

自由曲面ディスプレイの構築とその応用

A study on the construction of the free-form display
and its applications

学位論文：博士(工学) 甲270

2005 年 10 月

近 藤 大 祐

目次

第 1 章 はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 VR,MR における視覚ディスプレイの分類	3
1.2.1 HMD	3
1.2.2 IPT	4
1.3 従来法の問題と解決	5
1.3.1 表示における従来法の問題	5
1.3.2 物体近傍での表示による解決	7
1.3.3 操作入力における従来法の問題	10
1.3.4 実物体を用いた入力操作による解決	11
1.4 オブジェクト指向ディスプレイの提案	12
1.5 オブジェクト指向ディスプレイの特性と位置づけ	13
1.5.1 隠蔽矛盾の解消	13
1.5.2 輻輳と焦点調節の齟齬の改善	13
1.5.3 頭部計測精度の影響の軽減	13
1.5.4 実物体と映像の一体化による視・触覚の一致	14
1.5.5 まとめ	14
1.6 本論文の目的	16
1.7 本論文の構成	16
第 2 章 自由曲面投影ディスプレイ	17
2.1 曲面をスクリーンとする投影型ディスプレイ	17
2.2 自由曲面投影ディスプレイの提案	19
2.3 FFPD の歪み補正手法	20
2.4 実装手順	23
第 3 章 FFPD の特徴	27

3.1 FFPD での立体知覚	27
3.2 視・触覚一致について	28
3.3 次章以降の流れ	28
第 4 章 アプリケーション実装とシステムの校正	29
4.1 アプリケーションの実装	29
4.1.1 医学教育アプリケーション	29
4.1.2 バーチャル解剖模型の実装	30
4.1.3 システム構成	30
4.1.4 頭部計測用センサ	34
4.1.5 触診トレーナ機能	35
4.1.6 実行結果	35
4.2 センサ誤差に起因する歪みの評価	38
4.2.1 歪みを伴った観察像のシミュレーション	39
4.2.2 スクリーン／視点位置の計測誤差による歪み	40
4.2.3 自由曲面投影ディスプレイと HMD との比較	42
4.2.4 計測誤差の許容量	44
4.2.5 まとめ	46
4.3 システムの校正	47
4.3.1 手順 1：プロジェクタ位置・姿勢と視推台の校正	48
4.3.2 手順 2：磁気センサの校正	50
4.3.3 手順 3：スクリーン物体のレシーバ取り付け姿勢の校正	50
4.3.4 結果と考察	52
第 5 章 操作性と空間理解の容易さに関する実験	53
5.1 実験の概要	53
5.1.1 実験装置	54
5.2 実験 1：操作性の評価	56
5.2.1 目的	56
5.2.2 手順	56
5.2.3 結果	57

5.2.4 考察	58
5.3 実験 2：外形物体の表面との奥行き知覚の評価	59
5.3.1 目的	59
5.3.2 手順	59
5.3.3 結果	59
5.3.4 考察	61
5.4 実験 3：総合的な位置関係の理解と記憶の評価	62
5.4.1 目的	62
5.4.2 手順	62
5.4.3 結果	63
5.4.4 考察	63
5.5 まとめ	64
第 6 章 学習実験	65
6.1 使用教材	65
6.2 実験手順	69
6.3 結果	71
6.4 考察	74
第 7 章 まとめ	75
7.1 結論	75
7.2 展望	76
参考文献	77
図一覧	81
表一覧	83
謝辞	85

第 1 章 はじめに

1.1 研究の背景

VR(Virtual Reality; 人工現実感)[4]／MR(Mixed Reality; 複合現実感)技術は工業や医療分野への応用が活発に行われるようになり、映像提示や、様々なインタラクションを含んだアプリケーションが開発されている。

VR 分野で長く研究され、また多く用いられてきた映像表示デバイスとして、HMD (Head Mounted Display)と IPT (Immersive Projection Technology; 没入型スクリーン投影技術)とがある。どちらも、広い景観などの映像を表示し、コンピュータが作り出す仮想の世界を歩き回ったり、見回したりするのに有効なディスプレイであり、いわば、没入型の映像表示用デバイスといえる。

近年、使用者の視点位置や挙動を検出するセンサ、および力覚フィードバック装置などの開発が進むにつれて、身体近傍での作業を主体とし対象とするバーチャル物体に対して手などを使った直接的な操作というインタラクションを目指したものが活発に提案され、工場における部品の組み立てシミュレーションや、手術トレーナなどへの応用が期待されている。

それに伴い、映像提示系も、従来の見回しやウォークスルーのみの形態だけでなく、身体近傍の物体表示に適したものが求められている。

対象物体に対する身体近傍での詳細な観察と直接的な操作は，人間が物体に対して行う最も基本的な作業である．たとえば，図 1.1 に示すような医学学習用の人体解剖模型を例にとって考えてみたい．



図 1.1 人体解剖模型の一部．

人体解剖模型は複雑な形状を持つ内臓の位置関係や形状，大きさを学習するのに役立つとして長く教材として用いられてきた実績を持つ．解剖模型を使用した学習という作業は，解剖模型を詳細に観察し，見たい側がよく見えるように模型自体を手を使って自由自在に回し，再び観察する，という繰り返しによって成り立っている．加えて，大きさや形状は指先の触覚を通じても知覚され，強い印象として残る．これらが，人体解剖模型が学習に効果がある理由のひとつであるといえる．

したがって，仮想空間での作業においても

- (1) 自由な方向からの観察．
- (2) 手を使った自在な物体操作．
- (3) 視覚と触覚の連携による形状の知覚．

の3点が，効果的な手元作業を実現するために重要な要素であるといえる．

加えて，違和感の無い作業を保証するためには，手などとバーチャル物体との隠蔽矛盾や，輻輳と焦点調節の齟齬がないことが望まれる．しかしながら，従来から長く研究されてきた HMD や IPT（没入型スクリーン投影技術）等，没入型の視覚ディスプレイは，以降の節で述べる理由により，必ずしも，上記要件を満たすようなシステムの構築に適していない．

1.2 VR,MR における視覚ディスプレイの分類

ここで、VR / MR に従来から用いられている代表的な視覚ディスプレイを紹介し、その特徴を簡単に述べておきたい。

1.2.1 HMD

使用者の視界を覆うように装着し、仮想世界を表示するのに用いられるデバイスである。HMD は近年、ゲーム用途などにも製品化され、安価な物も登場している。

HMD には、閉鎖型 HMD と、表示画像を実風景に合成して見ることが可能なシースルー HMD がある。シースルー HMD には、光学シースルー HMD、ビデオシースルー HMD とがあり [5]、それぞれ一長一短がある。

ビデオシースルー HMD は通常、HMD に内蔵されたカメラの映像を装着者が観察することで実際に周囲の風景を見ている感覚を得ることができる。映像にコンピュータが介入することで、バーチャル物体を配置することが可能で、画像処理などの技術を組み合わせることで、形状や色、質感は自由にコントロール可能であるが、現状のシステムでは多くの場合、撮影から表示までに 1/30 秒かそれ以上の遅れが生じ、特に首振り時には、世界が揺れるような違和感を装着者に与える。

光学シースルー HMD では、ハーフミラーなどを用いて実風景を見ることが可能であり、周囲の風景の遅れは生じないが、バーチャル物体が実風景との間にずれが生じる問題がある。

以上のように、HMD は没入型の仮想空間を容易に構成できるが、頭部運動時の表示の遅れによる表示のずれが根本的な問題としてある。

1.2.2 IPT

プロジェクタと大型のスクリーンを有し、観察者の視野を完全に覆うように設置した没入型の映像提示装置である。観察者を囲むようにスクリーンを箱状に配置することで、見回が可能な仮想世界を提示することが可能である。

特に大型の IPT 装置として、CAVE, CABIN, COSMOS が等がある。図 1.2 は、東京大学 IML に設置されている CABIN[6][7]の使用風景である。



図 1.2 CABIN(東京大学 IML).

IPT は見回し動作の際の画像遅れによる影響がほとんどなく、視界が完全に覆われるため非常に高い没入感が得られるが、装置の規模が大きくなり、大変高価であるという問題がある。

1.3 従来法の問題と解決

バーチャル環境内における手元での作業において、提示されるバーチャル物体の形状をいかに正確に理解し、いかに素早く操作を行えるかが重要である。

本節では、

(1) 自然な観察を実現する表示系

(2) 自然な操作を実現する入力系

の2点について従来法の持つ問題点を述べ、この問題を解決すべく、本章の最後で新たなディスプレイの構成法を提案する。

1.3.1 表示における従来法の問題

仮想世界での作業において、手などを使った自然なインタラクションを阻害する要因のひとつに、手とバーチャル物体との隠蔽関係が正しく表現されない隠蔽矛盾や、輻輳と焦点調節の齟齬がある。

図 1.3 に隠蔽矛盾の例を示す。

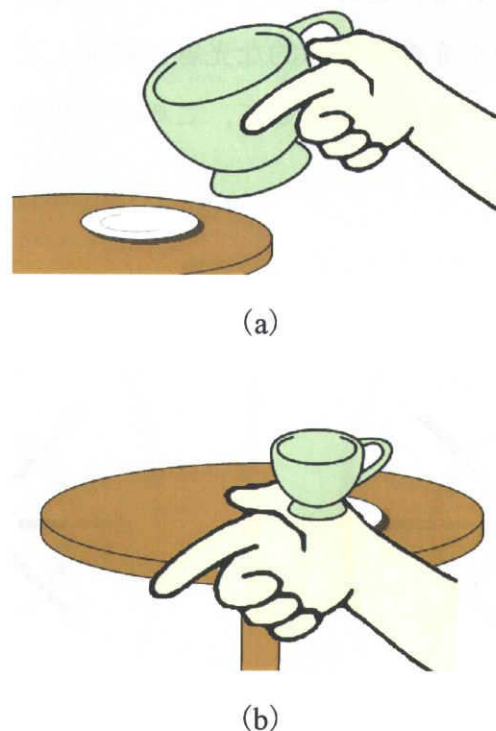


図 1.3 隠蔽矛盾の生じている提示例

バーチャルなティーカップを提示した場合に、(a)はバーチャル物体であるティーカ

ップが実体の手よりも手前に表示できない例，(b)はテーブル置かれたはずのティーカップが手前に描かれてしまう例である．

輻輳と焦点調節の齟齬は，バーチャル物体が存在する位置までの距離と実際のスクリーンまでの距離が異なる際に生じ，輻輳（両眼の視線のなす角度）と焦点調節の連動]が妨げられ[8]，両眼立体視の融像困難をもたらすとされている．

隠蔽矛盾や焦点調節の齟齬が生じると，一時的に作業者はバーチャル物体と実物体との位置関係がつかめず困惑することになり，円滑な作業を阻害する要因になってしまう．さらに焦点調節の齟齬は眼精疲労や VR 酔いの原因ともなる．

そもそも，VR における感覚の提示とは，人間が外界から受け取る様々な物理量を，何らかの方法で人工的なものに置換することであるといえる．視覚ディスプレイに限定すれば，眼球の前にスクリーンすなわち“視覚置換面”を置き視界を遮るとともに代わりの光線を発生させてユーザの目に送っている．このような視覚の置換の様子を図 1.4 に示している．従来からある HMD や IPT は視点（眼球）を中心に周囲を視覚置換面で覆う構成のいわば視点中心型のディスプレイである．

近年，提示すべきバーチャル物体の近傍に，適当な実物体を配置し，それをスクリーンとする手法が提案されている．この方法では，バーチャル物体を中心とした視覚置換面により，物体から出ていく光線を仮想的な光線に置換している．HMD や IPD などが視点中心型のディスプレイであるのに対して，この方法は物体中心型とすることができる．

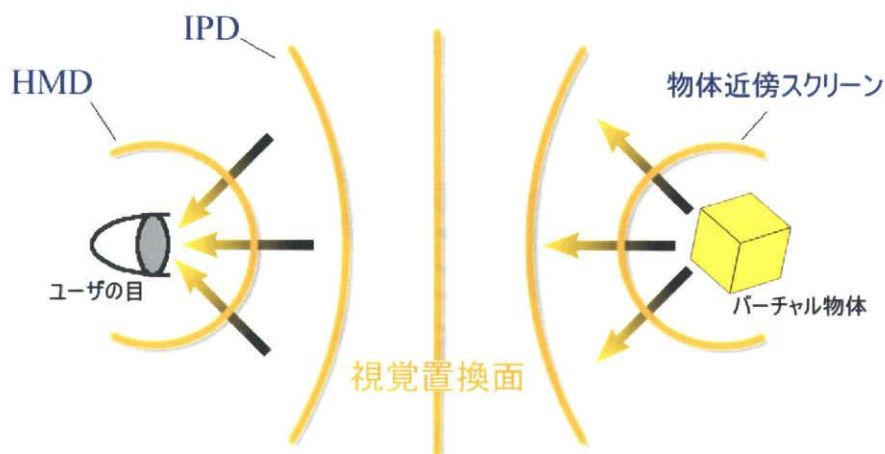


図 1.4 映像提示デバイスの視覚置換面の配置の違い．

物体から出ていく光線を仮想的な光線に置換する物体指向型のディスプレイの例として、稲見らは、プロジェクターと再帰性反射材による「MEDIA X'tal」[9]や、小型の液晶画面を立方体に貼り合わせたディスプレイ「MEDIA³」[10]を提案している。



図 1.5 MEDIA³.

1.3.2 物体近傍での表示による解決

隠蔽矛盾および、輻輳と焦点調節の齟齬の問題は、視覚置換面が仮想物体のあるべき距離と異なっているために生じる問題である。したがって、バーチャル物体近傍に視覚置換面を配置方法をとることで、解決が可能である。

バーチャル物体の近傍に表示面を設置する手法のバリエーションを図 1.6 に示す。

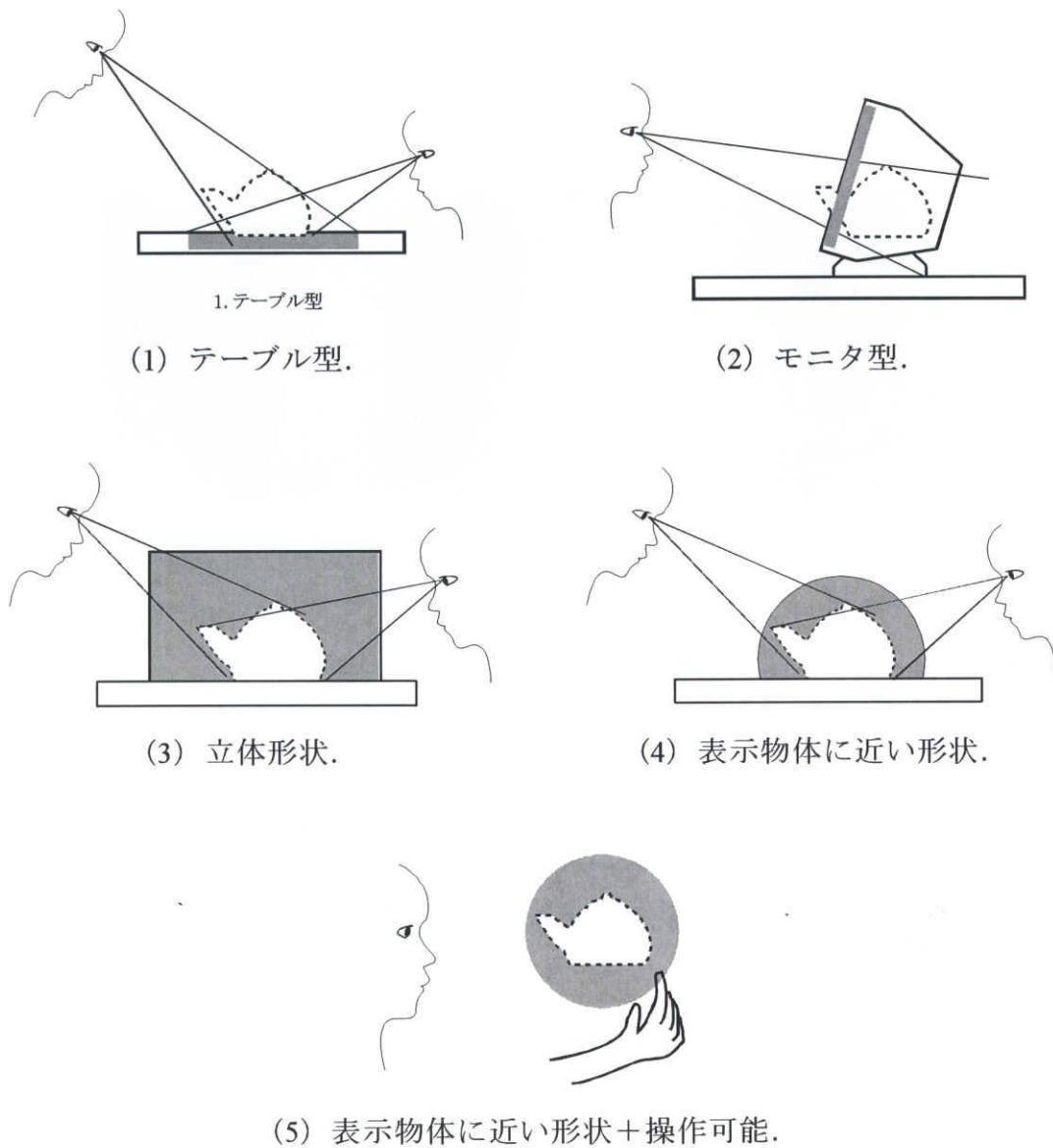


図 1.6 手元作業型アプリケーションにおける表示面の配置.

(1)は、テーブルにスクリーン(表示面)を配置したものである。様々な方向から映像が観察でき、視点に応じて映像を変化させることで、背面に回って観察が可能となる。ただし、仮想物体に高さがある場合、スクリーンからはみ出てしまうことが多く、同じ大きさのバーチャル物体を表示するためにほかの手法よりも大きなスクリーンが必要である。

(2)は、モニタ式で、CADなどの標準的な構成である。高精細な映像提示が期待できるが、映像は正面方向のみから観察可能であり、背面をみるためにはマウスなどの別の

デバイスにより操作する必要が生じる

(3) はスクリーンを立体形状にしたものである。このスクリーンはバーチャル物体を包み込むように配置されているので、映像はスクリーンからはみ出ることがなく、任意の方向からバーチャル物体を観察可能であり、さらに視覚的な隠蔽関係も基本的に保たれる。しかし、スクリーンの形状と、表示するバーチャル物体の形状との関連性は薄い。

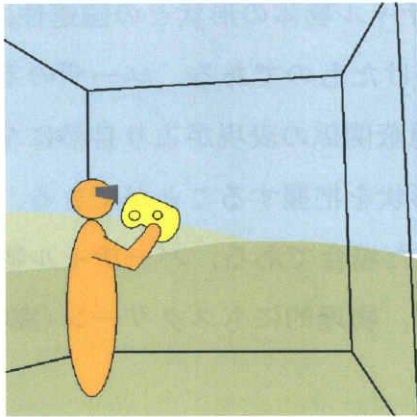
(4) はスクリーンの形状をバーチャル物体に近づけたものである。ユーザの手や任意の物体をバーチャル物体より遠くにおいたときの隠蔽関係の表現がより自然になっている。また、視覚のみならず触覚を通じても物体の形状を把握することができる。

(5) は、立体形状のスクリーンを手持ち可能とした場合である。バーチャル物体に対し物体操作(Object Manipulation)を行おうとすれば、物理的にもスクリーン(実物体)そのものが操作される。

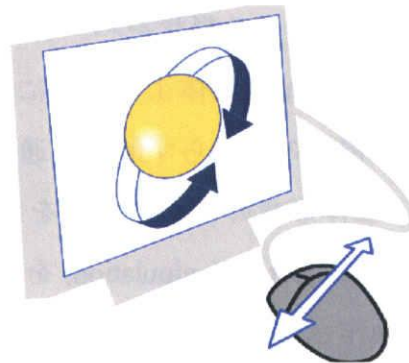
以上のように、手元での作業を仮想的に行う際には、表示したいバーチャル物体の近傍に映像提示面を配置することが、隠蔽矛盾や、輻輳と焦点調節の齟齬および、頭部運動による表示ずれを改善する一つの有効な手段であるといえる。

1.3.3 操作入力における従来法の問題

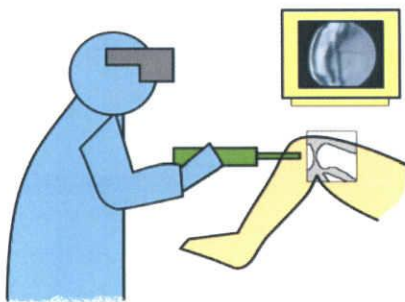
HMD や IPT において、仮想空間に配置された対象物体に対して何らかのインタラクションを行うためには、特別な入力装置が必要である。



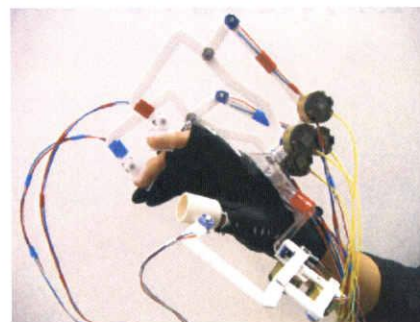
(A1) コントローラ型



(A2) マウス操作



(B) 道具型



(C) 装着型

図 1.7 手先での仮想物体操作デバイスのバリエーション

バーチャル物体に対して操作を行う手段のバリエーションを図 1.7 に示す。図の (A1)、(A2) は直接操作を別の入力方式で代用した物である。(A1) は、ゲーム用等のコントローラを使用するものであり、システムの構築が容易な反面、操作方法をあらかじめ学ぶ必要があり、直感的とはいえない。(A2) は CRT モニタとマウスでの操作である。PC 上で物体を扱う最も標準的な構成といえるが、(A1) 同様に非直感的で、複雑な操作にはキーボード入力を組み合わせる必要もありうる。

(B) は道具型のインタラクションである、元々道具を介して行う作業ならば、その道具を模したインタフェースを使用することで、違和感のない作業を仮想的に行うことが

できる。ただし、手のひらや指先が対象に直接接触するような作業には適用不可である。

(C)は装着型力覚フィードバック装置を用いたものである。大がかりな装置が必要となり、シースルー HMD や IPD との組み合わせ時にはユーザの視界をさえぎってしまう恐れがある。また機構の限界により、また、物体の形や重さを正しく表現したり、それに対して微妙な操作を行ったりできるほどには至っていない。

1.3.4 実物体を用いた入力操作による解決

先の問題点に対する解決法として、バーチャル物体を代表する実物体を用意することで、触覚と操作を実現する手法がある（図 1.8）。

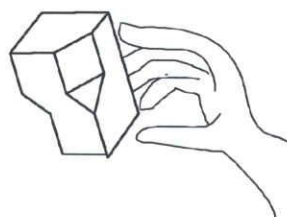


図 1.8 実物体を使用したインタラクション

石井らによる、Tangible Bits や Illumunating light などのシステムは、図 1.9 に示すようにテーブルをスクリーンとして仮想世界を提示しており、構成は IPT に類似しているが、テーブル上に実物体のガジェットを配置し、それら対応する仮想物体の映像を机の上に投影している。ユーザは、実物体を操作することで、バーチャルなものに対してインタラクションを行うことが可能となっている。

操作対象はバーチャル物体であっても、実際に手に触れるのは実物体であるので、日常の指先の感覚をそのまま適用して、微妙な指先の加減を使った操作が可能である。



図 1.9 Tangible Bits.

1.4 オブジェクト指向ディスプレイの提案

身体近傍での作業などに適したインタラクション用のデバイスの新しい構成法として、稲見らは、オブジェクト指向ディスプレイという概念を近年、示している[11]。オブジェクト指向ディスプレイとは、表示するバーチャル物体を包み込むようにスクリーン(映像提示面)を配置し、スクリーン自体を物体操作(Object Manipulation)可能なディスプレイである。

前節までで述べたとおり、CRT や、HMD, IPD など従来のデバイスで手元での作業を仮想化するアプリケーションを実装するには、1 つめの問題として、隠蔽矛盾、輻輳と焦点調節の齟齬、首振り時の計測誤差による表示の不整合の問題があり、2 つ目の問題として直接的な入力を行うために別のデバイスが必要とされることがある。

1 つ目の問題は、バーチャル物体の近傍に包み込むようにスクリーンをおくことで、2 つ目の問題は、バーチャル物体を代表する実物体をおくことで、それぞれ解決する。オブジェクト指向ディスプレイは、この両方を同時に満たすものであるといえる。

オブジェクト指向ディスプレイを用いたアプリケーションでは、直接手を使ってスクリーンを動かすという操作が、バーチャル物体に対する操作に変換されるので、被験者は日常生活で手を使う感覚そのままに、バーチャル物体に触れたり、それを動かしたりすることが可能となる。

前ページの(4)で示したような自由曲面形状の実物体を用いる場合には、実物体を映像投影用のスクリーンとし、外側から映像を映す方法や、小型プロジェクタを内蔵する方法、あるいは、小型の液晶パネルを貼り合わせるなどの方法が考えられるが、現在の技術では、フロントプロジェクションがスクリーンの軽量化、形状の自由度などの点で、最も現実的な手法の一つと考えられる。

1.5 オブジェクト指向ディスプレイの特性と位置づけ

以上のようにオブジェクト指向ディスプレイという概念が示された。ここで、仮想空間中で手元での作業を行う場合の、オブジェクト指向ディスプレイの特徴を代表的な映像提示デバイスとである HMD, IPT や CRT と比較しつつ改めて示したい。以下に、(3) 隠蔽関係の矛盾、(4) 両眼の輻輳角と焦点の齟齬、(5) 頭部計測精度の影響、(6) 物体操作時における視・触覚の一致性、の4点について述べる。

1.5.1 隠蔽矛盾の解消

被験者の付近にバーチャル物体を配置すると、手を伸ばした際に、対象バーチャル物体より遠くにあるはず手が、バーチャル物体の映像を覆ってしまうような現象が起きる。この現象は、しばしば、被験者に違和感を与えると同時に、空間的位置関係の理解を阻害する要因となる。

HMD はビデオシースルーであれば、隠蔽矛盾の問題はある程度は回避できているが、かなり複雑な手順が必要になる[12][13]。光学シースルーではさらに困難である。オブジェクト指向ディスプレイは、提示面が常にバーチャル物体とともにあるので提示面とバーチャル物体の形状が大きく異ならない限りは、原理的に隠蔽矛盾は生じない。

1.5.2 輻輳と焦点調節の齟齬の改善

IPD ではスクリーンは通常、視点から 1 ～ 3m の一定の位置にあるように設置され、また HMD では、視点からの光学的距離が 1 ～ 2m に固定されている。両眼視を行う際、両眼の視線のなす角度を輻輳角という。人間の目は、輻輳角により物体までの距離を予測し、輻輳角に連動して水晶体調節を行いその距離に焦点を合わせよする。水晶体調節が距離の感覚に働くのは 2m までとされているため視点から 60cm 程度以下の手の届く距離にバーチャル物体を提示しようとした場合、輻輳と焦点調節の齟齬が無視できず両眼での融像さえ困難となる可能性がある。それを解決するためには可変焦点式 HMD 等の複雑な機構が必要となってしまう。

オブジェクト指向ディスプレイでは、常に物体近傍にスクリーンが置かれるため、完全ではないものの輻輳と焦点調節の齟齬が改善される。

1.5.3 頭部計測精度の影響の軽減

MR において、実物体と仮想物体(映像)とを重畳する際の位置合わせは基本的かつ重要な問題である。光学シースルー HMD (Head Mounted Display) あるいは ビデオシース

ルー HMD において、表示ずれは主に頭部回転の計測誤差に起因しており、その検証や校正の手法は多く研究されている[14][15][16]。しかし、特に計測から表示までの遅れによる表示ずれは、解消が非常に難しい問題である。

また、CAVE などの大型スクリーンでは、頭部の計測誤差による表示ずれは、仮想物体の位置がスクリーン上であるときは 0 となり、スクリーンから離れるほど絶対値が大きくなるという特性があり、また、誤差の回転成分による影響が小さいことが知られている[17]。すなわち、表示されるバーチャル物体がスクリーンのより近傍であるほど、頭部移動時の表示の誤差は少ない。

スクリーンがバーチャル物体の近傍に配置されるオブジェクト指向ディスプレイは、頭部計測誤差による表示のずれが表れにくい構成であるといえる。

1.5.4 実物体と映像の一体化による視・触覚の一致

HMD、IPT の場合、バーチャル物体に触れたり、動かしたりする場合には、別の要素技術が必要で、力覚を提示したりするには、大がかりな装置が手元に必要となる。特に、IPT の場合はそれが視界を遮る場合があり不都合が生じる。

オブジェクト指向ディスプレイではバーチャル物体が常に実物体のスクリーンとともにあるので、視・触覚の一致が確実に保たれ、さらにスクリーンに対する操作がそのままバーチャル物体に対する操作となるため、自然な入力が可能となることから、それを適用するアプリケーションによっては、高い効果を発揮することが期待される。

1.5.5 まとめ

以上のように、オブジェクト指向ディスプレイは、身体近傍での作業において優位であると期待される。これらの利点を表 1.1 まとめた。

表 1.1 オブジェクト指向ディスプレイに期待される利点

本手法の利点	過去の議論	有効性の明らかさ
(1) 隠蔽矛盾の解消	過去に議論されている	明らか
(2) 輻輳角と焦点調節の 齟齬の解消	過去に議論されている	明らか
(3) 頭部計測誤差に対する 耐性	なされていない	第4章で議論する
(4) 実物体と映像の一体化に よる効果	なされていない	第3章で議論し、 第5, 6章で実験に より確認する

自由曲面上への投影によるディスプレイについては、このような議論はほとんどなされていない。本論文では、自由曲面ディスプレイにおける計測誤差が観察像に与える影響について検討する。

また、(4)実物体と映像の一体化による物体操作時における効果として、自然な観察、自然な操作、それらを含んだ立体形状のより正確な理解が期待できる。しかし、現在まで、このような効果について、議論されたことはほとんど無い。また、この効果が現れるには、アプリケーションやコンテンツの設計も密接に関わってくるので、それらの設計指針も含めて議論し、その効用を確認する必要がある。

1.6 本論文の目的

本研究の目的は、オブジェクト指向ディスプレイが有している主たる有効性のうち、これまで明確な評価がなされていない、実物体と映像の一体化に起因する効果について、実機を使用した実験を行うことにより、立体形状把握性能の向上と操作性の向上の面から有効性を明らかにすることである。

以上の目的のため、オブジェクト指向ディスプレイの一形態である自由曲面投影ディスプレイを提案、実装方法を示すとともに、システムの校正手法について検討する。以上に基き、意味のある実験が行えるだけの性能を有するシステムを実装する。そして実機を使用した実験によってオブジェクト指向ディスプレイの有効性を検証する。

1.7 本論文の構成

本章では、仮想的な手元作業を実現するデバイスについて周辺技術に関する背景と問題点を述べ、オブジェクト指向ディスプレイを導入した。

第2章では、オブジェクト指向ディスプレイの実現方法として、自由曲面投影ディスプレイを紹介し、続く第3章ではこれを用いたアプリケーションの構築について述べる。

第4章では、自由曲面投影ディスプレイを用いたアプリケーションの実装例としてバーチャル解剖模型を構築、また表示精度について調査し、校正手法を示す。

第5章・第6章では、本システムを用いた評価実験について述べる。第7章では、考察と展望、および本論文の結論を述べる。

第 2 章 自由曲面投影ディスプレイ

本章では、オブジェクト指向ディスプレイを実現するために、自由曲面投影ディスプレイ[1][2]を提案し、その構成法を述べる。

2.1 曲面をスクリーンとする投影型ディスプレイ

プロジェクタを用いた投影型の画像提示は、近年の MR 分野で盛んに用いられるようになった方法である。MR においては、実空間中にバーチャル物体を挿入する手法が重要であるが、投影を用いることによって、壁や机、床といった様々な場所に自在にバーチャル物体を点在させることができるためである。

たとえば、プロジェクションされた仮想物体と周りの実物体とを強く関連付けて作業を行うようなシステムは、石井ら[18]暦本ら[19]によるものをはじめとしてさまざまなものが提案されている。しかし、その多くは机のような平面をスクリーンとして利用するものである。

一般に、自由曲面上に投影された映像は、歪みを伴って観察される。この歪みは、観察者の視点位置、プロジェクタの位置・方向、および、スクリーンの位置・姿勢に由来して生じる。通常、仮想環境を CG で提示する場合、観察者の位置から見えるべき仮想空間をレンダリングして映像を生成し、これが観察者の網膜像となるように提示する。しかし、投影歪みが生じる環境では、そのまま投射したのでは正しい網膜像が観察されないため、あらかじめ画像を変形することにより歪みをキャンセルする必要がある。また、観察者やスクリーンが移動する場合は、画像変形のさせ方も動的に変化する必要がある。スクリーンが平面であれば、視体積の設定等により単純に補正が可能であるが、自由曲面形状を持つスクリーンの歪み補正は複雑で困難である。

一方、没入型投影ディスプレイでは、カーブを持ったスクリーンへの歪みのない投影が研究されている[20][21]。これらは、PC 内での画像の非線形な変形やプロジェクタ内蔵の微調整機能などを用いて、曲面での投影歪みをキャンセルしているが、この方法では、正しい映像が観察できる視点位置は、たとえばスクリーン正面中央といった一点に限られる。従って、この構成では視点移動による運動視が実現できない。

手に持って操作できる任意形状の実物体をスクリーンとして用いる表示法は、PHMD (Projection-HMD; 投影式頭部搭載型ディスプレイ) 等を用いて実現可能である[22][23][24]。PHMD は、視点とプロジェクタの焦点を共役にすることで任意形状のスクリーン上への投影歪みのない表示を可能としている[25]。複雑な起伏をもつ人体(人形)に体内情報を重畳表示して、教育や手術計画に用いるシステムは PHMD を用いたものはいくつか提案されている[26](図 2.1)[27]が、たとえば天井からの投影のように、視点位置と異なる位置からのプロジェクションによってオブジェクト指向ディスプレイを構成する場合は、自由曲面形状のスクリーンの使用は困難であった。Raskar らは、“Office of the Future project”でスクリーンの起伏による歪みをキャンセルする映像を 2-pass レンダリングによって生成する手法を提案し[28]、凹凸のある壁面への映像投影を行っている[29](図 2.2)。

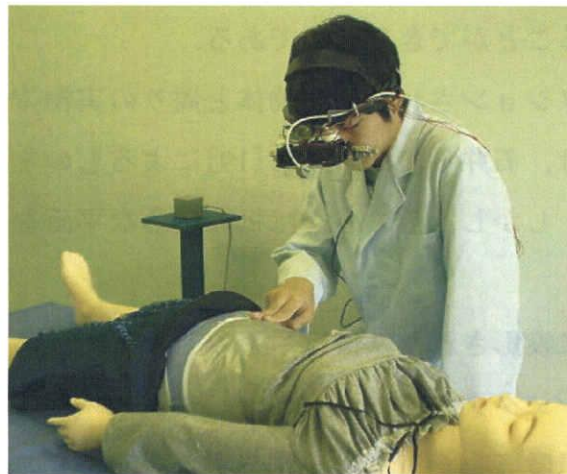


図 2.1 PHMD による医療シミュレータ.



図 2.2 壁面への映像投影 (Office of the Future Project).

2.2 自由曲面投影ディスプレイの提案

本論文では、既知の自由曲面で構成される物体(スクリーン)に映像を歪みなく投影、表示する手段を導入し、オブジェクト指向ディスプレイを実現する。これを自由曲面投影ディスプレイ(**Free-Form Projection Display**)と名付け、以下、**FFPD** と呼ぶことにする。

FFPD を特徴づける最も重要な要素技術は、投影歪みのキャンセルである。**FFPD** では双対レンダリング[3]と名づけている手法で投影歪みのキャンセルを行い、自由曲面への映像の重畳を実現する。

なお、双対レンダリングの原理自体は、Fuchs ら[28]が用いており、新規の技術ではないが、Fuchs らの実装は、壁面のような固定されたものに映すものであり、あくまで没入型の (**Immersive**)ディスプレイとして利用しているのに対して、本章で示す手法は、自由に動かせる実物体をスクリーンとして用いている点が異なっている。画像が実物体スクリーンに重なっている(埋め込まれている)状態を表現可能かつ、手で持って、スクリーンをバーチャル物体と一緒に動かせるという独自性を持つ。

2.3 FFPD の歪み補正手法

曲面上に歪みなく画像を投影するレンダリング手法について以下に述べる.

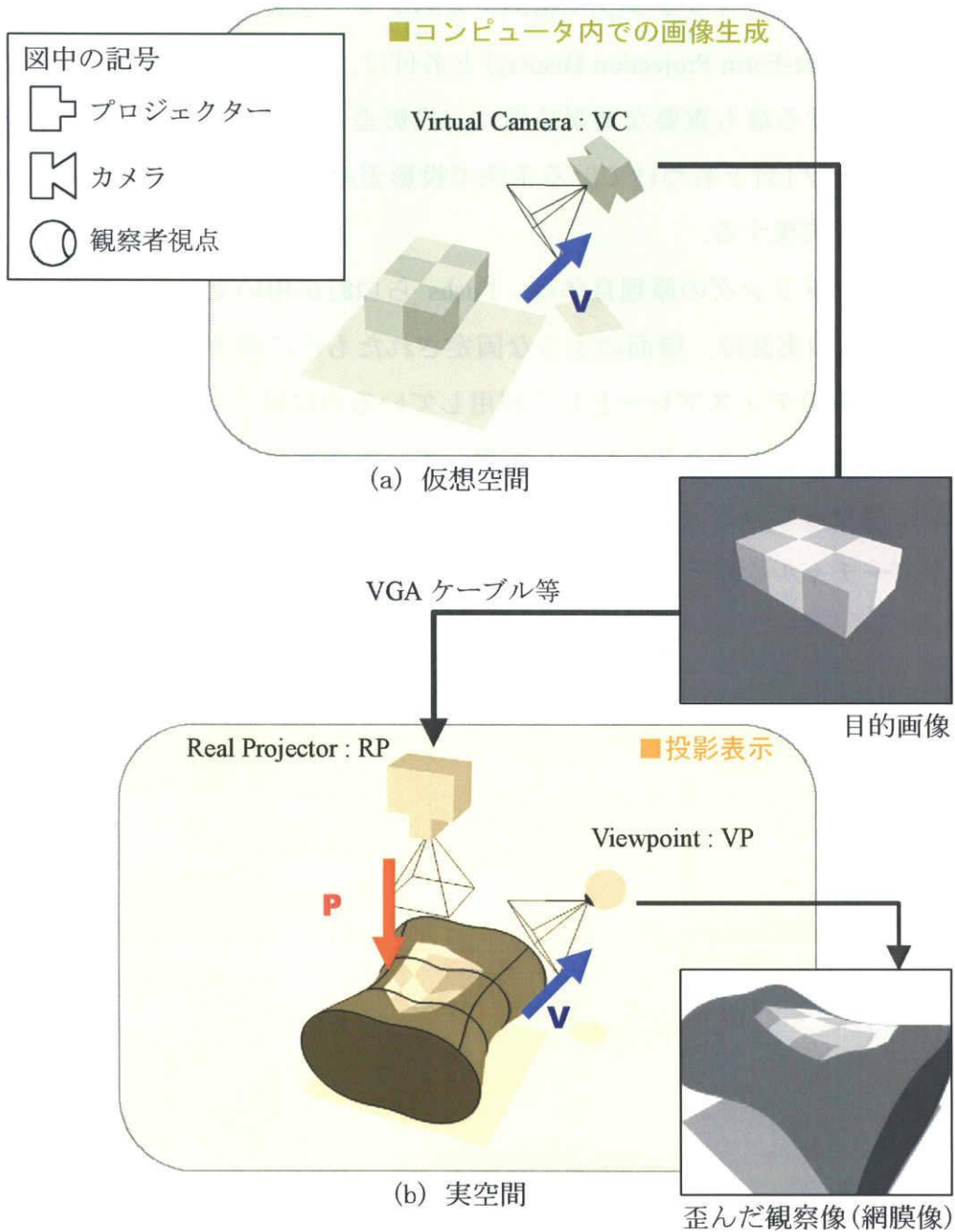


図 2.3 歪み補正を用いない投影表示の構成.

図 2.3 は一般的な MR システムにおける CG 表示手順を示している. 3 次元位置センサなどにより計測される視点位置に追従してコンピュータ内では, 仮想空間内にカメラモデル VC が設定される.

VC に視点を置いて (a) 仮想空間内の物体をレンダリングし, その結果, 観察されるべき “目的画像” が得られる. この画像がプロジェクタへ送られ (b) 実空間でスクリーンに投影されるが, スクリーンが曲面であると, 観察者が見る像は歪んだものになる. 正しい像が観察されるためには, レンダリングした画像にあらかじめ補正を施し, 歪みをキャンセルする必要がある.

図中の P は投影変換, V は透視変換であり, P と V の逆変換を求めてこれを施せば歪み補正が可能となるが, スクリーンが平面でない場合には P , V はともに複雑で非線形な変換となるため, 直接に逆変換を求めることは困難である.

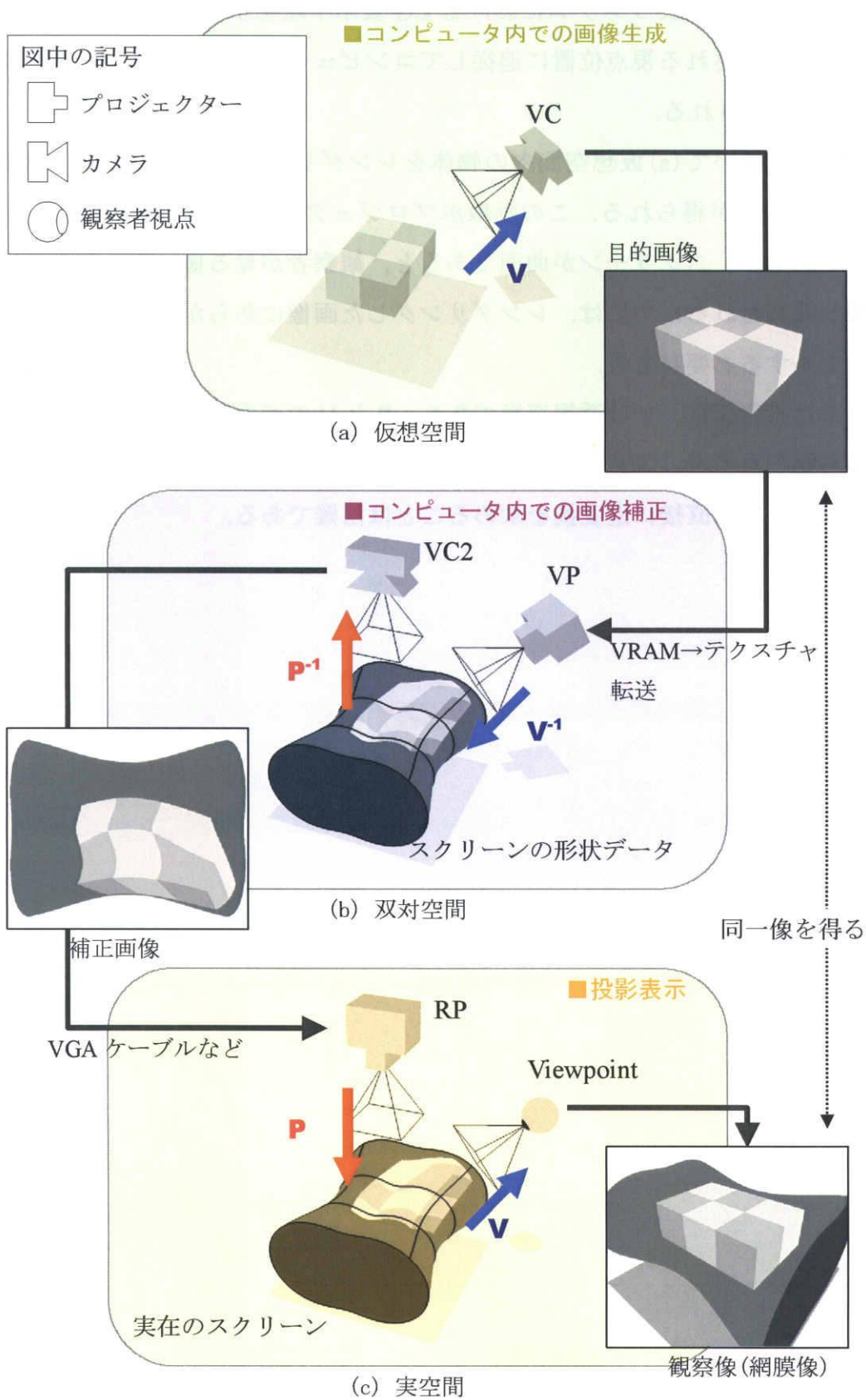


図 2.4 双対レンダリング概念図.

ここで、図 2.4 に示すように、(a)仮想空間と(c)実空間との間に(b)双対空間を設定する。双対空間はレンダリング時にコンピュータ内に想定される第2の仮想空間であり、他の空間と同様にプロジェクタ VP、カメラ VC2 が配置されているが、カメラとプロジェクタとが入れ替わっている。また、実空間のスクリーンと同一形状のスクリーンモデルが置かれている。実世界のスクリーンは3次元位置センサにより計測され、同じ位置、姿勢で双対空間に配置されている。そこで、双対空間での透視投影変換は、 $V^1 \cdot P^1$ となり、実空間での投影歪みの $V \cdot P$ とちょうど逆変換の関係となっている。

仮想空間をレンダリングして被験者の網膜に届けるべき映像を得ると、それをそのまま出力せずに、コンピュータ内に想定された双対空間へ送り、VP、VC2 を経てこの画像をゆがませる。結果として得られた補正画像はコンピュータから VGA 出力などのインタフェースにより出力されプロジェクタに送られ投影される。正しい視点から観察すると、投影歪みが相殺され、歪みのない観察像が得られる。以上が双対レンダリングの手順である。[3]

2.4 実装手順

双対レンダリングの全ての手順は OpenGL という 3DCG では一般的なグラフィックスライブラリの機能を組み合わせることで実装でき、近年、発達が著しいグラフィックスハードウェア(GPU 等)を用いて高速な実行が可能である。

画像の変形は、テクスチャマッピングを応用することで実現される。テクスチャマッピングは、コンピュータで画面上に Polygon(多角形)を描画する際に、あらかじめ指定したビットマップデータを多角形の頂点に沿うように引き延ばして貼り付けるレンダリング技法である。多くの場合テクスチャマッピングは、CG で描かれる物体表面に質感を与えるために利用される機能であるが、ビットマップデータを高速に任意の形状にゆがめる操作へ転用できる。たとえば、曲面に映像を投影するタイプの IPD では映像の球面補正を行うために、あらかじめ変換テーブルを持ち、CG をゆがめて表示するシステムや、そのほかにも高速な画像変形をおこなう手段として多く応用されている実績がある[30]。

以下、参考のため、レンダリング手順をソースコード形式で示す。ただし C 言語、OpenGL[31][32]の API(Application Program Interface)を使用したプログラムコードであり、一部の変数宣言等を省略してある。


```

{ // STEP1 : 網膜像をオフスクリーンでレンダリングする

    glDrawBuffer( GL_BACK );                // ダブルバッファリングが有効ならば、この行は不要

    glViewport( _x, _y, _width, _height );    // 最初のレンダリング画像サイズを指定する

    glClearColor( 0.0, 0.0, 0.0, 0 );
    glClear( GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT );

    glMatrixMode( GL_PROJECTION );
    glLoadIdentity();
    gluPerspective( fovy, 1, 1, 500 );                // *1

    glMatrixMode( GL_MODELVIEW );
    glLoadIdentity();
    gluLookAt( vp_pos[0], vp_pos[1], vp_pos[2],
               obj_mat[12], obj_mat[13], obj_mat[14],
               0, 1, 0 );                // *2
    glMultMatrixd( obj_mat );                // *3
    // ※ obj_mat は計測されたスクリーン(=バーチャル物体)の位置・姿勢行列

    drawVirtualObject();                // バーチャル物体をレンダリングする
}

{ // STEP2 : プロジェクションテクスチャを設定する.
    float param_s[4] = {1, 0, 0, 0};
    float param_t[4] = {0, 1, 0, 0};
    float param_r[4] = {0, 0, 1, 0};
    float param_q[4] = {0, 0, 0, 1};

    glCopyTexImage2D( GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGBA, _x, _y, _width, _height, 0 );
    // STEP 1 で作成した画像をテクスチャとして使用可能にする

    glMatrixMode( GL_TEXTURE );
    glLoadIdentity();

    glTranslatef( 0.5, 0.5, 0.0 );
    glScalef( 0.5, 0.5, 1.0 );

    gluPerspective( fovy, 1, 1, 500 );                // *1 と同じ数値を指定
    gluLookAt( vp_pos[0], vp_pos[1], vp_pos[2],
               obj_mat[12], obj_mat[13], obj_mat[14],
               0, 1, 0 );                // *2 と同じ数値を指定
    glMultMatrixd( obj_mat );                // *3 と同じ数値を指定

    glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_CLAMP );
    glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_CLAMP );
    glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR );
    glTexParameteri( GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_LINEAR );
}

```

```

glTexGeni(GL_S, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_OBJECT_LINEAR);
glTexGeni(GL_T, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_OBJECT_LINEAR);
glTexGeni(GL_R, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_OBJECT_LINEAR);
glTexGeni(GL_Q, GL_TEXTURE_GEN_MODE, GL_OBJECT_LINEAR);

glTexGenfv(GL_S, GL_OBJECT_PLANE, param_s);
glTexGenfv(GL_T, GL_OBJECT_PLANE, param_t);
glTexGenfv(GL_R, GL_OBJECT_PLANE, param_r);
glTexGenfv(GL_Q, GL_OBJECT_PLANE, param_q);

glEnable(GL_TEXTURE_GEN_S);
glEnable(GL_TEXTURE_GEN_T);
glEnable(GL_TEXTURE_GEN_R);
glEnable(GL_TEXTURE_GEN_Q);

glEnable(GL_TEXTURE_2D);
}

{ // step3: スクリーンにテクスチャプロジェクションを施したものをレンダリングする
glViewport(0, 0, window_width, window_height);

glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

glMatrixMode(GL_PROJECTION);
glLoadIdentity();

glFrustum(prj_l, prj_r, prj_b, prj_t, prj_n, prj_f);
// プロジェクタの投影画角などのパラメータを視錐台として指定する

glMatrixMode(GL_MODELVIEW);
glLoadIdentity();

gluLookAt(prj_mat[12], prj_mat[13], prj_mat[14],
prj_mat[12] + prj_mat[8], prj_mat[13] + prj_mat[9], prj_mat[14] + prj_mat[10],
prj_mat[4], prj_mat[5], prj_mat[6]);
// ※ prj_mat はプロジェクタの位置・姿勢を表す行列である
// プロジェクタの設置位置と姿勢(移動する場合は逐次変化する位置姿勢)を指定する
glMultMatrixd(obj_mat);

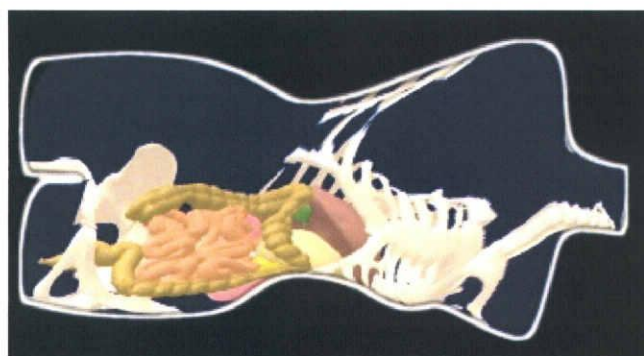
drawScreenSurface();

glutSwapBuffers(); // レンダリング終了.
// 完成した画像を全面に移し、画面に表示する.
// コンピュータから出力された映像は、プロジェクタでしかるべき場所に
// 投影され、自由曲面投影が完了する.
}

```

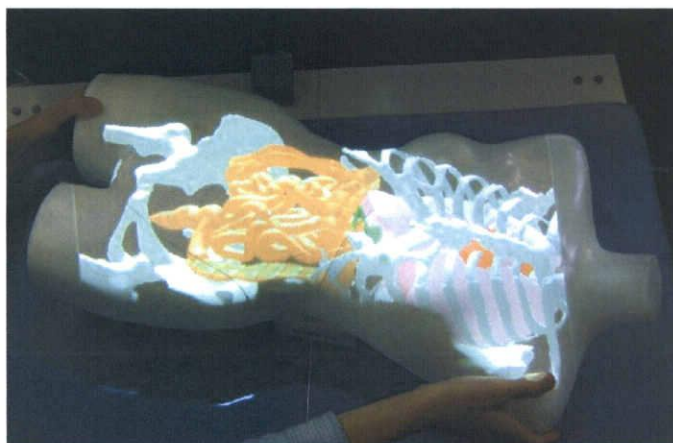
最後に、FFPDにおける、PCでのレンダリング画像と投影された結果を図 2.5 に示す。画像は、第4章で述べるバーチャル解剖模型のものである。

本手法で歪み補正が施された結果画像(1)が、プロジェクタに入力され曲面に投影されることにより、観察者の視点から見ると、正しい画像(2)として観察されていることを確認した。



(1) レンダリング結果画像

↓ 投影



(2) 投影結果 (正しい観察像)

図 2.5 FFPD による重畳表示例。

第 3 章 FFPD の特徴

前章で、オブジェクト指向ディスプレイの一形態である FFPD(自由曲面投影ディスプレイ)が導入された。

FFPD は、実物体を手にとって直接的に扱うことで、仮想物体を手にとることを可能にする、独特のインタラクションのスタイルを実現する。ただし、FFPD は本質的には単なるディスプレイであるので、このような効果的なインタラクションは、アプリケーションや表示するコンテンツが適切に設計されている必要があることは明らかである。アプリケーションやコンテンツの設計指針について本章で議論する。

3.1 FFPD での立体知覚

本論文で構築する FFPD は片目に覆いをして単眼視での使用を前提にしている。単眼視では、視覚による立体知覚のうち、両眼視差によって得られるはずの奥行き情報の成分に代わって運動視差による奥行き情報の成分が優位となる。観察者の動きに追従して正しく映像が更新されれば、観察者は運動立体視により、物理的には映像は物体の表面に張り付いているにもかかわらず、バーチャルな立体感や奥行きを知覚する。

運動視とは、観察対象に対して観察者自身が動くか、あるいは、一定の速度で並進または回転している対象を観察することによって、対象の見かけの変化からその立体情報を推し量ることである。さらに、運動視と一見してよく似た効果として、対象操作による視差がある。対象物を動かしてそれに伴う見た目の変化から距離と立体構造を知るという行為であり、こちらは、視覚と運動が連動した非常に高度な認識を伴うが、対象物体の移動・回転量を自ら決めることで、より精密な推定することが可能と期待できる。

FFPD は、ほかの一般的なプロジェクタを用いた提示方法と同様に、液晶シャッタグラスでの時分割両眼立体視等が原理上可能であるが、両眼立体視の効果は IPT など従来のデバイスのものと同様である。それに対し、上記の運動視、対象操作による視差は FFPD の特徴的な機能であり、その効果が顕著に表れる構成で検証するために、本論文では、単眼による運動立体視のみを議論し、以降、両眼立体視については取り上げない。

3.2 視・触覚一致について

仮想空間での手元作業では、使用者が日常経験している物体操作の感覚をバーチャル物体操作にそのまま生かせることが重要であるから、操作に対する結果が日常の経験則に一致することが約束されなければならない。もしも、スクリーン物体に対して行った移動・回転操作と、バーチャル物体の移動・回転量が異なると、日常感覚との矛盾が生じ、自然なインタラクションを阻害する要因となる。

運動視差によって奥行き情報を得る際には、バーチャル物体の見掛けの変化だけでなく、スクリーン物体の表面との視差や、触覚によって得られるスクリーン物体の形状も手がかりの一部となる。したがって、スクリーン物体は単に表示内容と無関係な画面ではなく、意味を持った存在であるといえる。

FFPD で用いるアプリケーションやコンテンツを設計する際には、上記の点に注意しなければならない。

そこで、FFPD 上で正しく動作するアプリケーションの条件として、

- (1) バーチャル物体は、実物体のスクリーン内部に配置される。
- (2) バーチャル物体は、実物体のスクリーンに追従する。
- (3) スクリーンの形状それ自体が、コンテンツの一部として機能する。

の3点を定、以降のFFPD実装の際の指針とする。

3.3 次章以降の流れ

次章では、FFPD によるアプリケーションの実例を示すため、本章で述べた設計指針を考慮しながら、バーチャル解剖模型を試作する。具体的なアプリケーションの実例に基づいて、システムに必要な精度を決定し、計測誤差と精度の評価を行う。

システムを用いた評価実験を行うために十分な精度を得るためのキャリブレーション方法について述べる。

続いて第5、6章ではオブジェクト指向ディスプレイの有効性を確認するための評価実感を行う。それぞれ、第5章では上記設計指針に基づいたテスト用プログラムを用いて行い、第6章では、第4章で実装するバーチャル解剖模型アプリケーションを用いて行う。

第 4 章 アプリケーション実装とシステムの校正

前章で、オブジェクト指向ディスプレイの設計指針が得られた。本章では、その指針に基づき、FFPD を用いたアプリケーションの実例を示すためバーチャル解剖模型を試作する。続いてアプリケーションの実例に基づいて、システムに必要な精度を決定し、計測誤差と精度の評価を行う。また、システムのキャリブレーション方法を紹介する。

4.1 アプリケーションの実装

本節では FFPD を用いたバーチャル解剖模型の設計と実装を行う。

4.1.1 医学教育アプリケーション

筆者らはこれまでに、CG 内臓模型アプリケーションを試作した[33]。CG 内臓模型は、立体映像等を用いて、人体の解剖図等を表示し、インタラクティブな学習教材をめざし開発しているものである。コンテンツはモデリングされた内臓の CG と、症例を再現する医学教育シナリオからなり、蠕動や呼吸などをアニメーションで表示し、投薬等の入力で反応を返すなど、様々な症例を再現するインタラクティブ性を実現している。シナリオの例を表 4.1 に示す。

表 4.1 作成した医学教育シナリオ。

(1) 急性胆嚢炎	胆嚢の腫れ、神経インパルスグラフィックスで表現し、胆嚢壁の圧痛（Murphy sign）と圧痛点を学習可能とする。
(2) 急性虫垂炎	虫垂の位置と、圧痛点であるマックバーネ点の位置をグラフィックスで表現し、学習可能とする。
(3) 腹膜炎	腹部全体に激痛が見られる。心窩部の圧痛点を学習可能。

CG 内臓模型の機能の一つとして、腹部の触診学習がある。たとえば、胆嚢炎が疑われる場合の触診は、医師が圧痛点と呼ばれる特定の部位を指や手のひらを用い、およそ 1cm の精度で加圧して圧痛反応を診ることで行われる[34][35]。本アプリケーションは、

解剖学的情報の表示だけでなく、炎症を起こして激しく収縮している胆嚢のアニメーションや圧痛点のガイド(病理学的情報)、痛みのインパルスを伝える神経の走行の仕方に起因する腹痛の現われ方の違い(神経学的情報)、投薬によって収縮が治まる様子(生理学的情報)などを示すことができ、解剖模型を土台にしてさまざまな医学知識を総合的に学ぶことが可能となっている。

4.1.2 バーチャル解剖模型の実装

解剖学の教材として使用される人体解剖模型は、手で持って動かし、自由な方向から見ることができ、さらに原寸大であるため、触って大きさや形状を実感することが可能という特徴を持っている。これらが医学教材としての有効性の理由である。

FFPD はこのような CG 解剖模型における、ある内臓と周囲の内臓との位置関係や、骨格との位置関係、および体表面との位置と深さの関係といった、重要な解剖学的情報の表示に適していると考える。

すなわち、先に述べた CG 解剖模型を FFPD と組み合わせることで、

- (1) 自由な方向からの観察
- (2) 手を使った自在な物体操作
- (3) 視覚と触覚の連携による形状の深い理解

という、人体解剖模型の良さを取り入れ、かつ、CG ならではのアニメーションやインタラクティブ性による幅広い医学知識の提示も可能とするシステムを構築できると考える。

FFPD による CG 内臓表示アプリケーションをバーチャル解剖模型と名付ける。バーチャル解剖模型は、内臓をバーチャル物体として CG で表現し、体表面は実物体のスクリーンで表現する。内部に精密に一致させた内臓を定位させ、体表面を参照面にしながら内臓の奥行きや立体形状を知覚可能とする。

4.1.3 システム構成

バーチャル解剖模型のシステム構成を図 4.1 に示す。プロジェクタを地上 210cm の高さに下方に向けて設置し、人型スクリーンに向けて映像を投影する。学習者はその下に立って、映し出された映像を観察する。プロジェクタの仕様を表 4.2 に示す。

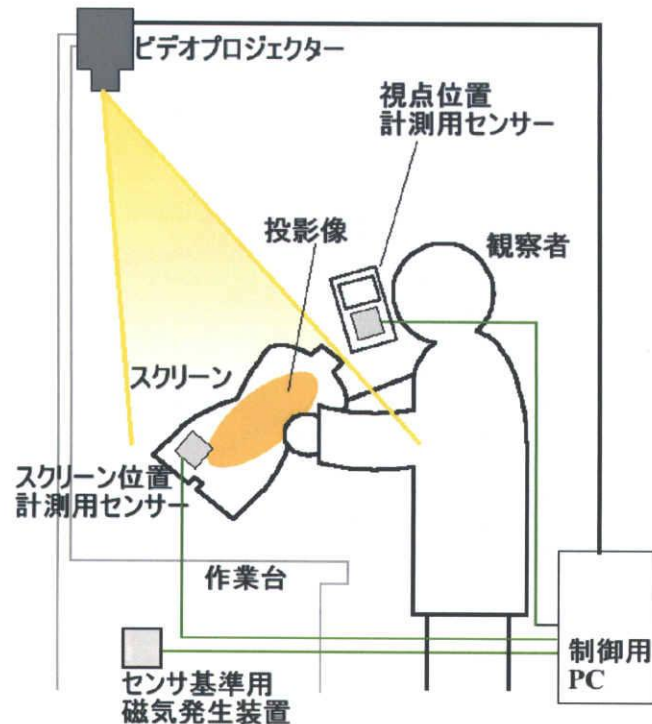


図 4.1 バーチャル解剖模型システム構成図.

表 4.2 プロジェクタ仕様.

型番	PLUS U5-232
投映方式	DLP™ 方式
DMD	1024 × 768 (SVGA)
明るさ	3000 lm (最大)
コントラスト比	2000:1
重量	2.0kg

高さ約 80cm のテーブルを設置し、人型スクリーンを置いたままでも使用できる構成にした。

学習者の視点位置、および人型スクリーンの位置・姿勢を計測するセンサとして、Polhemus 社製の磁気式 3 次元位置姿勢センサ FASTRAK(図 4.2)を用いる。トランスミッタ(磁気発生装置)をテーブルに内蔵するかたちで地上 70cm に設置し、レシーバ(受信器)を人型スクリーンと学習者の頭部とに装着している。



図 4.2 3SPACE FASTRAK 概観.

Fastrak は一個のトランスミッタと複数のレシーバから成り、トランスミッタを原点としたレシーバの位置・姿勢を計測可能なセンサである。最大半径約 3m の範囲での位置・姿勢計測が可能であり、トランスミッタ・レシーバ間の距離が 76cm 以下の範囲で最高精度が保証される[36].

スクリーンの移動範囲は精度保証範囲であり、視点は、移動によってこの範囲からはずれる可能性が高いが、それでも十分に近傍であるので、問題なしとした。

PC は、CPU : Pentium4 3.2GHz, OS : Windows 2000 で、グラフィクスボードは nVidia 社の Quadro FX 3000 を使用している。

人型スクリーンは、図 4.3、表 4.3 に示すように、人間の上半身を模した模型であり、表面を白く塗装してある。大きさは、背丈の方向に測って 67cm である。模型の形状は、Minolta 製 3 次元形状計測装置 VIVID900 を使用して、あらかじめ計測し、DXF 形式のポリゴンモデルとしてコンピュータに入力した。ポリゴンモデルの頂点数は 6000 である。

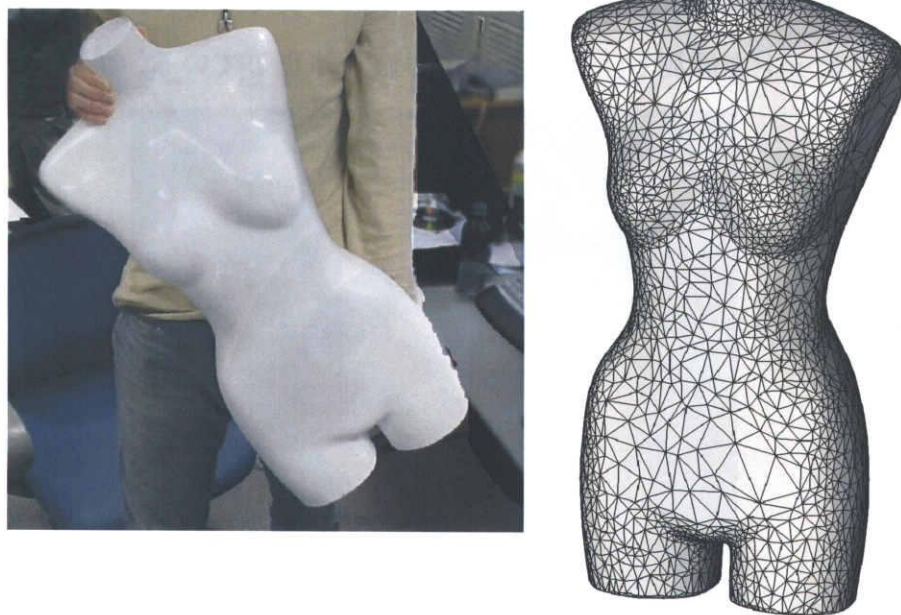


図 4.3 人型スクリーンと取り込んだモデルデータ.

表 4.3 人型スクリーン詳細

形状	人型・女性トルソ模型
色	白（ツヤ消し塗装）
材質	アクリル
全長	67cm(背丈方向)
重量	2.3kg

4.1.4 頭部計測用センサ

頭部位置計測用のセンサは図 4.4 に示すように固定具で頭部に装着する。装着位置から視点へのオフセットを計測し、センサの出力値を補正している。



図 4.4 頭部計測用センサ。

頭部位置計測および、人型スクリーン位置姿勢計測は、各レシーバあたり 60 回/sec. で計測を行い、計測データは、RS-232C 通信により、38400bps で PC へ送られる。

そのほかの寸法を図 4.5 に示す。人型スクリーンを 10cm 持ち上げたときを標準位置と決め、プロジェクタのフォーカスは標準位置に合わせて調整した。スクリーン物体を標準位置から大きく上下に移動することは想定せず、フォーカスのずれは現在考慮していない。投影範囲は標準位置で前後に 72cm、左右に 96cm であり、これより外では映像が投影できないが、投影範囲から出るほどスクリーンを移動する操作は通常必要ないため、支障はなかった。

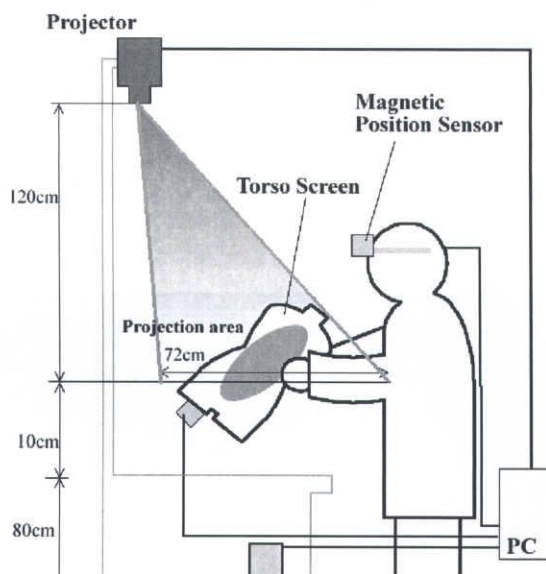


図 4.5 システム寸法図.

表示する CG 内臓は、骨格、肺、心臓、脾臓、胆嚢、および消化器等である。これらは Viewpoint 社のモデルデータ集を元に、人型スクリーンの形状に合うように配置などを調整したり、アニメーションを付け加えたりして 3 次元のポリゴンデータとして作成したものである。

4.1.5 触診トレーナ機能

模型腹部には、使用者の手指による加圧を入力として受け取るための圧力センサを内蔵し[37]、正しい圧痛点を加圧した際に痛みが発生したことを CG で示し、触診の練習とメカニズムの学習を行える機能を試作した。圧痛を診る触診は、圧痛点をおよそ 1cm の精度で加圧することで行われることから、表示される映像の位置の目標精度を 1cm と定めた。

4.1.6 実行結果

FFPD により構築されたバーチャル解剖模型の実施の様子を図 4.6 に示す。

本システムを使用して映像を観察した結果を述べる。人型スクリーンの表面に投影された臓器の映像は、運動視によってあたかも内部を透視しているように知覚された。スクリーンを動かすとそれに追従して臓器モデルも移動・回転し、臓器モデルがスクリーンの内部に埋め込まれ、定位しているという感覚が得られた。胆嚢は肝臓の奥に隠れているので、胆嚢炎の触診には、この位置関係や深さなどの知識が必要とされる。本システムでこのような位置関係を視覚的に理解することができ、医学教材としての効果があ

ると考えられる。腸などは蠕動運動のアニメーションが再現されており、消化器の機能などの基礎的な知識を学ぶことも可能である。体表面に手を乗せることによって、内臓までの奥行きを知覚することができた。

正面から観察しづらい臓器はスクリーンを裏返して見るなどの操作が可能であった。

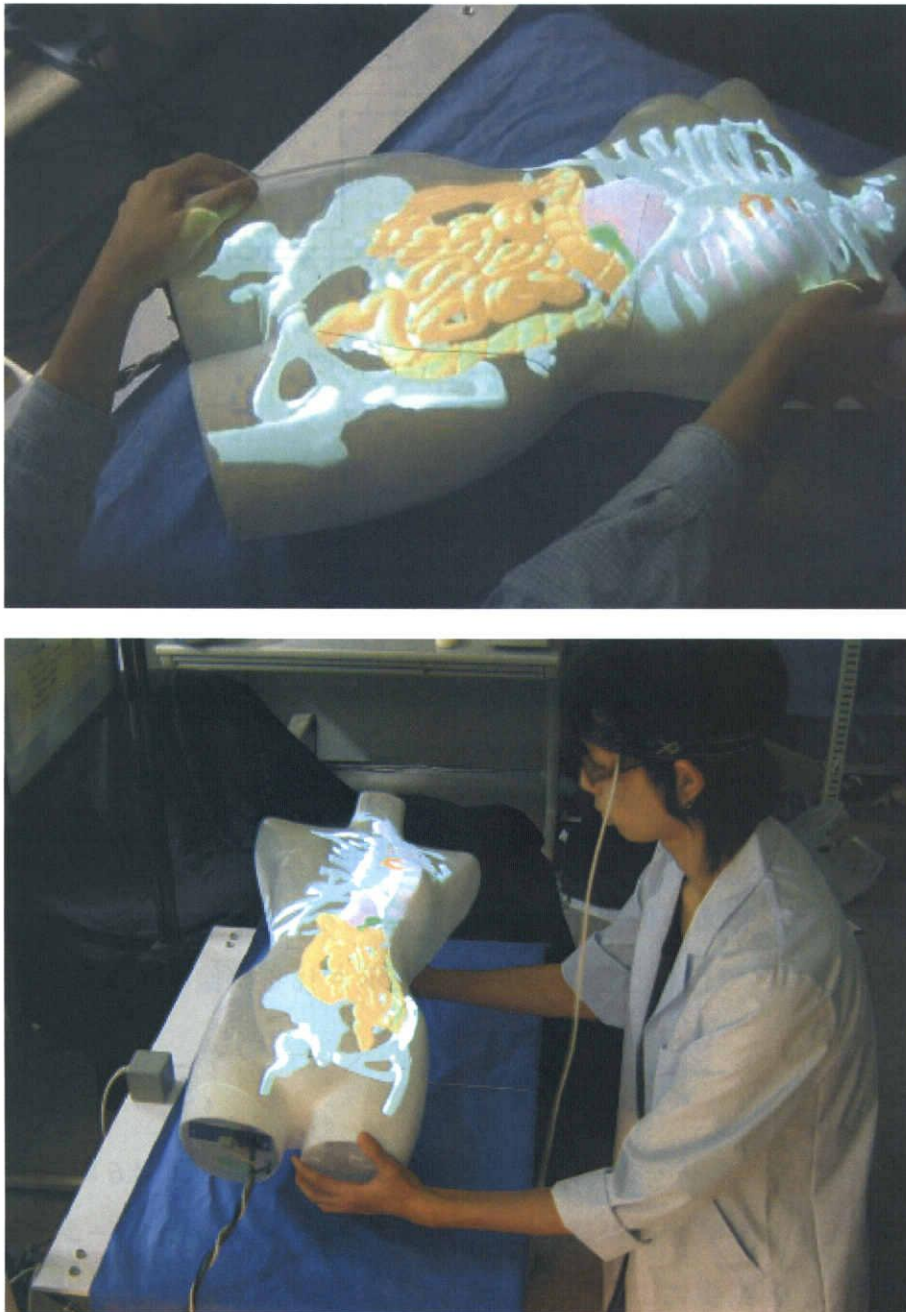


図 4.6 FFPD を用いたバーチャル解剖模型実行写真

リフレッシュレートは平均 15fps で、センサの計測値が映像に反映されるまでの時間遅れが約 170 ミリ秒あり、スクリーンを高速に動かすなどした場合には投影像の遅れが見られた。内臓を注視する際には、頭部とスクリーンはともにほぼ静止するので大きな問題はないが、今後、改善の必要があると考えられる。

使用しているセンサは周辺の金属物体の影響を受けやすく、数 mm から数 cm 程度の計測誤差を生じることがある。今回作成したシステムをセンサ誤差のある環境で使用したところ、正しい投影が行われず、観察像にずれや歪みが見られることがあった。次節では、センサ誤差による観察像にずれや歪みについて述べる。

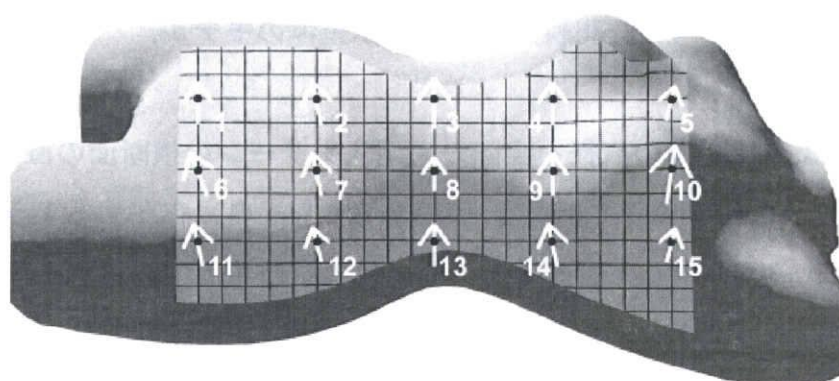
4.2 センサ誤差に起因する歪みの評価

投影歪みのキャンセルを正しく行うためには、双対レンダリング手順(図 2.4)における、カメラモデル VC とプロジェクタモデル VP が実際の観察者視点と同一の位置にあり、かつ、双対空間内の VC2 が、実際のプロジェクタと同一の位置・姿勢である必要がある。加えて、双対空間内のスクリーンモデルと実空間のスクリーンとの位置と姿勢も厳密に一致している必要がある。以上を満たすためには、観察者視点およびスクリーンの位置姿勢計測を十分な精度で行う必要がある。計測誤差が生じると、歪みが正しくキャンセルされず、正しい観察像が得られない。

FFPD を実現するに当たり、計測誤差と表示歪みの問題は最も基本的かつ重要な問題であるが、これまで自由曲面投影におけるこの問題に関する検討はほとんどなされていない。そこで、以下では、計測誤差に起因する観察像の歪みの傾向をシミュレーションにより検討する。

4.2.1 歪みを伴った観察像のシミュレーション

まず、人型スクリーンの計測データを用いて歪みのシミュレーションを行った。表示すべき臓器モデルとして、体表から 2.5cm 内側に、体表をそのまま縮小した形状を設置した。この形状上に正しい視点から見ると格子状に並ぶサンプル点を設定した。図 4.7 に、視点の位置が 2cm 上方に誤計測された場合の格子の歪みを示す。そのうち 15 のサンプル点における歪みの方向を矢印で、歪みの大きさを表に示している。ここで、歪みの大きさとは、視点から見た正しい表示点の方位と、誤った表示点との方位の間の角度（見かけの大きさ）である。



各点での歪みの大きさ[°]

(1) 0.17	(2) 0.17	(3) 0.20	(4) 0.17	(5) 0.14
(6) 0.18	(7) 0.17	(8) 0.14	(9) 0.17	(10) 0.24
(11) 0.17	(12) 0.14	(13) 0.17	(14) 0.17	(15) 0.14

括弧内の数字は図内の各サンプル点に対応。

図 4.7 人型スクリーン上での歪みシミュレーション。

実機を使って同様の計測誤差を意図的に生じさせた場合にもこの結果と同様の歪みが観測されており、シミュレーション結果と矛盾しなかったため、シミュレーションの手法は妥当であると考えられる。しかし、部位によって、歪みの現れ方はまちまちであり、このままでは歪みの傾向を一般化して考えるのは困難である。そこで、以降ではスクリーンの形状を単純な円で代表させてシミュレーションを行う。

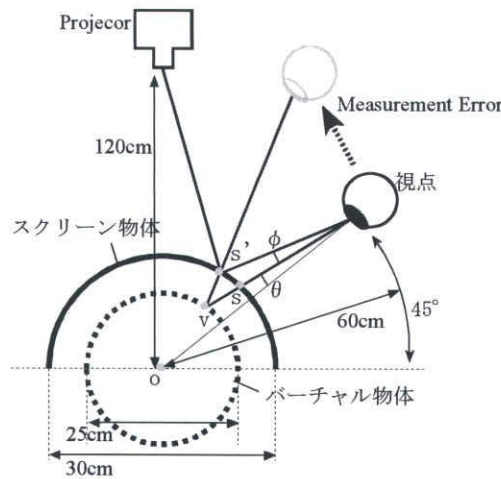


図 4.8 計測誤差による表示歪みのモデル.

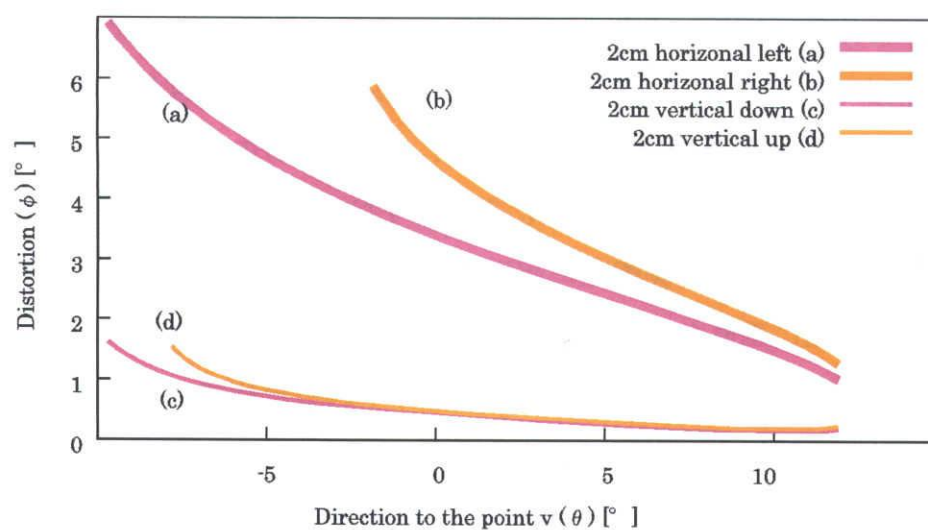
図 4.8 に示すように、円の直径を実際の人型スクリーンの横断面の直径を元に 30cm と定めた。投影表示される臓器モデルは、表面から 2.5cm 奥に存在するように、直径 25cm の円としてスクリーンの中心に設置する。システムを使用している際の位置関係に近くように円の中心からプロジェクタまでを 120cm、観察者視点までを 60cm とした。

視線がスクリーンの中心に向いているとし、視野の中心から θ° の方位に存在する仮想物体上の点を v とする。本来 v はスクリーン上の点 s に投影され、観察されるべきであるが、観察者視点、プロジェクタ、およびスクリーンの位置関係が正しく計測できていなければ、誤った点 s' に投影表示される。このとき、視点から見た s と s' との方位の差が歪みの大きさであり、これを角度 ϕ とおく。

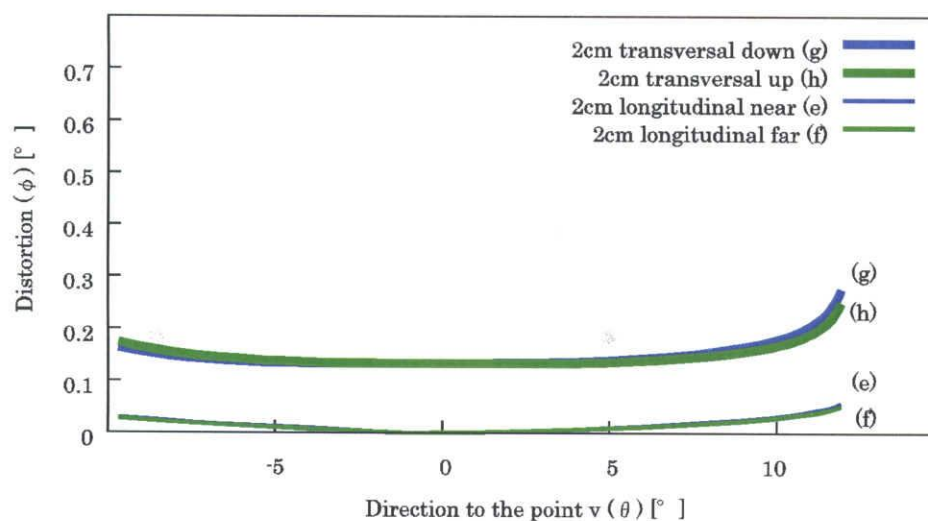
以下、このモデルを用い、視点位置が誤計測されたとき、およびスクリーン位置が誤計測されたときの ϕ についてシミュレーションを行う。

4.2.2 スクリーン／視点位置の計測誤差による歪み

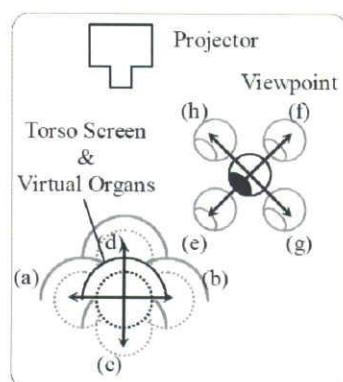
ここでは、視点の位置計測誤差に起因する歪み、および、スクリーンの位置計測誤差に起因する歪みを評価、比較する。計測誤差の大きさを 2cm とし、それぞれ 4 通りの方向への計測誤差を考えた。結果のグラフを図 4.9 に示している。



(A) スクリーン位置の誤計測時



(B) 視点位置の誤計測時



誤差の方向を示す
記号の意味

図 4.9 計測誤差に起因する表示歪みのシミュレーション。

(A)はスクリーンに計測誤差があった場合、(B)は視点位置に計測誤差があった場合である。仮想物体は、視界のうち $-12^{\circ} < \theta < 12^{\circ}$ の範囲を占めている。正方向がスクリーンの上側である。 -10° 以下はプロジェクタの投影光が当たらない死角なので、約 -10° から 12° までを θ の値域としている。また、(A)のグラフで(b)(d)のグラフがとぎれているのは、映像がスクリーンに当たらずはみ出たためである。(A)と(B)とを比較すると、スクリーンの計測誤差に起因する歪みが比較的大きいことがわかる。特にプロジェクタの光軸に垂直な(a)(b)方向への計測誤差で歪みが顕著になっている。これは、投影される映像が予定された位置から大きくずれるためであると考えられる。一方で、視点位置計測誤差による影響が比較的小さいのは、スクリーンの表面と提示される仮想物体とが常に近傍にあるためであることが理由と考えられ、人型に内臓を重畳表示するという本システム特有の特徴であると考えられる。また、スクリーンに対して近づいたり、遠ざかったりする方向(e)(f)については発生する歪みは非常に小さいという性質がわかった。

4.2.3 自由曲面投影ディスプレイとHMDとの比較

続いて、従来の光学シースルーHMDを用いて、本システムと同様のシステムを構成したと仮定して、計測誤差が映像に与える影響のシミュレーションを図4.10に示す構成で行った。本システムと異なる点は、映像提示面が人型スクリーン上にではなく、視点に追従して移動する管面(LCD,etc)上にあることである。正しい管面上の表示点 s と、誤計測に基づいた表示点 s' との視点からみた方位の差が歪みの大きさ ϕ となる。

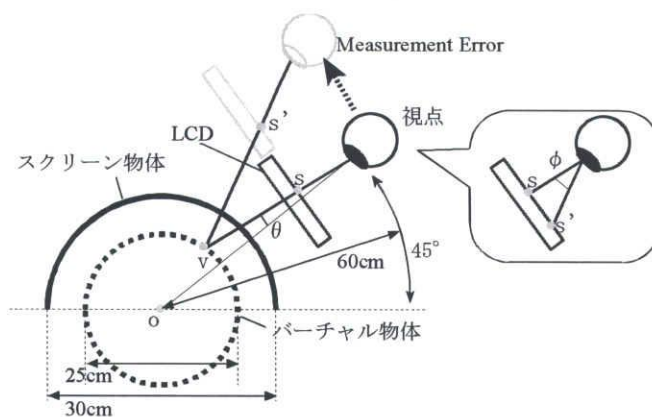
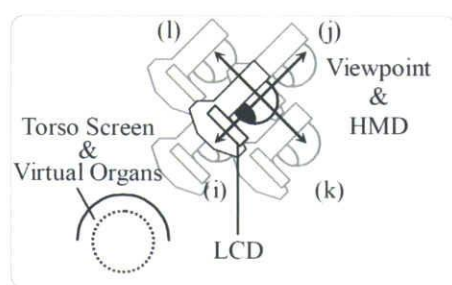
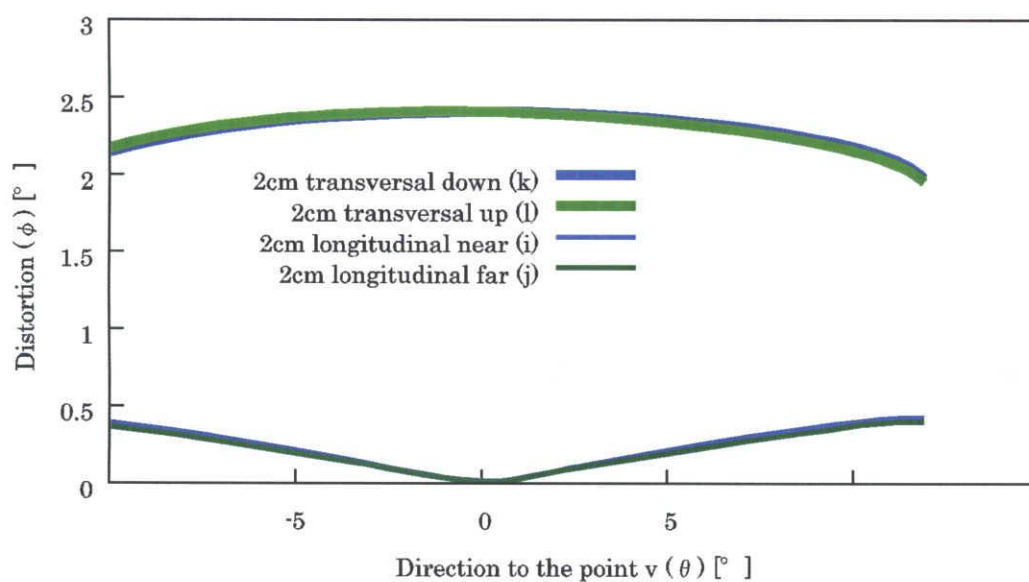


図 4.10 シースルー HMD における表示歪みのモデル.



誤差の方向を示す
記号の意味

図 4.11 計測誤差に起因する表示の歪み (HMD 使用時).

図 4.11 にシミュレーション結果を示す。HMD では、計測誤差が、直接的に観察像に影響しているように見える、前節の図 4.9(B)と比べると、誤差による影響は大きい。

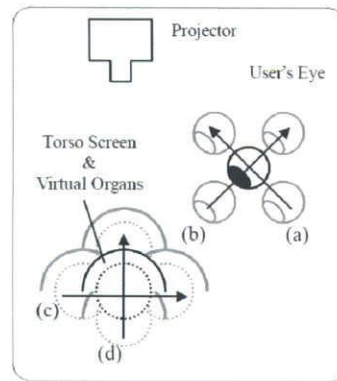
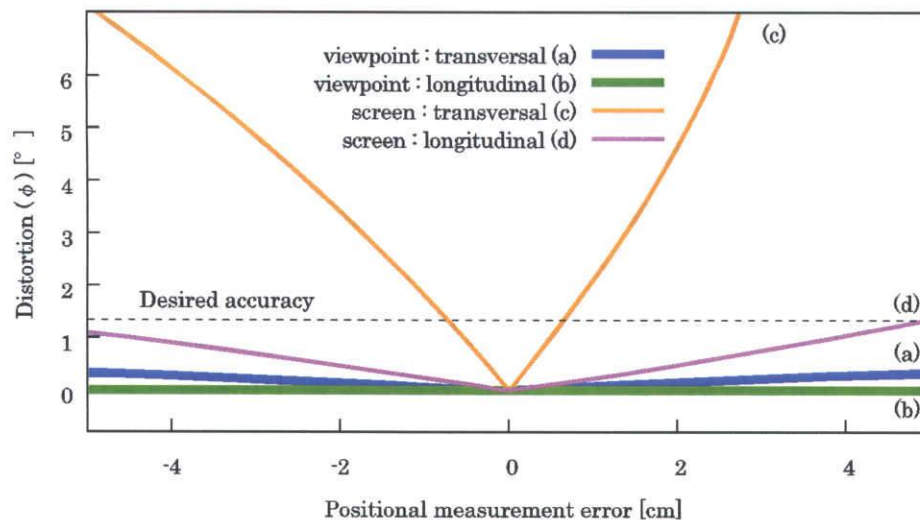
一般に、視点の位置計測は、センサを取り付ける際に装着ずれが生じる可能性があるなど正確な計測が難しい。本手法は、HMD よりも視点位置計測の誤差の許容量が大きいので、HMD を用いた方法に比べ、有利であるといえる。

また、HMD では位置だけでなく頭部回転の計測も観察像の位置ずれに大きく関わっている。一方で双対レンダリングでは原理上、視線の方向に関係なく同一の映像が生成・投影されるので、視点の方向を計測する必要はそもそもなく、この点も非常に有利であるといえる。

4.2.4 計測誤差の許容量

前節で述べたように、臓器モデルが表示される位置の要求精度を 1cm としている。これを満たすための計測誤差の許容量を検討する。視線がスクリーンの中心を向いている($\theta=0$)とすると、スクリーンの表面での 1cm の距離は角度 ϕ に換算すると約 1.2° である。図 4.12 は、計測誤差の大きさと、視界中央における歪みを示したものであり、要求精度 1.2° を破線で示している。

視点位置計測(a)(b)については、誤差が数 cm であっても要求精度 1.2° を満たしており、FASTRAK で十分使用に耐えることがわかった。一方で、スクリーンに水平方向の計測誤差が生じた場合(c)では影響が最も大きく、要求精度を満たすには誤差 0.5cm 以下での計測が必要である。



誤差の方向を示す
記号の意味

図 4.12 誤差の大きさと視野中心での歪み量.

4.2.5 まとめ

自由曲面投影ディスプレイにおける、計測誤差が観察像に与える影響について検討し、シミュレーション結果から、視点位置計測に関しては誤差が映像に与える影響は小さく、従来の HMD を用いた場合と比較して、視点位置計測の誤差の許容量が大きいことが示された。特にスクリーンからの距離方向の誤差が許容されるという、今後の自由曲面ディスプレイ設計の際に役立てられる知見が得られた。一方で、スクリーンの計測には高い精度が必要であることがわかった。今回は位置の誤差のみ検討したが、角度の計測誤差に関しては、スクリーンの大きさが 67cm であるため一方の端にセンサを取り付けた場合、 1° の計測誤差が他端で約 1cm の誤差をもたらす。システム要件の 3 を満たすには、より高精度で、時間遅れの少ない位置姿勢センサの使用が望ましい。

次節ではキャリブレーション方法について述べる。

4.3 システムの校正

将来の実用化に向け、現場で必要なときシステムのキャリブレーションが行えることが望ましい。そこで、少ない手順で十分な精度を得られる校正手段を目指し、校正用の手順とソフトウェアを作成した。

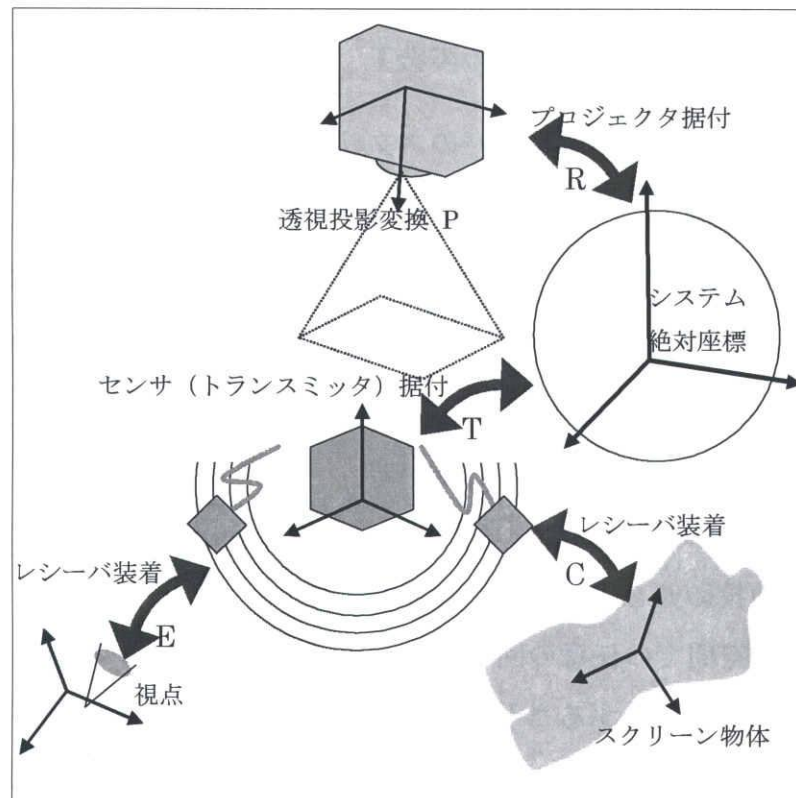


図 4.13 システムの座標系概念図

通常、センサやプロジェクタを持つシステムでは、システムの構成要素がそれぞれローカルな座標系を持っていると考えることができ、それらの座標合わせ、すなわち、相対的な位置・姿勢を正しく設定することは重要である。システムの配置をコンピュータにあらかじめ入力しレンダリング時に利用する際、実際の据付位置と異なると、表示の歪みやずれとして表れる。

本システムの配置において、座標合わせの必要な箇所を図 4.13 に示している。図ではシステム絶対座標を設け、これを基準として各構成要素の論理的な関係を示している。

前節で、表示の不整合に最も大きな影響があるのは、スクリーン物体の位置の誤差であることがわかった。また、プロジェクタの据付姿勢の厳密さも、表示像全体に影響するため重要である。

そのため、校正の手順を3ステップに分け、システム設置後に、

- (1) 絶対座標に対するプロジェクタ据付時の位置姿勢 \mathbf{R} 、プロジェクタ画像の透視投影変換行列 \mathbf{P}
- (2) 磁気センサのトランスミッタの姿勢 \mathbf{T}
- (3) スクリーン物体計測用レシーバのスクリーン物体への装着時の姿勢 \mathbf{C}

の校正を順に行う。

プロジェクタについては、透視変換行列 \mathbf{P} を持つ仮想視点を \mathbf{R} に配置するための行列 \mathbf{PR}^{-1} があればレンダリングに十分で \mathbf{P} と \mathbf{R} は個別に必要なないので、 $\mathbf{M} = \mathbf{PR}^{-1}$ として \mathbf{M} を校正する。なお、視点位置の計測用センサについては、精度に十分な余裕があるので、通常の方法で必要な精度が得られている。

ここでは、プロジェクタを用いたシステムに特化したキャリブレーション手法として、プロジェクタからの投影像を用いた方法を提案する。

OpenGL では 3 次元空間での任意の回転変換と並進移動を、 4×4 行列で表現する。また、4 行 4 列目を同次座標とすることで、透視変換(視推台)を取り扱うことが可能である[31]。本節では、姿勢変換行列・透視変換行列を OpenGL にならって扱う。

4.3.1 手順 1：プロジェクタ位置・姿勢と視推台の校正

あらかじめ 8 点のマーカをつけた箱状の治具(図 4.14)を用意し、プロジェクタの投影光が当たるおおよその位置に設置する。あらかじめ 8 点の各マーカの位置関係は 3 次元座標の形で正確に計測してあり、既知である。なお、設置した際の治具の座標系が、システムの基準座標系になる。



図 4.14 治具

表 4.4 マーカ各点の座標値

マーカ番号	x	y	z
1	-18.50	39.50	31.00
2	-18.50	39.50	71.00
3	18.50	39.50	71.00
4	18.50	39.50	31.00
5	-14.00	10.00	31.00
6	-14.00	10.00	71.00
7	14.00	10.00	71.00
8	14.00	10.00	31.00

単位 : cm

プロジェクタから投影した校正用カーソルをマウスで操作し、各マーカに1ピクセルの精度で重ねることで、プロジェクタの画素とマーカの対応を知ることができる。マーカの各座標は既知なので、8点について調査することで、以下の方法でプロジェクタの画角と位置・姿勢を算出可能である。

マーカの座標を $\mathbf{v}_n = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{pmatrix}$, プロジェクタの投影像の2次元座標上の対応する点を,

depth 値を h と仮定し, $\mathbf{p}_n = \begin{pmatrix} u_n h \\ v_n h \\ h \end{pmatrix}$ とする ($n: 1 \sim 8$).

求めたいプロジェクタの透視投影・モデリング変換行列を $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & & \ddots & \vdots \\ m_{31} & & \cdots & m_{34} \end{pmatrix}$

$$\text{とすると, } \mathbf{p}_n = \mathbf{M}\mathbf{v}_n \quad (4.1)$$

である. $m_{34} = 1$ とすると, $\begin{cases} u_n h = m_{11}x_n + m_{12}y_n + m_{13}z_n + m_{14} \\ v_n h = m_{21}x_n + m_{22}y_n + m_{23}z_n + m_{24} \\ h = m_{31}x_n + m_{32}y_n + m_{33}z_n + 1 \end{cases}$ となり,

$$\begin{cases} u_n(m_{31}x_n + m_{32}y_n + m_{33}z_n + 1) = m_{11}x_n + m_{12}y_n + m_{13}z_n + m_{14} \\ v_n(m_{31}x_n + m_{32}y_n + m_{33}z_n + 1) = m_{21}x_n + m_{22}y_n + m_{23}z_n + m_{24} \end{cases} \quad (4.2)$$

を得る.

$$\mathbf{X}^t = (m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33})$$

として, (4.2) から

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1u_1 & -y_1u_1 & -z_1u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -x_1v_1 & -y_1v_1 & -z_1v_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_2u_2 & -y_2u_2 & -z_2u_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -x_2v_2 & -y_2v_2 & -z_2v_2 \\ & & & & \vdots & & & & & & \end{pmatrix} \mathbf{X} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \mathbf{X} = \\ = \mathbf{A} \\ = \mathbf{U} \end{matrix} \quad (\mathbf{A}, \mathbf{U} \text{ は } 2n \text{ 行})$$

u_n, v_n, x_n, y_n, z_n は既知であるから,

$$\mathbf{AX} = \mathbf{U}$$

$$\mathbf{A}^t \mathbf{AX} = \mathbf{A}^t \mathbf{U}$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^t \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \mathbf{U}$$

を計算することで, \mathbf{X} の値, すなわち \mathbf{M} の各要素の値が求められる.

4.3.2 手順 2 : 磁気センサの校正

FASTRAK など磁気センサの校正は過去に多く行われている [38]. 磁気センサのレーザを, 各マーカに順にあてがい, センサの出力する座標値と, マーカの座標を比較することで, センサ座標系から世界座標系への変換行列 \mathbf{T} を校正した.

4.3.3 手順 3 : スクリーン物体のレーザ取り付け姿勢の校正

最も精度が必要とされる要素がスクリーン物体の位置・姿勢計測である. FASTRAK が計測したレーザの位置姿勢を \mathbf{F} (センサ座標系), レーザの座標のスクリーン物

体への変換行列を \mathbf{C} とすると、スクリーン物体の世界座標系での姿勢行列は \mathbf{TFC} で表せる。 \mathbf{F} は通常、校正は不要であり、 \mathbf{T} は前節で校正済みである。実際のシステムでは、スクリーン物体へのセンサ取り付けの際の取り付け誤差、すなわち \mathbf{C} の誤差が大きな問題となる。プロジェクタからの投光を利用しキー入力で \mathbf{C} を校正する以下のようなソフトウェアを作成して使用した。

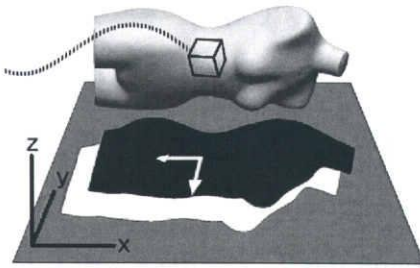
プロジェクタからスクリーン物体の外形像を投影すると、本来は、置かれているスクリーン物体に正確に重なるはずであるが、不正確であると、外形の像がはみ出てテーブルに縁取りが映る (図 4.15)。



図 4.15 投影によるスクリーンずれの検出。

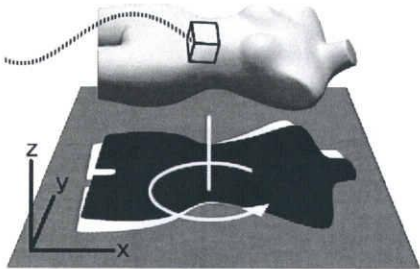
ユーザはキー操作により、投影されるスクリーンの外形を平行移動や回転させ、はみ出る光を少なくなるようにする。影が投影されているテーブルの法線を z 軸にした姿勢行列 \mathbf{V} の座標系で影を動かすモデリング変換 \mathbf{K} は、図 4.16 のように表せる。キー入力 x, y , および θ の加減に割り当てることで、自在に \mathbf{K} を変化させることができ、その結果が投影像に反映されるようになっている。

(a) Z 軸に垂直な平行移動



$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 1 & & x \\ & 1 & y \\ & & 1 & 0 \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

(b) Z 軸回転



$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ -\cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

図 4.16 投影光の補正と対応する行列 \mathbf{K} .

投影光がより正しくスクリーン物体に重なるように \mathbf{K} が定まったとき，ふさわしい取り付け姿勢行列を \mathbf{C}' とすると，

$$\mathbf{KV}^{-1}\mathbf{TFC} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{TFC}' \text{ であるから，}$$

$$\mathbf{C}' = (\mathbf{TF})^{-1}\mathbf{VKV}^{-1}\mathbf{TFC}$$

こうして求めた \mathbf{C}' を新たな \mathbf{C} として置き換え，上記の手順を繰り返し行う．スクリーン物体を様々な姿勢にして（さまざまな \mathbf{F} で）何度も行うことで，理想的な取り付け姿勢行列 \mathbf{C} に近づけることができる．

4.3.4 結果と考察

以上のキャリブレーション手順で，プロジェクタの位置・姿勢と投影パラメータ校正，および磁気センサとプロジェクタの座標あわせを行った結果，バーチャル解剖模型の想定作業領域内で，約 2mm まで投影の位置ずれを抑えることが可能となった．残るずれの原因は磁気センサの空間的ひずみが残留している影響などが考えられるが，簡易な作業手順で十分な効果が得られたといえる．これ以上の表示精度を得るには，より高精度で，より環境の影響を受けにくい位置姿勢センサ装置の使用が求められると考える．

第 5 章 操作性と空間理解の容易さに関する実験

オブジェクト指向ディスプレイは、

- (1) 奥行き方向の位置関係の把握のしやすさ
- (2) 直感的入力による迅速な操作
- (3) (1), (2)の相互作用を生かした高度な形状認識と記憶

という、仮想世界での自然で円滑な手元作業を実現する要件を備えており、他のデバイスと比較して優位であると思われる。

前章で、システムの実装と、実験を行うために十分な表示精度が得られたと考えられるので、本章では、上記(1)～(3)の各項目についてオブジェクト指向ディスプレイの優位性を確認するため、FFPD と従来法との比較実験を行う。

5.1 実験の概要

バーチャル物体の操作を行うタスクを被験者に与え、FFPD を用いた場合とモニタとマウス操作を用いた場合とで、達成度を評価する比較実験を行う。先に示した(1)～(3)の項目をそれぞれ調査するために計 3 種類のタスクを実施する。それぞれのタスクの詳細は次節で記す。

入出力のデバイスの組み合わせとして、以下の表 5.1 に示す(A)～(C)の 3 種類を用意した。

表 5.1 使用デバイスの組み合わせ。

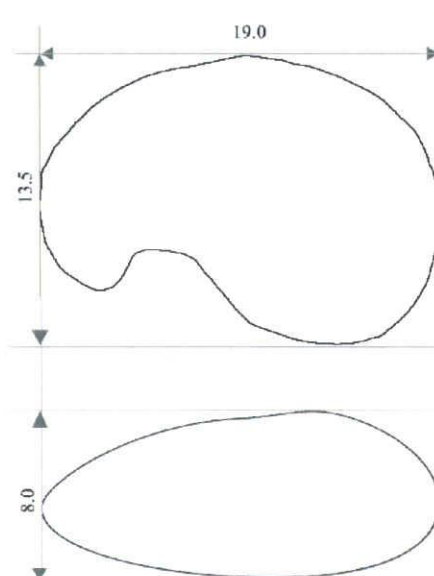
デバイス	(A) FFPD	(B) 実物体操作+モニタ	(C) マウス+モニタ
入力デバイス	実物体操作	実物体操作	マウス
表示デバイス	曲面投影	モニタ	モニタ

特に、操作性を主に必要とするタスクにおいて、マウスと実物体操作の違い(B)-(C)

間で差が表れ、一方、運動視などによる奥行き方向の形状把握を主に必要とするタスクにおいては特にモニタと曲面投影の間(A)-(B)間に差が表れると予想される。

5.1.1 実験装置

実験は、実物体として写真に示したような“外形物体”を用い、その内部にバーチャル物体を合成表示して実験を行う。外形物体は、つぶした豆のような形状で、裏と表で曲率を変えている。直線や直角は参照点になりやすいため、敢えて曲面のみの覚えづらい形状を持たせている。



寸法図 単位：cm

図 5.1 外形物体

自由曲面投影ディスプレイでの試行の様子を図 5.2 に示す。

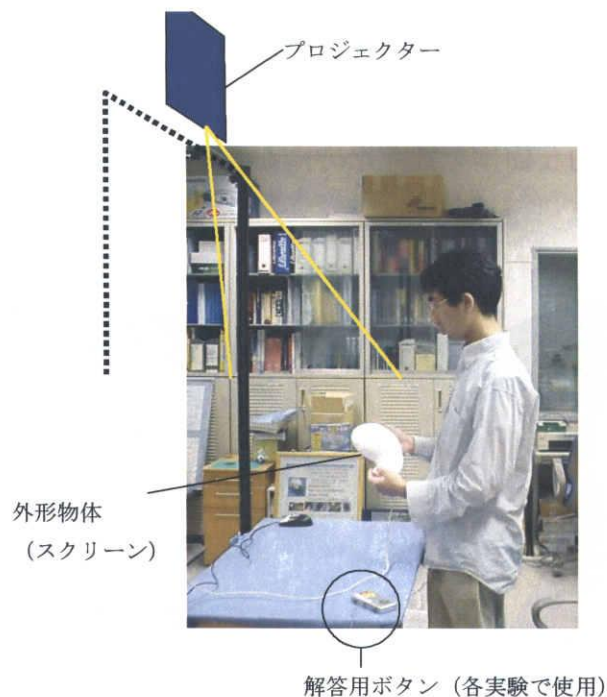


図 5.2 自由曲面投影ディスプレイでの試行.

モニタを用いた試行時には、通常の PC 用モニタではなく、プロジェクタからモニタと同じ大きさの画面を投影して代用した。PC 用モニタでは自由曲面投影ディスプレイの画質に比較して鮮明であるため、視認性が結果に影響しないように画質を共通にするためである。

マウス操作には、通常の PC 用マウスを用い、マウスの移動でモニタ上の物体の回転を指示する。

被験者はマウスや外形物体の各操作は十分に慣れた上で実験に臨んだ。

5.2 実験 1: 操作性の評価

5.2.1 目的

この実験では、FFPD を用いた場合の物体操作の容易さを比較するため、物体操作により、外形物体内部の仮想的な物体を様々な方向から観察する実験を行う。

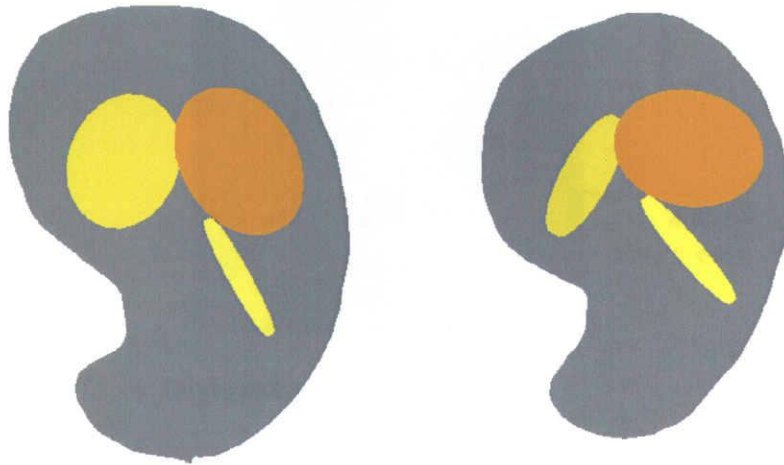


図 5.3 実験 3 で使用するモデルの外観

本実験では、図 5.3 に示すように、外形物体の内部に色の違う 3 つの円盤を定位させている。試行のたびに位置と角度はランダムに決定される。3 色の円盤は大きさがわずかに異なり、また、いずれも楕円形であるため、一方向からのみの観察ではその大きさを正確に知ることは困難である。

この実験では単に操作性を測定することを目的としているため、浮遊物体と外形物体の形状に意味的な関連性は持たせていない。そのため、見たい角度からすばやく見るという操作性が特に結果に大きく影響すると考えられ、実物体操作を用いた(A)および(B)と、マウス操作の(C)との間に作業効率の差が生じると予想される。

5.2.2 手順

被験者には、外形物体を回転させながら円盤の大きさを把握し、最も大きい物を素早く発見して解答するというタスクを与える。解答は、テーブル端に設置したゲーム用のコントローラを用い、正解の色に応じたボタンを押すことで行う。コントローラを図 5.4 に示す。



図 5.4 解答用コントローラ.

5.2.3 結果

各被験者はデバイス(A)～(C)につき10回の試行を行った。なお、設問のCGモデルは自動生成されるため、まれに正答が極端に困難な配置となる場合がある。そこで、1回の試行ごとに10秒の制限時間を設け、それを超えた場合や、回答が不正解の場合は、正解が極端に困難な問題の場合または回答ボタンの誤操作であったとみなし、ノーカウントとした。

実験結果の一部を以下の表に示す。

表 5.2 実験1 結果

試行回	被験者 1		
	(A) FFPD	(B) 模型+ モニタ	(C) マウス+ モニタ
1	2.09	1.72	2.44
2	4.09	0.92	3.50
3	2.42	1.98	3.30
4	2.50	2.33	3.81
5	2.19	2.19	2.17
6	2.34	1.03	3.83
7	1.80	1.30	1.89
8	2.17	0.92	1.33
9	2.50	2.13	3.53
10	1.81	1.02	3.75
平均	2.39	1.55	2.95
正答率	10/11	10/10	10/11

所要時間 (sec.)

タスクの達成時間は、表示が開始されてからボタンが押されるまでの時間である。本

実験では、タスクの達成時間を作業効率と見なし、作業デバイスの違いによる平均達成時間の短縮分を、作業効率の向上とした。10 人の被験者に対し実験を行い、各試行による短縮時間と検定で用いた統計量についてまとめたものを表 5.3 に示す。

表 5.3 実験 1 達成時間変化の平均と統計量

被験者	平均達成時間(sec.)			デバイスによる平均達成時間の差		
	(A)	(B)	(C)	(B-A)	(C-A)	(C-B)
1	2.39	1.55	2.95	-0.84	0.56	1.40
2	3.03	2.48	3.06	-0.55	0.03	0.58
3	4.12	2.85	4.18	-1.27	0.06	1.33
4	1.98	2.19	3.23	0.20	1.25	1.04
5	3.55	3.19	3.58	-0.36	0.03	0.39
6	1.98	2.73	2.24	0.75	0.26	-0.49
7	2.24	2.45	3.05	0.21	0.80	0.59
8	5.29	5.84	5.44	0.55	0.15	-0.40
9	3.90	4.32	5.89	0.42	1.99	1.57
10	2.12	2.33	3.46	0.20	1.33	1.13
平均				-0.068	0.647	0.714
標準偏差				0.655	0.679	0.721
t				-0.311	2.857	2.972

棄却域 $t_{\alpha}(0.05)=2.262$ 以上

(A) FFPD (B) 実物体操作+モニタ (C) マウス+モニタ

デバイスの違いによる作業効率の向上があったかを確認するため、各デバイスによる平均達成時間の差について有意水準 5 % で t 検定を行った[39]。

表より、(C-A) および (C-B) に有意な差が認められ、操作にマウスでなく実物体操作を使用した場合における作業効率の向上（達成時間が短縮）が確認された。

5.2.4 考察

様々な角度から対象を観察する必要のあるタスクにおいて、実物体操作が作業効率の向上につながっているとみられる良好な結果を得た。

(B-A) 間は実物体への投影とモニタ表示の違いがあるが有意な差がみられないのは、バーチャル物体が外形物体の形状と無関係で、視・触覚の一致性が作業効率にあまり意味をなさなかったためと考えられる。

5.3 実験 2: 外形物体の表面との奥行き知覚の評価

5.3.1 目的

本実験ではモニタ型と自由曲面投影ディスプレイとを用いた場合の、外形物体の形状とバーチャル物体との奥行き方向の位置関係の理解を比較・評価する。

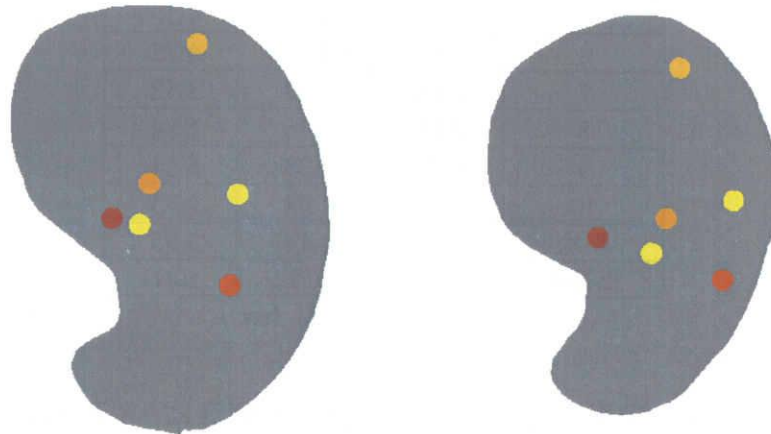


図 5.5 実験 2 で使用するモデルの外観

この実験では、バーチャル物体と外形物体の形状に意味的な関連性を持たせている。実物体へ投影表示することで、モニタでの表示よりも運動視差や、実物体表面を手がかりにした奥行き知覚の点で効率が向上するため、(A)が、(B)および(C)よりも優れた結果になると予想される。

5.3.2 手順

図 5.5 に示すように、本実験では、輝点が外形物体の内壁面に固定されているように配置されており、6つの輝点のうちいずれか1点のみが壁面から2cm離れてほかの5点よりも奥に存在する。使用するモデルの例を図に示す。被験者は、ほかの5点よりも奥に存在する1点を素早く発見し、その色を実験1同様にボタンで解答する。

5.3.3 結果

1回の実験につき10回の試行を行った。結果を表 5.4 に示す。

表 5.4 実験 2 結果

試行回	被験者 1		
	(A) FFPD	(B) 模型+ モニタ	(C) マウス+ モニタ
1	2.48	2.47	7.31
2	2.13	5.11	3.64
3	1.95	5.50	3.09
4	2.53	4.19	2.98
5	4.80	4.45	4.50
6	3.56	4.45	4.75
7	2.88	5.67	3.52
8	2.33	1.75	1.84
9	1.47	3.38	5.11
10	1.84	4.48	2.75
平均	2.60	4.14	3.95
正答率	10/10	10/12	10/11

所要時間 (sec.)

設問の CG モデルは自動生成されるため、実験 1 同様に、1 回の試行ごとに 10 秒の制限時間を設け、それを超えた場合や、回答が不正解の場合は、ノーカウントとした。

本実験では、タスクの達成時間を作業効率と見なし、作業デバイスの違いによる平均達成時間の短縮分を、作業効率の向上とした。

10 人の被験者に対し実験を行い、デバイスの違いによる達成時間の差と、検定で用いた統計量についてまとめたものを表 5.5 に示す。

表 5.5 実験 2：達成時間変化の平均と統計量

被験者	平均達成時間(sec.)			デバイスによる平均達成時間の差		
	(A)	(B)	(C)	(B-A)	(C-A)	(C-B)
1	2.60	4.14	3.95	1.55	1.35	-0.19
2	6.11	6.45	8.14	0.34	2.03	1.68
3	1.22	2.35	3.09	1.14	1.87	0.74
4	3.26	2.24	4.08	-1.02	0.82	1.84
5	4.76	6.37	5.84	1.61	1.08	-0.53
6	2.93	4.45	5.43	1.52	2.50	0.98
7	3.24	6.35	6.48	3.11	3.25	0.13
8	2.43	4.86	5.54	2.43	3.11	0.68
9	3.20	3.13	3.02	-0.07	-0.17	-0.10
10	4.31	5.54	4.82	1.22	0.51	-0.72
平均				1.182	1.634	0.452
標準偏差				1.195	1.121	0.884
t				2.968	4.372	1.534

棄却域 $t_{(0.05)} = 2.262$ 以上

(A)FFPD (B)実物体操作+モニタ (C)マウス+モニタ

デバイスの違いによる作業効率の向上を検定したところ、(C-A)、(B-A)において有意な差が認められ、いずれも(A)での作業効率が向上を示していた。

5.3.4 考察

外形物体とバーチャル物体との意味的な関連があるコンテンツを表示する場合において、実物体への投影表示が作業効率の向上につながっているとみられる良好な結果を得た。

被験者は、(B)と(C)のモニタ表示では、輝点ひとつひとつに順次注目しながら物体を回転させ、輝点が物体の輪郭に、見かけ上最接近したときの距離を覚え、最接近時の距離が最も大きかった物を正解とみなすという手順を踏むことになることが多く、何周も物体を回転する必要があった。それに対し、(A)の実物体への投影では、被験者は外形物体の表面に手を置いたり、外形物体表面の細かな凹凸に着目したりして、それらと輝点との奥行きの違いを運動視によって容易に判断しており、非常に高速に正解にたどり着くことを可能としていた。

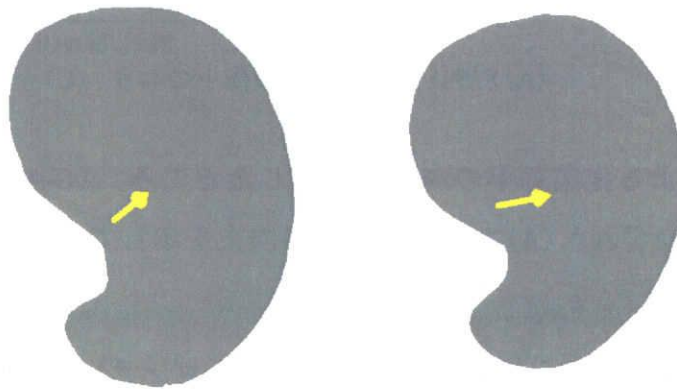
5.4 実験 3: 総合的な位置関係の理解と記憶の評価

5.4.1 目的

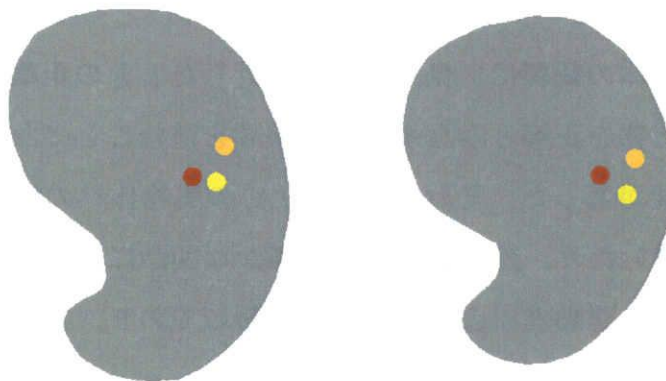
先の実験で、実物体を用いることによる操作性の向上と、運動視を含んだ観察による奥行き知覚性能の向上が確認された。本実験では、操作と奥行きの両方を含んだより高度な立体知覚性能を評価する。

5.4.2 手順

図 5.6 に示すように、外形物体内に仮想の矢印を定位させ、矢印が示す方向を記憶する実験を行った。被験者は、外形物体の内部にどの面からも離れて定位している矢印を詳しく観察し、指している 3 次元的な方向を記憶する。



(1) 記憶時



(2) 解答時

図 5.6 実験 3 で使用するモデルの概観

記憶する時間は、20 秒とし、記憶時間終了後、矢印の表示を消し、その後で、外形物体の面上に3点の候補点を表示する。被験者は記憶を頼りに、矢印の延長線が貫いていた点をボタンで指定する。解答の時間制限はなく、10回の試行での正答率を記録とした。本実験では、使用デバイス(A)および(C)で比較する。

5.4.3 結果

被験者	正答率		正答率の差分
	(A)	(C)	(C-A)
1	0.7	0.4	0.3
2	1.0	0.8	0.2
3	0.9	0.8	0.1
4	0.7	0.8	-0.1
5	1.0	0.6	0.4
6	0.9	0.8	0.1
7	0.8	0.7	0.1
8	0.6	0.8	-0.2
9	0.7	0.4	0.3
10	1.0	0.8	0.2
平均			0.140
標準偏差			0.184
t			2.285

棄却域 $t_{\alpha}(0.05)=2.262$ 以上

(A)FFPD (B)実物体操作+モニタ (C)マウス+モニタ

表 5.6 実験3：正答率の差と統計量

10人の被験者で、実験を行った。素点および、各被験者の(A)を(C)の正答率と比較を表5.6に示す。ほとんどの被験者で正答率が向上しており、(A)FFPD使用時の正答率に有意な向上が認められた。

5.4.4 考察

運動視と物体操作を駆使して、効率よく矢印の向きを把握し、実物体表面の凹凸などを手がかりに記憶がしやすかったと思われる。また、実験中、マウス操作では外形物体の奥と手前のどちらの面の側にバーチャル物体があるのか一瞬分からなくなるようなことがあったという感想を得ているが、実物体操作ではそのような感想はなかった。これもやはり、実物体操作が直感的であることを示している。

5.5 まとめ

実物体を使用することによる操作性と、実物体と映像を一致することによる奥行き知覚、それらの両方に起因する、3次元形状と物体表面との位置関係の把握、の3点に着目して、これらのオブジェクト指向ディスプレイについて有効性を確認すべく FFPD を用いた実験を行った。その結果、以上3点のすべてについて、有効性が確認された。

第 6 章 学習実験

解剖学の学習教材として実績のあるメディカルイラストを用いた場合と、自由曲面投影ディスプレイ (FFPD) を用いた場合との学習効果の比較実験を行う。FFPD で表示する学習教材は 4 章で作成したバーチャル解剖模型をベースとし、学習テーマに合わせて一部改変したものである。

6.1 使用教材

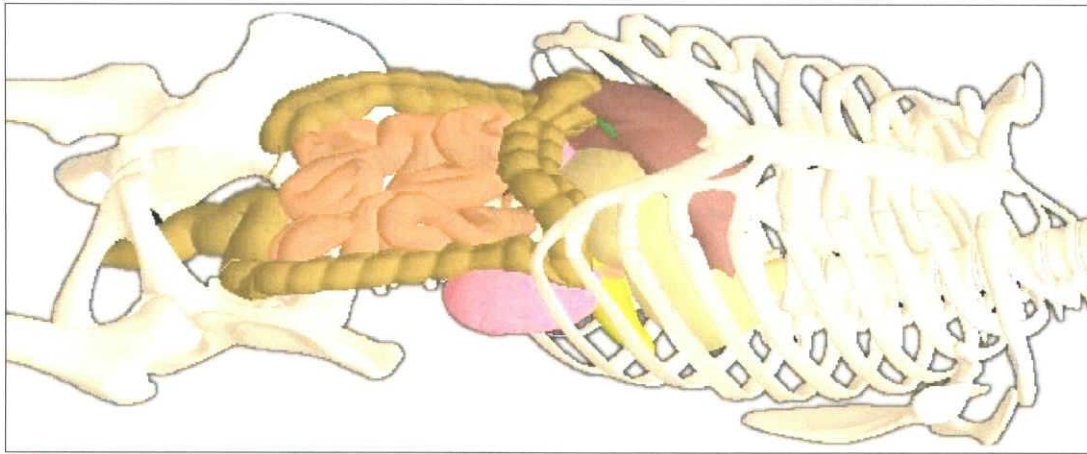
表 6.1 に示すように、2 種類の学習テーマを用意した。試験 1 は、胸から腰までの骨格と、主に消化器を中心とした腹部の内臓の形や位置関係を学ぶものであり、試験 2 は、女性の内生殖器とその周囲の内臓の形や位置関係を学ぶものである。

それぞれについて、FFPD を用いた教材 A と、紙に書かれたイラスト形式の教材 B とを用意する。

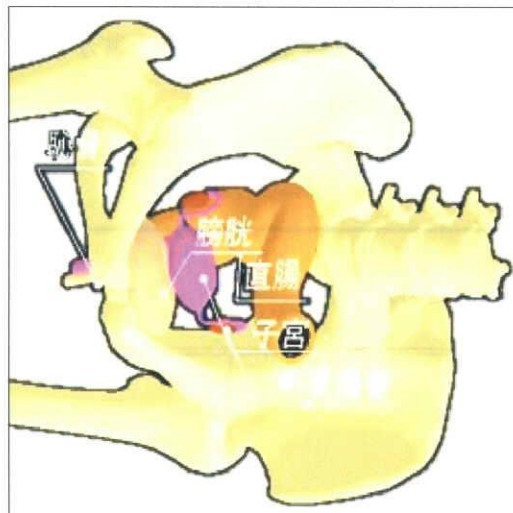
表 6.1 実験における学習テーマ。

	テーマ 1 : 「骨格と消化器」		テーマ 2 : 「女性内生殖器」	
内 容	腹部を中心とした骨格 肝臓 胆嚢 胃 小腸 大腸 腎臓 膵臓 膀胱		骨盤 尾てい骨 膀胱 子宮 卵巣 直腸	
教 材	教材 A: FFPD による CG 表示	教材 B: 紙媒体のメディ カルイラスト	教材 A: FFPD による CG 表示	教材 B: 紙媒体のメディ カルイラスト

実験に使用した教材 A の CG の例を図 6.1 に示す. 図 6.2 に, スクリーン物体へ投影した様子の写真を示す.



テーマ 1

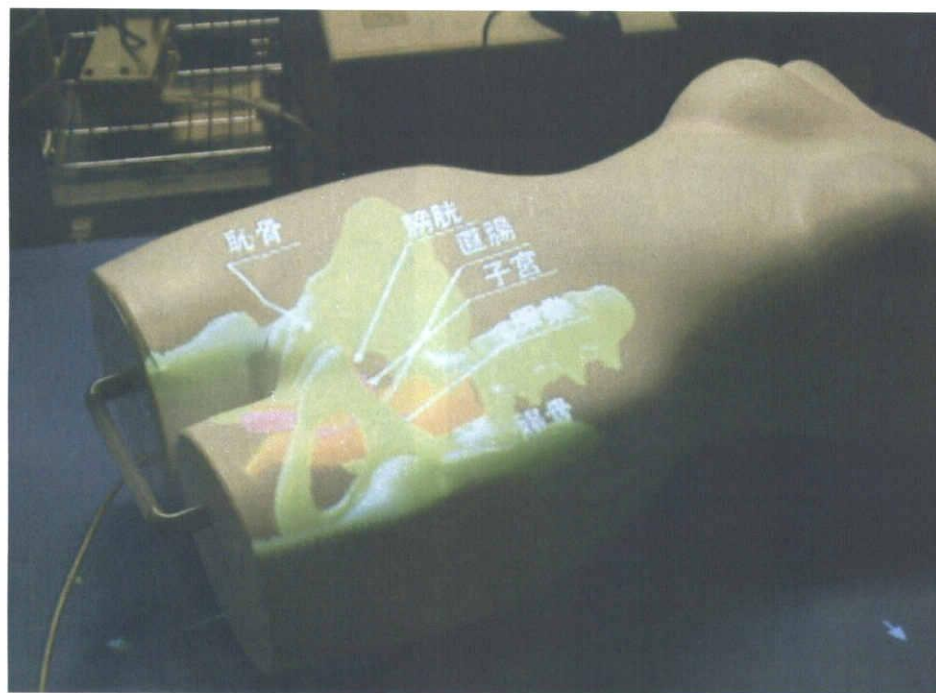


テーマ 2

図 6.1 実験に使用した CG 内臓モデル.



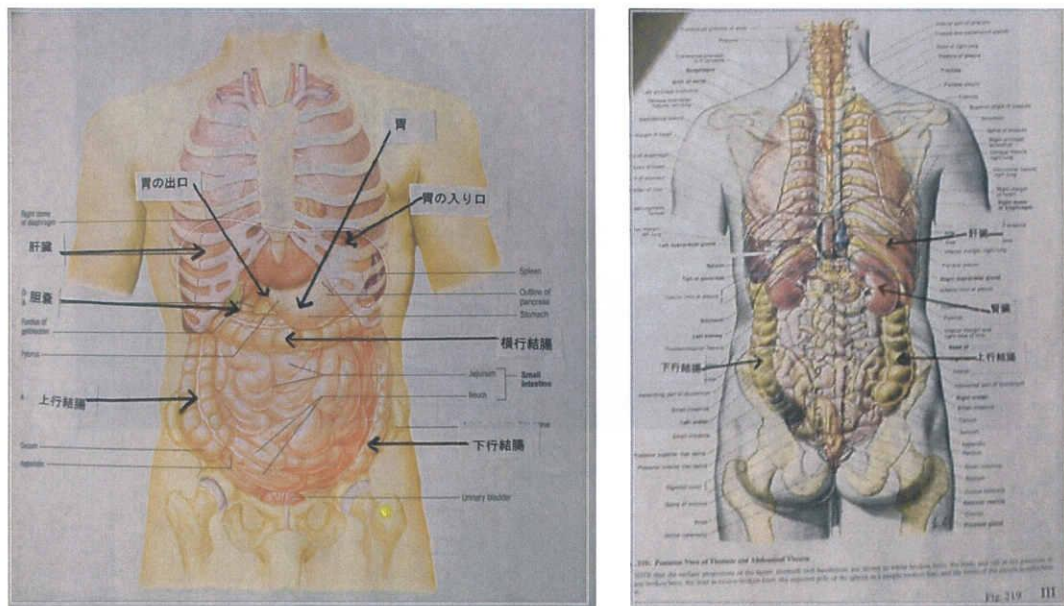
テーマ1



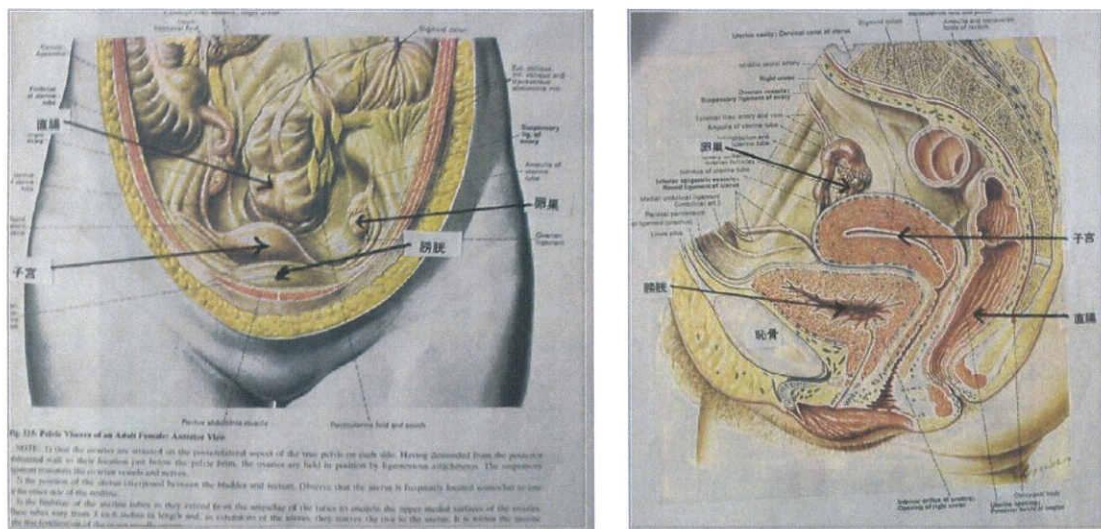
テーマ2

図 6.2 実験に使用した自由曲面ディスプレイ教材.

図 6.3 は、教材 B として使用したメディカルイラストである。



テーマ 1



テーマ 2

図 6.3 実験に使用したメディカルイラスト教材。

6.2 実験手順

医学部看護学科の学生 13 名を募り、実験を行った。被験者は、健常な視力を有する健康な男女（男性 8 人、女性 5 人）であり、実験時まで当該の解剖学の授業を履修していない者を選んだ。

各被験者は、紙の教材と FFPD との学習をそれぞれ 1 度ずつ、異なるテーマになるように行ない、それぞれ試験を行う。13 人の被験者を 6 人と 7 人の 2 グループに分け、FFPD でテーマ 1、紙の教材でテーマ 2 を学習するグループと、紙の教材でテーマ 1、FFPD でテーマ 2 を学習するグループとに分け、さらに前の学習と試験が予備知識となる可能性を考慮し、各グループ内で、紙の教材での学習を先に行う被験者と、FFPD での学習を先に行う被験者とに分けた。

どちらの教材種類を使う場合も学習は 5 分間行い、5 分の休憩を挟み、5 分間の試験に臨む。学習時には、教材をよく観察して、臓器の位置関係や形状を記憶する。FFPD では短い操作方法の説明を受けたあと、5 分間、一人で学習を行う。

試験は記憶した臓器の位置や大きさなどを問うペーパーテストにより行った。

ペーパーテストの得点をそれぞれの学習方法による理解度と見なして集計した。また、両方の実験を終了した被験者にアンケートを実施した。



図 6.4 学習実験の様子。

ペーパーテストの問題を以下に示す.

試験問題 1

横行結腸と腎臓、より腹側に近いのは () である。

胃と腎臓、より背中側に近いのは () である。

右腎臓と左腎臓、立位でみると、上の方にあるのは、() である。

胆嚢と腎臓、立位でみると、上の方にあるのは、() である。

胃の入り口と胆嚢、より右側にあるのは () である。

テーマ1のペーパーテスト問題

試験問題 2

子宮、直腸、膀胱の位置関係と形について、次の質問に答えなさい。

(若い人で、非妊娠時のものとします。)

この3つの臓器、背中側から順番に並べると

() () () の順になる。

子宮と膀胱、立位でみると、上の方にあるのは、() である。

子宮と膀胱、立位でみると、幅が広いのは、() である。

今回の勉強で見た子宮は、() 前に傾いていた。

() 後ろに傾いていた。

() 傾いていなかった。

正しい記載に○をつけてください。

テーマ2のペーパーテスト問題.

6.3 結果

試験の結果を表 6.2 に示す.

表 6.2 試験点数一覧.

被験者	教材 A FFPD		教材 B 紙の教材	
A	テーマ 1 骨格と消化器	18	テーマ 2 女性内生殖器	25
B		24		30
C		30		25
D		30		25
E		18		30
F		24		15
平均		24.000		25.000
G	テーマ 2 女性内生殖器	30	テーマ 1 骨格と消化器	24
H		15		24
I		25		24
J		30		18
K		25		24
L		30		30
M		25		24
平均		25.714		24.000

各 30 点満点 被験者数：13 名

各テーマでの FFPD と紙の教材使用時の平均点の比較を図 6.5 に示す.

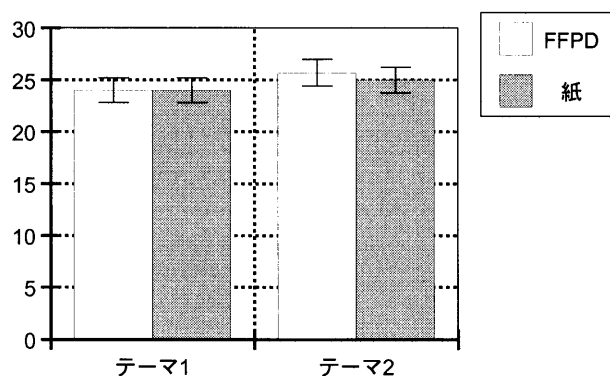


図 6.5 各テーマでの FFPD と紙の教材使用時の平均点の比較.

試験の得点を検定した結果, 教材 A (FFPD) と教材 B (紙) とで理解度に有意差はなかった.

参考：アンケート結果

被験者に実施したアンケートの内容は以下のとおりである。

アンケートにご協力をお願いします

番号に○をつけてください。

【1】今回体験していただいた，CGと人型を組み合わせた教材での勉強と，紙の教材（イラスト）を使った勉強とでは，どちらが，内臓の形状や位置関係を理解しやすかったですか？

1. 紙の教材のほうがよい
2. どちらかといえば紙の教材のほうがよい
3. どちらともいえない
4. どちらかといえば，CG＋人型のほうがよい
5. CG＋人型のほうがよい

【2】CGと人型を組み合わせた教材は，興味を持って学習できると思いますか？

1. 思わない
2. あまり思わない
3. どちらともいえない
4. すこし思う
5. 思う

【3】自由記載意見 そのほかご意見，ご感想などありましたらお書きください。

お疲れ様でした。

アンケート用紙文面

アンケートの有効回答者数は 12 であった。回答の内訳を以下に示す。

1. 紙の教材と CG+人型の教材とではどちらがわかりやすかったかという問いに対する回答。

	回答数
紙の教材	0
どちらかといえば紙の教	0
どちらともいえない	0
どちらかといえば CG + 人型による教材	5
CG + 人型による教材	7

2. このシステムで興味を持って学習できると思うかという問いに対する回答。

	回答数
思わない	0
あまり思わない	1
どちらともいえない	0
少し思う	1
思う	10

3. 自由記載意見。

紙の学習教材に対して、

- ・紙の方は位置関係がわからなかった
- ・紙はすごくわかりにくかった

FFPD を用いた学習教材に対して、

- ・CG は内臓の位置関係がかなりわかりやすかった
- ・とても驚いた。
- ・ゲーム感覚でおもしろい、興味が持ちやすいと思う
- ・覚えようと意識しなくても、あとから映像を思い出すことができた

以上の感想を得た。

6.4 考察

アンケートの結果からは、総じて FFPD では 3 次元的な位置関係をつかみやすいと感じていることがわかる。また 2 番目の問いに対して、本システムで興味を持って学習できると思うとする回答が多く、また、操作説明時にも、多くの被験者が興味を示していることから、好評だったといえる。

学習効果については、FFPD の優位性を示す結果は得られなかったが、少なくとも、学習教材として実績のあるメディカルイラストに劣る結果ではなかった。前章の実験において、コンテンツを選ぶことによって操作、観察、理解と記憶において有効であることが確認されているので、ほかのさまざまなアプリケーションにおいても、3 次元的な構造の理解に関する有効性が現れることは十分に期待できる。医学教材などのアプリケーションでより高い学習効果を得るためには、学習テーマの選定や、学習すべき内容を効果的に提示するための表現およびコンテンツの設計が必要であると考えられる。

第 7 章 まとめ

7.1 結論

本論文では，身体近傍における作業の仮想化に親和性の高いディスプレイとして，実物体をスクリーンとし，その内部にバーチャル物体を埋め込むような表示が可能な，オブジェクト指向ディスプレイという概念を取り上げた．

オブジェクト指向ディスプレイを用いる有効性として

- (1) 隠蔽関係の整合性
- (2) 焦点調節の整合性
- (3) 視点位置センサの計測誤差に対する耐性

および，

- (4) バーチャル物体と実物体の一体化による効果的インタラクション

の 4 点を挙げた．

身体近傍のインタラクションにおいては，HMD や IPT などの没入感の喚起を主たる目的としたディスプレイデバイスや CRT モニタなどの従来法では，(1) ～ (3) が不十分であったことを示し，対するオブジェクト指向ディスプレイでは，(1), (2) は構成上明らか，(3) に関して誤差解析を行うことで (4 章) 優位性を示した．

(4) はオブジェクト指向ディスプレイを特徴づける，立体感や奥行き方向位置関係の把握のしやすさと，直感的入力による迅速な操作そしてそれら視覚と触覚の相互作用を生かした高度な形状認識に関するものであるが，その有効性や評価方法が明確にされていなかった．本論文では，この点についての有効性を検証するため，オブジェクト指向ディスプレイの一形態である自由曲面投影ディスプレイを提案，実装方法を示すとともに，応用例として，バーチャル解剖模型アプリケーションを試験的に実装して示した．

システムの校正を行い，意味のある実験が行えるだけの性能を有するシステムを実装した．

仮想世界でのインタラクションにおける,

- (1) 奥行き方向の位置関係の把握のしやすさ.
- (2) 直感的入力による迅速な操作.
- (3) (1), (2) の相互作用を生かした高度な形状認識と記憶.

という3点に着目し従来法との比較実験を行い, 提案したシステムの優位性を確認した.

また, バーチャル解剖模型アプリケーションと紙媒体とを比較する学習実験を行ったが, 学習効果に差は見られないという結果であった.

以上から, オブジェクト指向ディスプレイは, 操作性, 立体形状の把握がしやすい, 印象に残りやすい, といった優れた特性を持っているが, 提示する内容を適切に選ばないと, FFPD の優位性が表出しないことが分かった. 既存のコンテンツや表現したい事柄がある場合に FFPD を利用して効果的に提示するための, コンテンツの設計法や表現手法の開発を今後の課題としたい.

7.2 展望

今後は, 本システムの両眼立体視への拡張およびそのための誤差解析を行いたい, また本論文では, 静止状態のみを扱ったが, 運動視では歪みの時間的変化も重要な問題である. 今後は, 運動視における歪みの時間的変化やセンサ遅れなどを考慮した歪みの評価を行い, 実用に耐える表示精度やキャリブレーション手法の開発を目指す.

引き続きバーチャル物体と実物体とを一体化したインターフェースを持つオブジェクト指向ディスプレイの特性をさらに詳細に調査するとともに, FFPD ならではの医学教育用教材やそのほかのアプリケーションの開発へと発展させたいと考えている.

参考文献

- [1] 近藤大祐, 後藤敏之, 河野誠, 木島竜吾, 高橋優三, “自由曲面への投影を用いたバーチャル解剖模型”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.10 No.2, pp.201-208, 2005年6月.
- [2] Daisuke Kondo, Toshiyuki Goto, Makoto Kouno, Ryugo Kijima and Yuzo Takahashi, “A Virtual Anatomical Torso for Medical Education using Free Form Image Projection”, Proceedings of 10 th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2004) , pp.678-685, 2004年11月.
- [3] Daisuke Kondo and Ryugo Kijima, “Proposal of a Free Form Projection Display Using the Principle of Duality Rendering” , Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2002), pp.346-352, 2002年9月.
- [4] 舘暲, 廣瀬通孝, “バーチャル・テック・ラボ”, 工業調査会, 1992.
- [5] Jannick P. Roland and Henry Fuchs, “Optical versus video see-through head-mounted displays in medical visualization” ,Presence: Teleoperators and Virtual Environments (MIT Press) , 9 (3) , 287-309, 2000.
- [6] 田村善昭, "サイエンティフィック・ビジュアライゼーションのための人工現実感技術," 日本機械学会誌, Vol.102, No. 971, 1999年10月, pp. 636-638.
- [7] 田村善昭, "スーパーコンピュータでのVRの利用," 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 6, No. 3, 2001年12月, pp. 172-176.
- [8] 江本正喜, 矢野澄男, “立体画像観視時における両眼の輻輳と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係”, 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.3, pp.447-454 (2002).
- [9] 稲見昌彦, 川上直樹, 前田太郎, 舘暲, “物体近傍映像提示ディスプレイ「バーチャル・ホログラム」の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会 第8回大会論文集, 1996年10月

- [10] 川上直樹, 稲見昌彦, 前田太郎, 舘暲, “バーチャルホログラムの手法によるメディアキューブの試作”, 日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集, pp.99-100, 1996
- [11] 稲見 昌彦, 川上 直樹, 柳田 康幸, 前田 太郎, 舘 暲, "オブジェクト指向型ディスプレイの研究(第2報)ー投影型オーグメンテッドリアリティへの応用ー", Human Interface N&R, Vol.13, No. 2, pp. 219-222, 1998.
- [12] 清川清, 倉田義則, 大野浩之, “相互隠蔽を実現する光学透過型ヘッドマウントディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, 2000年9月
- [13] 内田貴之, 佐藤宏介, 井口征士 “DMD 素子を用いた光学シースルー型複合現実感ディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7 No.2 pp.151-158, 2002
- [14] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, "カメラと3次元センサの組み合わせによる現実空間と仮想空間の位置合わせ手法", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.295-301, 1999.
- [15] 加藤博一, Mark Billingham, 浅野浩一, 橘敬八郎, "マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No4, 1999.
- [16] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, “複合現実感における現実空間と仮想空間の融合に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, pp.161-164, 1997.
- [17] 吉田俊介, 星野俊仁, 大関徹, 宮崎慎也, 長谷川純一, 横井茂樹, "大型スクリーンを用いたステレオ視表示に基づく表示誤差の評価とその補正", 日本VR学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.331-338, 1999.
- [18] Hiroshi Ishii, Craig Wisneski, Scott Brave, Andrew Dahley, Matt Gorbett, Brygg Ullmer, and Paul Yarin, "Ambient Displays: Turning Architectural Space into a Interface between People and Digital Information", Proceedings of International Workshop on Cooperative Buildings, pp. 22-32, Springer, 1998.
- [19] Jun Rekimoto, "The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments", in Designing Communication and Collaboration Support Systems, Yutaka Matsushita (ed.), Gordon and Breach Science Publishers, 1999.

- [20] 柴野伸之, 澤田一哉, 竹村治雄, "マルチプロジェクタを用いたスケーラブル大型ドームディスプレイ CyberDome の開発", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.3, pp. 327-336, 2004.
- [21] Masami Yamasaki, Tsuyoshi Minakawa, Haruo Takeda, Shoichi Hasegawa, and Makoto Sato, "Technology for Seamless Multi-Projection onto a Hybrid Screen Composed of Differently Shaped Surface Elements", Proceedings of the 7th Annual Immersive Projection Technology (IPT) Symposium, 2002.
- [22] 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.233-240, 2000
- [23] Ryugo Kijima, Kenji Haza, Yoshihiro Tada, Takeo Ojika, "Distributed Display Approach using PHMD with Infrared Camera", International Conference on Virtual Reality 2002 (VR2002), pp. 33-40, IEEE, 2002.
- [24] 近藤大祐, 中山裕生, 木島竜吾, "PHMD (Projection Head Mounted Display) とアプリケーション", 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU2002), 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.555, pp.1-6, 2003.
- [25] Ryugo Kijima, Michitaka Hirose, "A Compound Virtual Environment Using the Projective Head Mounted Display", Proceedings of International Conference on Virtual Reality Software and Technology '95 (Procs. of ICAT/VRST '95), pp.111-121, 1995.
- [26] 後藤敏之, 中山裕生, 近藤大祐, 木島竜吾, "患者モデルへの投影による医学教育支援", 日本バーチャルリアリティ学会 第8回大会論文集, pp.555-558, 2003.
- [27] Yohan Baillot and Jannick P. Rolland, "Automatic modeling of knee joint motion for the Virtual Reality Dynamic Anatomy (VRDA) tool", Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality '99, 30-35, IOS Press, 1999.
- [28] Ramesh Raskar, Matt Cutts, Greg Welch, Wolfgang Stuerzlinger, "Efficient Image Generation for Multiprojector and Multisurface Displays," Proceedings of the 9th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, 1998.

- [29] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin, and Henry Fuchs, "The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays", Proceedings of SIGGRAPH '98, pp. 179-188, ACM-SIGGRAPH, 1998.
- [30] Yoshihiro Yasumuro, Osamu Oshiro, Masataka Imura, Yoshitsugu Manabe, Kotaro Minato, Kunihiro Chihara, "Visual and Haptic Interface for Ultrasound Probing Instruction in Tele-echo System", Procs. of the 8th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2002), pp.863-870, 2002 年 9 月.
- [31] Dave Shreiner, "The OpenGL Reference Manual Version 1.4", Addison-Wesley Professional, 2004.
- [32] Jackie Neider, Dom Davis, Mason Woo, "OpenGL Programming Guide", Addison-Wesley Publishing Company, 1993.6.
- [33] Toshiyuki Goto, Daisuke Kondo, Makoto Kouno, Ryugo Kijima and Yuzo Takahashi, "Development of medical educational platform", Proceedings of 10 th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2004), pp.686-694, 2004 年 11 月.
- [34] 竹内重五郎, 「内科診断学」, 南江堂, 1964.
- [35] 上田英雄, 竹内重五郎, 豊倉康夫, 「腹痛」, 南江堂, 1977.
- [36] 3Space FASTRAK USER'S MANUAL, POLHEMUS.
- [37] 近藤大祐, 後藤敏之, 河野誠, 木島竜吾, 高橋優三, "人型への投影を用いた医学教育システム", 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集, pp.537-540, 2004 年 9 月.
- [38] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行, "現実空間と仮想空間の位置合わせ手法—ステレオカメラと 3 次元センサの組み合わせ—", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU' 98) 論文集 I, IPSJ Symposium Series Vol.98, No.10, pp.I・7-I・12.
- [39] 和田秀三, "確率統計の基礎", サイエンス社, 1985.

なお, [1] [2] については第 2, 4 章に分割して記述, [3] については第 2 章に要約して記述した。

図一覧

図 1.1 人体解剖模型の一部.	2
図 1.2 CABIN (東京大学 IML).	4
図 1.3 隠蔽矛盾の生じている提示例.	5
図 1.4 映像提示デバイスの視覚置換面の配置の違い.	6
図 1.5 MEDIA ³ .	7
図 1.6 手元作業型アプリケーションにおける表示面の配置.	8
図 1.7 手先での仮想物体操作デバイスのバリエーション.	10
図 1.8 実物体を使用したインタラクション.	11
図 1.9 Tangible Bits.	11
図 2.1 PHMD による医療シミュレータ.	18
図 2.2 壁面への映像投影 (Office of the Future Project).	18
図 2.3 歪み補正を用いない投影表示の構成.	20
図 2.4 双対レンダリング概念図.	22
図 2.5 FFPD による重畳表示例.	26
図 4.1 バーチャル解剖模型システム構成図.	31
図 4.2 3SPAC EFASTRAK.	32
図 4.3 人型スクリーンと取り込んだモデルデータ.	33
図 4.4 頭部計測用センサ.	34
図 4.5 システム寸法図.	35
図 4.6 FFPD を用いたバーチャル解剖模型実行写真.	36
図 4.7 人型スクリーン上での歪みシミュレーション.	39
図 4.8 計測誤差による表示歪みのモデル.	40
図 4.9 計測誤差に起因する表示歪みのシミュレーション.	41
図 4.10 シースルー HMD における表示歪みのモデル.	43
図 4.11 計測誤差に起因する表示の歪み (HMD 使用時).	43
図 4.12 誤差の大きさと視野中心での歪み量.	45

図 4.13 システムの座標系概念図.	47
図 4.14 治具.	49
図 4.15 投影によるスクリーンずれの検出.	51
図 4.16 投影光の補正と対応する行列.	51
図 5.1 外形物体.	54
図 5.2 自由曲面投影ディスプレイでの試行.	55
図 5.3 実験 3 で使用するモデルの外観.	56
図 5.4 解答用コントローラ.	57
図 5.5 実験 2 で使用するモデルの外観.	59
図 5.6 実験 3 で使用するモデルの概観.	62
図 6.1 実験に使用した CG 内臓モデル.	66
図 6.2 実験に使用した自由曲面ディスプレイ教材.	67
図 6.3 実験に使用したメディカルイラスト教材.	68
図 6.4 学習実験の様子.	69
図 6.5 各テーマでの FFPD と紙の教材使用時の平均点の比較.	71

表一覧

表 1.1 オブジェクト指向ディスプレイに期待される利点.	15
表 4.1 作成した医学教育シナリオ.	29
表 4.2 プロジェクタ仕様.	31
表 4.3 スクリーン物体詳細.	33
表 4.4 マーカ各点の座標値.	49
表 5.1 使用デバイスの組み合わせ.	53
表 5.2 実験 1 結果.	57
表 5.3 実験 1 達成時間変化の平均と統計量.	58
表 5.4 実験 2 結果.	60
表 5.5 実験 2 達成時間変化の平均と統計量.	61
表 5.6 実験 3 正答率の差と統計量.	63
表 6.1 実験における学習テーマ.	65
表 6.2 試験点数一覧.	71

謝辞

本論文をまとめるに当たっては、岐阜大学応用情報学科木島竜吾助教授から、本研究の全課程を通じ、終始ご親切なご教示およびご鞭撻を賜りました。衷心より感謝申し上げます。岐阜大学小鹿丈夫名誉教授には、懇切なるご指導およびご助言を賜り、ここに甚大なる感謝の意を表す次第です。岐阜大学医学部高橋優三教授には、熱心なご指導、ご助言をいただき、また、実験を行うに当たり多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

研究を進める中で、日頃相談に乗っていただきました IAMAS・情報科学芸術大学院大学の小林孝浩氏、東京大学 IML 研究機関研究員の田川和義氏に深く感謝申し上げます。また、バーチャル解剖模型の製作にあたりご協力いただきました岐阜大学工学部応用情報学科博士前期課程2年の後藤敏之君、同工学部4年の中谷正明君に感謝致します。

最後に、本研究を遂行するにあたって、ご指導、ご協力いただいた岐阜大学工学部応用情報学科木島研究室の皆様、岐阜大学バーチャルシステム・ラボラトリーの関係者に感謝申し上げます。

平成 17 年 10 月