座標系においては、点  $G$  はリンクの運動学的パラメータから、

$$\begin{bmatrix} x_{p-g} \\ y_{p-g} \\ z_{p-g} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1(l_1\cos\theta_2 + l_2\sin\theta_3) \\ l_2 - l_2\cos\theta_3 + l_1\sin\theta_2 \\ -l_1 + \cos\theta_1(l_1\cos\theta_2 + l_2\sin\theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

として与えることができる [27]。

よって、式 (4.20)、(4.21) から点  $H$  は PHANToM 座標系において、

$$\begin{bmatrix} x_{p-h} \\ y_{p-h} \\ z_{p-h} \\ 1 \end{bmatrix} = T(x_{p-g}, y_{p-g}, z_{p-g}) \begin{bmatrix} x_{g-h} \\ y_{g-h} \\ z_{g-h} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

と表現することができる。

## 4.4 視覚・力覚ディスプレイのキャリブレーション

視覚空間と力覚空間の二つの座標系 (図 4.10) の統合を適切に調整するために、システムの実装前に力覚ディスプレイ PHANToM と立体視覚ディスプレイのキャリブレーションを行う。

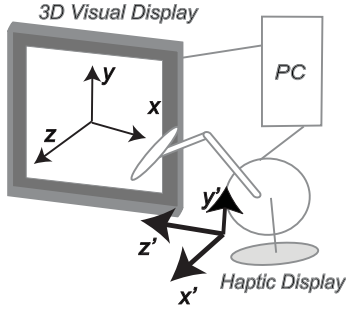


図 4.10: 力覚空間と視覚空間の二つの座標系

式 (4.18)、(4.19) の  $R$ 、 $T$  と式 (4.23) の拡大縮小行列  $S$  を用いたアフィン変換により、キャリブレーションを行う。

$$S(S_x, S_y, S_z) = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

ただし、 $S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$  はそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸方向の拡大縮小係数を表す。

まず、立体視覚ディスプレイで点を表示し、式 (4.22) から PHANToM を位置検出器として用い、表示した点の座標を計測する。PHANToM での計測座標値を  $X_{ph}$ 、ワールド座標系 (立体視覚ディスプレイ上) での座標値を  $X_{wl}$  とすると、 $X_{ph}$  と  $X_{wl}$  の変換は、

$$X_{wl} = SRTX_{ph} \quad (4.24)$$

と表せる。

計測から  $N$  組のデータを得たとき、

$$\min_{S,R,T} \sum_{i=1}^N \|X_w^i - SRTX_{ph}^i\|^2 \quad (4.25)$$

から、 $SRT$  を求める。システムの実装時には、PHANToM の座標値に  $SRT$  で処理した座標値を用いて行う。

## 4.5 立体像の知覚歪みの補正

両眼視差画像によって立体像を提示する場合、再生位置は幾何学上、式 (4.9) ~ (4.11) で求まる  $P(X, Y, Z)$  になる。しかし、実際の立体視覚ディスプレイによる立体構造の知覚には、眼の焦点の調節距離と輻輳点までの距離の違いによる影響、箱庭効果、書割効果などの知覚的な歪みが生じ、立体像の表示位置は知覚位置からのずれを伴う [28],[29],[30]。箱庭効果とは、立体に見えるはずの物体が箱庭に物を置いたように全体が小さく感じられる現象であり、特に HMD の使用時に感じやすい。また書割効果とは、立体像に厚みが感じられず「書き割り」のように平面的に知覚される現象である。箱庭効果、書割効果は、コンピュータ内の空間での立体物の透視条件と、現実の立体視空間での観察条件を一致させること (つまり  $d = D, e = E$ ) により解消されると従来ではいわれていた [31],[32]。しかし物体が平坦に見えてしまう書割効果については、透視条件と観察条件を一致させても、知覚されるとの報告がある [33],[34]。本システムでは書割効果の影響を考慮し、立体像の知覚歪みの補正を試みる。

立体物の表示位置の奥行量  $Z_e$  が奥行量  $Z_p$  に知覚され、表示対象の大きさ  $X_e$  は知覚の際は大きさが  $X_p$  になったとする。このとき、 $M_e$  を表示厚み度、 $M_p$  を知覚厚み度とし、以下のように記す。

$$M_e = \frac{\Delta Z_e}{\Delta X_e} \quad (4.26)$$

$$M_p = \frac{\Delta Z_p}{\Delta X_p} \quad (4.27)$$

表示空間から知覚空間への写像において、立体物の形状を正しく再現するためには表示厚み度  $M_e$  と知覚厚み度  $M_p$  が等しくなることが条件である。そのため、書割効果の参照量として知覚歪み度  $I$  を以下のように定義する。

$$I = \frac{M_p}{M_e} \quad (4.28)$$

式 (4.28) において、表示厚み度に比べて知覚厚み度が小さい場合、すなわち  $I$  の値が小さい場合に、書割効果が発生する [35]。知覚歪み度に関する行列  $M$  を、

$$M(M_{sx}, M_{sz}, M_{tz}) = S(M_{sx}, 0, M_{sz})T(0, 0, M_{tz}) \quad (4.29)$$

とおく。 $M_{sx}, M_{sz}, M_{tz}$  はそれぞれ、横幅 (大きさ) の知覚倍率、奥行幅の知覚倍率、奥行量の歪み量とする。ただし、視差は水平視差のみなので、 $y$  軸方向の知覚的歪みは考えない。計測から得られる知覚歪み度をもとに、提示する立体像  $Y$  の力覚提示位置は

$$Y' = MY \quad (4.30)$$

で示す  $Y'$  に歪ませる。システムの実装時には歪ませた  $Y'$  の位置に力覚を提示する。

## 第5章 システムの実装と評価

前章で提案したシステムを実装し、提案したシステムの有効性を検証した。3種類の実験を行った。実験1として、立体オブジェクトを提示し、知覚歪み度を計測した。実験2として、他のオブジェクトに対し、実験1で計測した知覚歪み度を基に補正を行った場合と知覚歪み度を適用しなかった場合の2通りでシステムを実装し、順次触らせた。実験3として、本研究で構築した視覚・力覚空間が統合されたVR環境と、従来から利用されている視覚・力覚空間が分離されたVR環境とを比較して評価実験を行った。本章では、5.1節で実験環境の説明を行い、5.2節で実験1、5.3節で実験2、5.4節で実験3の結果と評価を記す。

### 5.1 実験環境

本システムでは、SensAble社の力覚ディスプレイ PHANToM omni と三洋電機製の斜め式4視点型パララックスバリア方式の立体視覚ディスプレイを用いてシステム環境を構築した。図5.1にシステムの概観を示す。使用したPC、立体視覚ディスプレイ、力覚ディスプレイの仕様は以下のとおりである。

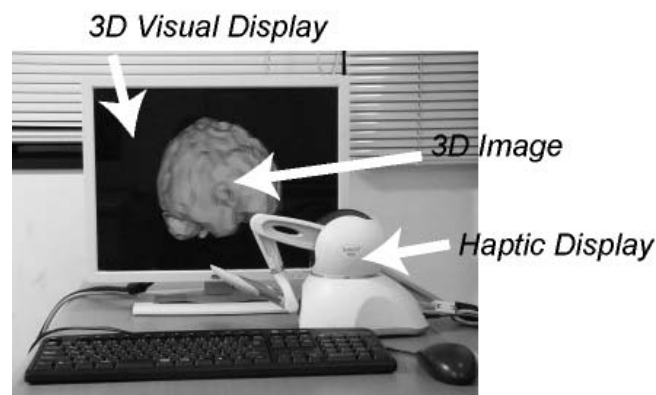


図 5.1: システムの概観

表 5.1: PC の仕様

CPU	Intel Celeron 3.33GHz
Memory	2.0GB
Graphic Board	NVIDIA GeForce 8500GT

表 5.2: 立体視覚ディスプレイの仕様

画面サイズ	20.1 型
画素数	1600 × 1200
画面サイズ	408.6mm × 306.0mm
画素ピッチ	0.255mm × 0.255mm
視点数	4
適視距離	560mm

表 5.3: 力覚ディスプレイの仕様

力覚提示空間	160 × 120 × 70mm
位置座標分解能	450dpi(0.055mm)
最大提示反力	3.3N
剛性	x 軸 1.26N/mm y 軸 2.31N/mm z 軸 1.02N/mm
位置検出	x,y,z,roll,pitch,yaw
入力更新レート	1kHz
インターフェース	IEEE1394 FireWire ポート

また、立体視覚ディスプレイ、力覚ディスプレイ、観察者の位置は図 5.2 のように配置した。

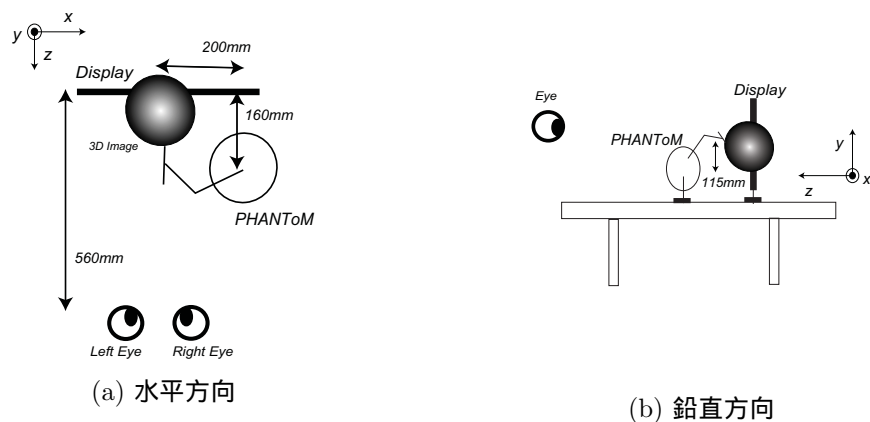


図 5.2: ディスプレイと観察者の位置

## 5.2 視覚・力覚ディスプレイのキャリブレーション結果

図 5.2 のような配置において、システムの実装前に視覚・力覚ディスプレイのキャリブレーションを行った。PHANToM 座標系とワールド座標系において、10 組の対応点を計測し、最小二乗法から式 (4.25) の  $SRT$  を求めた。求めた結果の一例は以下のとおりである。

$$SRT = \begin{bmatrix} 4.73 & 2.59 & -0.446 & 180.6 \\ -0.139 & 1.51 & -0.00129 & -137.8 \\ 1.21 & 0.493 & 0.181 & 120.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



### 5.3 立体像の知覚歪み度の計測

実験1として、システム実装前に立体オブジェクト(円柱)を提示し、各被験者の知覚歪み度を計測した。

まず、図5.3のように顔を器具に固定させ、視点の位置を一定にして立体像(円柱)を提示した。図5.4(a)のように画面中央に立体像の円柱を提示する。円柱は、システムの実装時に提示するオブジェクトの幅、奥行きと同等の大きさとし(図5.4(b))、半径、高さを50.0mmとする。3種類表示し、表示位置はディスプレイ画面の手前50mm、100mm、150mmとした。提示する円柱の中央には、水平軸に沿って単線が描かれている。

各ユーザーは、単線が含まれる水平面上の円柱の大きさ(円柱の直径の両端 $S_r, S_l$ )をPHAN-TO-Mのペン先で指示し、座標値を計測する。2点 $S_r, S_l$ 間の距離の2分の1を、知覚される円柱の横幅(大きさ) $X_p$ とする。またユーザーは水平面上の円柱の最大奥行き位置 $D$ もペン先で指示し、計測する。この奥行き位置とディスプレイとの距離を、知覚される円柱の奥行き量 $Z_d$ とし、点 $S_r, S_l$ との $z$ 軸方向の距離を奥行き幅 $Z_p$ とした。3点計測することで、円柱の知覚された横幅 $X_p$ 、奥行き幅 $Z_p$ 、奥行き量 $Z_d$ を測定した。

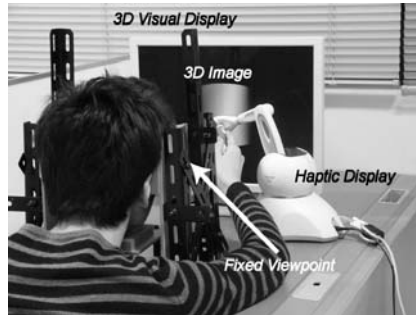
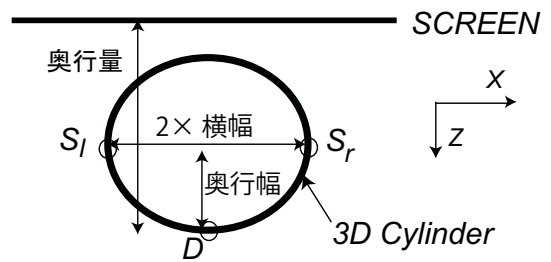


図 5.3: 実験環境



(a) 計測時に提示する立体像(円柱)



(b) 計測点

図 5.4: 計測対象

被験者 6 人に対して 計測実験を 3 回行った結果の平均値を、表 5.4 に示した。

表 5.4: 計測結果

提示奥行量(mm)	被験者	知覚奥行量(mm)	奥行幅(mm)	横幅(mm)	厚み度(mm)
50	1	39.8	45.6	51.5	0.89
	2	68.2	44.3	47.5	0.93
	3	41.3	28.9	54.9	0.53
	4	55.2	39.8	51.8	0.77
	5	34.2	31.8	55.7	0.57
	6	30.2	34.4	49.8	0.69
	平均	44.82	37.47	51.87	0.73
100	1	59.9	25.6	61	0.42
	2	109.9	62.7	54.3	1.15
	3	80.3	46.8	62.7	0.75
	4	101.1	42.4	55.7	0.76
	5	72.1	31.8	61.9	0.51
	6	48.5	33.1	61	0.54
	平均	78.63	40.4	59.43	0.69
150	1	60.9	37.1	71.3	0.52
	2	110.9	68.7	64.1	1.07
	3	81.3	40.2	54.4	0.74
	4	102.1	40.7	59.5	0.68
	5	73.1	60.5	74.6	0.81
	6	49.5	26	71.1	0.37
	平均	79.63	45.53	65.83	0.7

表示 50    表示 50    表示 1.0

## 5.4 知覚歪み補正によるシステムの実装と評価

実験1の後、実験2として力覚提示位置に差異のある2条件の下で、オブジェクトを順次触らせた。提示するオブジェクトは3種類とし、オブジェクト各々に応じて、円柱で計測した知覚歪み度に基づいて補正を行った場合と、知覚歪み度を用いなかった場合を用意した。どちらの場合も、力覚ディスプレイと立体視覚ディスプレイのキャリブレーションは行っている。提示する2種類のオブジェクトは、球、立方体、頭蓋骨の3次元像とした(図5.5)。

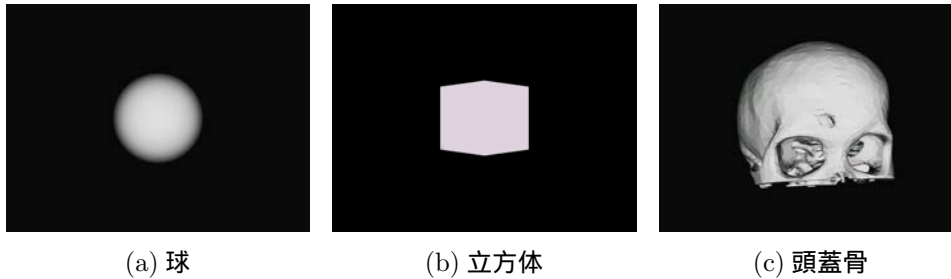


図 5.5: 実験に用いた立体オブジェクト

各試行の後、被験者に対し、「視覚と力覚の提示位置が合っていると感じるのはどちらか。」という質問を行った。6人の被験者に対して各々5回の試行(計30回)を行った。力覚提示位置を補正した場合が選択されたのは、球、立方体、頭蓋骨それぞれにおいて、19、11、14回であった。試行回数30回の際の有意水準5%に対する限界値は20回であるため、有意差はみられなかった。有意差は得られなかったものの、立方体に比べて球や頭蓋骨は補正の効果が高くなることが示唆された。

この実験結果は、本研究で行った補正が、円柱の厚み度に基づいた処理のためだと考えられる。人間の知覚する奥行には、オブジェクト間の奥行差の知覚とオブジェクト内の奥行構造の知覚の2種類がある[36]。オブジェクト間の奥行き差は相対視差から直接計算できるのに対し、奥行構造は勾配や曲率など、2回、3回の微分処理が必要となってくる。

本研究で行った補正は、円柱の厚み度を基に行ったもので、オブジェクトの勾配や曲率を考慮した処理である。オブジェクト内の奥行構造の知覚が、相対視差からではなく、勾配や曲率などから検出したため上記のような結果になったと考えられる。そのため、対象オブジェクトが球のときは円柱の勾配や曲率に近いいため、補正は最も効果があり、対象オブジェクトが立方体のときは円柱の勾配や曲率と大きく異なるため、補正の効果が小さかったと考えられる。

## 5.5 3D Visuo-Haptic VR 環境の評価

本研究で構築した視覚と力覚が統合された VR 環境を評価するために、実験 3 として評価実験を被験者 4 人に行った。被験者に対し、「従来の視覚・力覚空間が分離された VR 環境 A (図 5.6(a)) と、本研究で構築した視覚・力覚空間が統合された VR 環境 B(図 5.6(b)) とを比べてどのような差異を感じるか」という質問をした。被験者の回答の集計結果は以下の通りである。

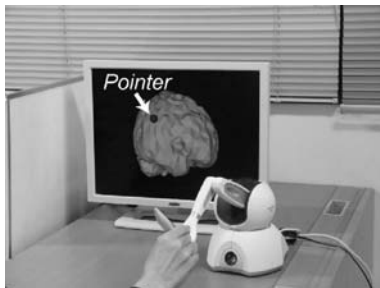
### A に対するコメント

- A は力覚ディスプレイの手探りで物体の形状情報を得ている感じがする
- A は力覚ディスプレイの場所に存在する物体を触っている感じがする
- A では物体の大きさ、立体感はわからない
- A は物体が切り離されている感じがする

### B に対するコメント

- B はその場にあるものを触っている感じがする
- B は実物がそこにある感じがする
- B は一体感がある
- B は力覚ディスプレイが視界の妨げになっている
- B は目が疲れる

回答結果から、視覚・力覚空間が一致した本研究のシステムは、仮想物体の特徴 (立体感や形状など) が直感的に理解しやすく、VR 環境としてよりリアリティが向上したと考えられる。



(a) 視覚・力覚空間が分離された VR 環境



(b) 視覚・力覚空間が一致した VR 環境

図 5.6: 比較実験

## 第6章 結論

本研究では視覚空間と力覚空間を統合した 3D Visuo-Haptic VR 環境の構築を行った。裸眼型の立体視覚ディスプレイであるパララックスバリア方式のディスプレイを使用して構築した。

立体像はステンシルバッファとカラーマスク処理をして表示し、立体像の表示位置は幾何学上の計算から算出した。さらに力覚ディスプレイの力覚ポイントを導出し、PHANToM 座標系とワールド座標系の対応点から最小二乗法によって、二つの座標空間のキャリブレーションを行った。

また、両眼視差画像を用いた立体視覚ディスプレイで立体像を観察する場合、コンピュータ内空間での透視条件による幾何学的歪みの他に知覚的歪みが生じ、表示位置と知覚位置とが一致しないことが多い。本研究では、計測した知覚的歪み度から他の立体オブジェクトの知覚位置を推定し、システムの実装を図った。視覚・力覚空間を統合した VR 環境は従来の VR 環境に比べ、仮想物体の特徴が直感的に理解しやすく、現実性の向上が図れたと考えられる。

# 謝 辞

本研究において、研究環境を提供して下さり、多大なる御指導を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科大城理教授に深く感謝し、篤くお礼申し上げます。本研究をまとめるにあたり、副査として御指導頂きました大阪大学大学院生命機能研究科藤田一郎教授に篤く御礼を申し上げます。そして、本論文を進めるにあたり数々の御指導を頂き、終始的確な助言を頂きました大阪大学大学院基礎工学研究科黒田知宏准教授に心から深く感謝致します。PHAMToMの操作を始め、研究の方針や内容について親身になって御指導を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科黒田嘉宏助教に篤く感謝致します。

本研究を行うにあたって、パララックスバリア型の立体視覚ディスプレイを貸与して下さいました三洋電機株式会社の増谷健氏、村田治彦氏、金山秀行氏に篤く感謝を申し上げます。また X 線 CT 像、MRI 像を提供して下さいました東京大学医学部鎌田恭輔講師に御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたって、ささいな疑問にも懇切丁寧に教えて頂き、システム構築の際、数々のアドバイスを頂いた大城研究室亀井俊智氏、谷本達昭氏、荒井良祐氏、村東孝信氏、山崎直継氏の先輩方に感謝致します。最後になりましたが、日頃から共に助け合い、励まし合い、互いに切磋琢磨した大城研究室同期の浅田和宏氏、金守恒志氏、陣内孝輔氏、瀧寛文氏、福塚大介氏、山田和広氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] S.Tate: 人工現実感の基礎, 培風館, 東京, 2000
- [2] G.C.Burdea, P.Coiffet: Virtual Reality Technology. Wiley-IEEE Press,Singapore, 2003
- [3] 高田明和, 高田由美子: 新生理学入門, 南山堂, 東京, 1994
- [4] 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也: 力覚提示に基づく触診 VR シミュレーションフレームワーク, 日本 VR 医学会学会誌, Vol.2, pp43-49, 2003
- [5] 橋本渉, 加島寛子, 大須賀美恵子: 力覚メディアを用いた障害児向け遊びリテーションシステムの試作と適用評価. 信学技報, vol103, pp41-46, 2003
- [6] M.Inami, N kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yangid, T. Maeda and S. Tachi: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projecter, Proceeding of IEEE Virtual Reality 2000, pp233-240, 2000
- [7] Mitsou, N.C Velanas S.V, Tzafestas, C.S: Visuo-Haptic Interface for Teleoperation of Mobile Robot Exploration Tasks, Robot and Human Interactive Communication 2006, The 15th IEEE International Symposium on, pp157-163, 2006
- [8] J.Vallino and C.Brown: Haptics in Augmented Reality. Multimedia Computing and Systems 1999, IEEE International Conference on, vol1 pp195-200, Florence, 1999
- [9] 佐藤誠: バーチャルリアリティの基礎 2/人工現実感の設計:究極のインタフェースを求めて, 培風館, 東京, 2000
- [10] 原島博, 廣瀬通孝, 下條信輔: 仮想現実学への序曲-バーチャルリアリティドリーム, 共立出版, 東京, 1996
- [11] 尾上守夫, 池内克史, 羽倉弘之: 3次元映像ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 2006
- [12] <http://www.sensable.com>
- [13] <http://www.cyverse.co.jp/Products/spidar.html>

- [14] <http://www.it.bton.ac.uk/staff/lp22/CS133/haptics.html>
- [15] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, R. Kawamura: Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, Proceeding of SIGGRAPH2001, 2001
- [16] 日本視覚学会: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 2000
- [17] Jung-Young Son, B. Javidi: Three-Dimensional Imaging Methods Based on Multiview Images, IEEE/OSA journal of display technology, vol1, 2005
- [18] 林部敬吉: 3次元視研究の展開, 酒井書店, 東京, 2004
- [19] P. Willemsen, M. B. Colton, S. H. Creem-Regehr, W. B. Thompson: The Effects of Head - Mounted Display Mechanics on Distance Judgments in Virtual Environments, Proc. First SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, pp35-38, 2004
- [20] Tom Peterka, Robert L. Kooima, Javier I. Girado, Daniel J. Sandin, Andrew Johnson: Dynallax: Solid State Dynamic Parallax barrier Autostereoscopic VR Display, Virtual Reality Conference 2007 VR IEEE, pp155-162, 2007
- [21] G. Bianchi, B. Knoerlein, G. Szekely, M. Harders: High Precision Augmented Reality Haptics, Proc. of Eurohaptics'06, pp169-178, 2006
- [22] G. Bianchi, C. Jung, B. Knoerlein, G. Szekely, M. Harders: High-fidelity visuo-haptic interaction with virtual objects in multi-modal AR systems, ISMAR'06, pp187-196, 2006
- [23] C. Sandor, T. Kuroki, S. Uchiyama, H. Yamamoto: Exploring Visio-Haptic Mixed Reality, 信学技報 vol.106, pp.31-36, 2007
- [24] M. Ikits, C. Hansen, C. Johnson: A Comprehensive Calibration and Registration Procedure for the Visual Haptic Workbench, Eurographics Workshop on Virtual Environment 2003
- [25] 安東孝久, 増谷健, 竹本賢史, 東野政弘, 濱岸五郎, 小林哲郎: 多視点方式メガネなし 3D ディスプレイ, 電子情報通信学会技術研究報告, EID, 電子ディスプレイ, vol102, pp33-36
- [26] J. Shan, C-S. Fu, B. Lin: Autostereoscopic Visualization and Measurement: Principles and Evaluation. The Eurographics Association, 2003
- [27] M. Cenk, D. Feygin, F. Tendick: A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANToM Haptic Interface and Improvements for High-Performance Control, Presence Teleoper Virtual Environ, pp555-568, 2002



- [28] 長田昌次郎: 立体映像の奥行き感と大きさ感, 映情学技報 vol21, pp45-50,1997
- [29] 日下秀夫: 両眼視差方式における立体像の生ずる位置と大きさ, 映情学技報 vol14 ,pp73-76, 1990
- [30] 吉田俊介、宮崎慎也、星野俊二、大関徹、長谷川純一、安田孝美、横井茂樹: ステレオ視表示における高精度な奥行き距離補正の一手法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol5, pp1019-1025, 2000
- [31] Howard I.P,Rogers B.J: Binocular Vision and Stereopsis. Oxford University Press, 1995
- [32] 岩本太郎, 三宅徳久,MSTRUNK Linda: 時分割方式立体視における像のひずみの解析と光軸の平行変位によるひずみの除去, 日本機械学会論文集 (C 編), vol58 , pp2701-2708, 1992
- [33] 繁樹博昭, 新館俊輔 , 佐藤隆夫: 書き割り効果のメカニズム, 映情学技報, pp153-160,1999
- [34] 名手久貴 , 須佐見憲史 , 畑田 豊彦 : 多視点画像が提示可能な立体ディスプレイにおける運動視差の効果 : 運動視差による書き割り効果の改善, 映情学技報, vol57, pp279-286,2003
- [35] 山之上裕一 , 奥井誠人 , 岡野文男: 2 眼式立体画像における箱庭・書き割り効果の幾何学的解析 , 映情学技報, vol25, pp15-22, 2001
- [36] 繁樹博昭, 佐藤隆夫: オブジェクト間の奥行き差とオブジェクト内の奥行き構造の検出閾の検討, 基礎心理学研究, vol19, pp149, 2001