

東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

平成 28 年度
修士論文

空中触覚フィードバックを有する
インタラクティブボックス
立体映像システム

2017 年 3 月 10 日提出

指導教員 篠田裕之 教授

木村優太

概要

2016年、VR元年と称され社会的にも、HMDの存在がより脚光を浴びだした。VR環境に没入できるHMDだが、“立体視”を可能にする技術であるという事も重要な要素である。この立体視を可能にする手法は、HMD等装置の装着を要するもの以外に、装置の装着を要さない裸眼立体視がある。裸眼立体視はHMDに比べ視野角に課題があるものの、装着の手間が無く、複数人で映像を共有できるものが多い。立体視の手法について簡単に述べたが、立体映像を何に応用するかという点も考慮すべきである。ゲームやアミューズメントはもちろん、産業現場、医療、教育等様々な応用分野がある中、ここではとりわけUI(ユーザーインターフェース)への応用に注視したい。例にコンピュータを挙げれば、2次元のディスプレイに対し、キーボードやマウスといった2次元のUIを用いるのが普通であった。これに対し、近年進む立体映像技術が普及し、映像が3次元化した場合、当然UIの変化も誘起されると考えられる。よって、“立体映像の研究”と“UI(人間と立体映像の関わり合い)の研究”は切り離せないものであると言える。後者を考える上で重要となるキーワードに“触覚”があると唱える研究者は少なくない。映像が立体化した場合、触れたい事自然であり、触れた場合“触感”がある事も自然だからである。本研究は“立体映像の研究”として、触覚フィードバックを有する裸眼立体映像システムの提案をし、同時に“UI(人間と立体映像の関わり合い)の研究”として、立体映像に対するユーザの操作性が、触覚フィードバックを付与する事で向上するかを、製作したシステムにより検証する事を目標とする。

キーワード: 立体映像, 非接触触覚フィードバック, インタラクティブ

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	提案システム応用例	5
1.3	研究目的	6
1.4	論文構成	6
第 2 章	提案システム	7
2.1	立体描画部	8
2.2	センシング部	13
2.3	触覚生成部	15
2.4	相関	16
第 3 章	アプリケーション	18
3.1	シリンダーの変形	18
3.2	直方体の回転	20
第 4 章	トレース実験	22
4.1	目的	22
4.2	実験方法	22
4.3	実験結果	28
4.4	考察	33
第 5 章	結論	38
5.1	提案システム	38
5.2	検証実験	39
	謝辞	41
	参考文献	42

第 1 章

序論

1.1 研究背景

本研究では特別な装置を装着することなく、立体映像とインタラクションを行うことが出来る装置を開発した。提案システムの概略図を図 1.1 に挙げる。立体映像に着目しても、触覚フィードバックに着目しても様々な研究がなされている今日、本研究の新規性・意義を明確にするのが本節の目的である。まず、新規性を論じるにあたり、製作した装置について以下のように言い換える。

「”プログラマブル”な”裸眼立体映像”に対し、”非接触触覚フィードバック”を有するインタラクションが可能なシステム」

本研究の新規性は、上記の”裸眼立体映像”、”プログラマブル”、”非接触触覚フィードバック”という3つの特性を兼ね備えている点にある。では、この3つの特性について、意義と詳しい性質をそれぞれ先行研究等を挙げながら論じていく。

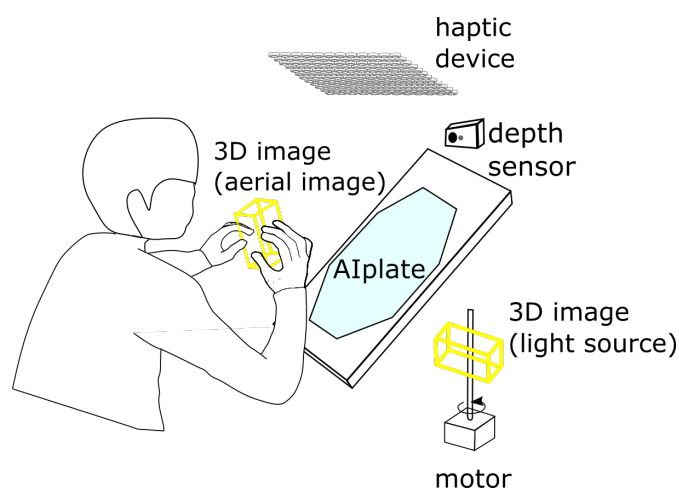


図 1.1. 提案システム概略図

1.1.1 裸眼立体映像

まず”裸眼立体映像”であるが，本研究における立体映像描画手法を選定した理由を述べるため，数ある立体映像の手法について簡単に触れる．ここでは図 1.2 のような分別を行った．現在脚光を浴びている Oculus rift[1] 等の HMD は装着式に大別される．左右それぞれ赤・青

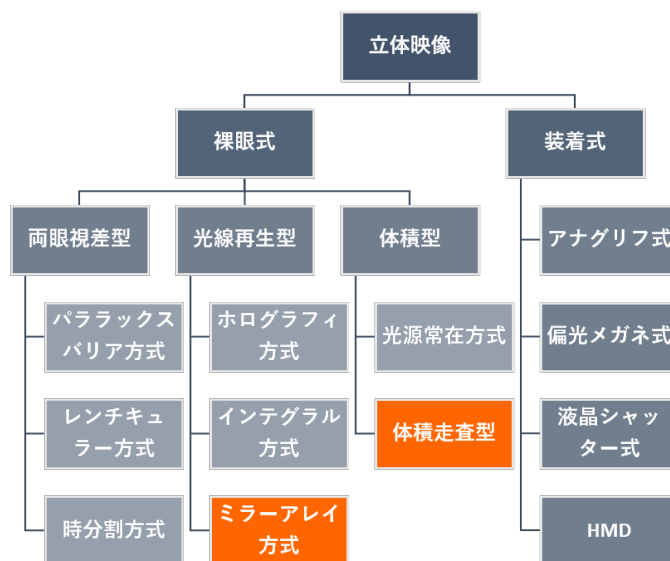


図 1.2. 立体映像の分類

色のフィルムを張り付けたメガネを用いるアナグリフ式や，現在 3D 映画にも用いられている偏光メガネ等も同様に装着型に大別したが，これらは全て文字通り，立体視には装置の装着を要する．他に，仕様によってはクロストークによって立体視しづらい角度が存在するという特徴がある．クロストークが起こりえない HMD に関しては，映像を多人数で共有しづらいという特性を持つ．これらに対して，装置を装着する手間の無い裸眼式においても様々な手法が提案されている．その内の体積型は光源が空間中三次元的に分布するもので，人間の知覚特性とは関係なく映像自体がそもそも立体を形成する手法である．産総研によるプラズマ発光を利用した 3D 映像 [2] や，落合らによる，浮遊させた個体で 3D 形状をかたどる Pixie Dust[3] は，光源が定常的に存在する為，体積型のうち光源定在方式として分類した．ただしプラズマを用いた方式は安全上に問題があり，接触に危険を伴う．落合らによって，危険性を軽減した Fairy Lights [4] が発表されているが，いずれにせよ解像度に大きな課題が残る．体積型の内，比較的高解像度を実現するのが，体積走査型である．これは空間中に光源を時分割で発光させる手法であり，例えばディスプレイごと回転させ，立体映像を描画する Full Turn ECAL[5] 等数多くの手法が提案されている．ほかの手法と組み合わせる等の工夫を講じない限り，映像に接触することが出来ないという特徴がある反面，光源定在方式に比べ高い解像度で描画しやすいという特徴がある．次に両眼視差型であるが，別の映像を同時に描画し，それぞれが光学的

に左目・右目に知覚される手法に、パララックスバリア方式とレンチキュラ方式が代表される。左右の映像を分割する遮蔽部によって映像が暗くなってしまうパララックスバリア方式に対し、レンズによる屈折によって左右の映像を分割するレンチキュラ方式は映像が暗くなることはない。両手法とも、ディスプレイと等しいフレームレートで映像を描画出来るが、視野角が狭く複数人での共有が難しい。もう一つの両眼視差型として、時分割方式を挙げた。左右の映像を同時に描画する、前述した2手法に対して、時分割で映像を変化させる手法である。例に、館らによる HaptoMirage[6] はディスプレイ前にスリットを置き、映像変化と同時に光路を変え、左右に別の映像を知覚させている。時分割で映像を変化させる分、ディスプレイ本来のフレームレートの半分になるが、設計によっては広い視野角を確保し、複数人での共有も可能になる。ただし両眼視差型で挙げた3手法は、目の焦点は立体映像の奥行位置に関わらず表示画面に調節されるため、輻輳点と調節点が一致せず、視覚疲労の原因になるという指摘がある。人間の立体視における知覚特性をすべて満たす手法としては、光源が立体を成す体積型の他に光源再生型が挙げられる。3D イメージの光学的空間像を再現するインテグラル方式やミラーアレイ方式と、光の波面自体を再現するホログラフィ方式の3手法に代表される。まず、インテグラル方式は高精細ディスプレイとレンズアレイによって構成させるシステムで、3D テレビへの応用等が期待されている。次に、ミラーアレイ方式は直行するミラーに入射光が2度反射することで、光源と反対側に光学的空間増が再結像する方式である。この手法を用いたアスカネット社による AIplate[7] は多くの研究に応用されている。最後に、ホログラフィ方式は光の干渉網を記録し、像の三次元情報を復元することが可能な技術である。人間の立体視における知覚特性を全て満たす、究極の立体像として近年研究が盛んに行われているが、現状大きな立体像を描画することは難しく、視野角にも課題が残る技術である。ここまで、立体映像を描画する手法について映像の性質によって分別しながら述べてきた。これらを踏まえ本研究は、次の4点を基準に立体映像の描画手法を選定した。

1. 裸眼式

- 実空間上における立体映像とのインタラクションを可能にするため。
- 装着の手間を省くため。
- アプリケーションによっては複数人での情報共有を簡単にするため。

2. 立体視における知覚特性を満たす

- 視覚疲労の発生を可能な限り抑えるため。

3. 手元への空中結像

- 立体映像に対し、実際に触れるようなインタラクションを可能にするため。

4. 低コスト

- 装置を製作する際の時間的コストを軽減するため。

これら4条件を満たす立体映像描画手法として、本研究では図 1.2 における朱色で網掛けした、体積走査型・ミラーアレイ方式の2手法を組み合わせた光学系を制作した。体積走査型を用い、光源自体を三次元形状にする事で、人間の立体視における知覚特性を全て満たす裸眼立体映像を描画することができ、条件1と条件2を満たす。ただし、採用した体積走査型では立

4 第1章 序論

体映像結像位置に光源が存在しているため、映像に触れることが出来ず条件3を満たさない。そのため、ミラーレイ方式によって光線を空中に再結像する光学系を組み、ユーザが立体映像に触れることのできる環境を構築した。今回、ホログラフィ方式やインテグラル方式を使用しなかったのは、条件4を考慮したためである。

1.1.2 プログラマブル

ここでいう”プログラマブル”とは、映像が実体ではなく計算機によって自由に生成できるものである事を指す。ユーザ対実物体間のインタラクションを実現したシステムとの対比を明確にするために挙げた特性である。”裸眼立体映像”，”非接触触覚フィードバック”を満たすが、インタラクションの対象がプログラマブルな映像ではなく、実物体である先行研究に牧野らによる HaptoClone[8] を挙げる。この装置は、視覚的・触覚的クローンを相互に生成するもので、ユーザとユーザ間のテレコミュニケーションを想定している。実物体自体を光源として立体結像させる為、高解像度な映像を描画可能であるが、映像を自由にハンドリングしたり変形させる等のインタラクションは行えない。これに対し新たな UI の可能性を探ることを目標にした本研究は、像が固定された実物体ではなく、プログラマブルな映像光源を要する。

1.1.3 非接触触覚フィードバック

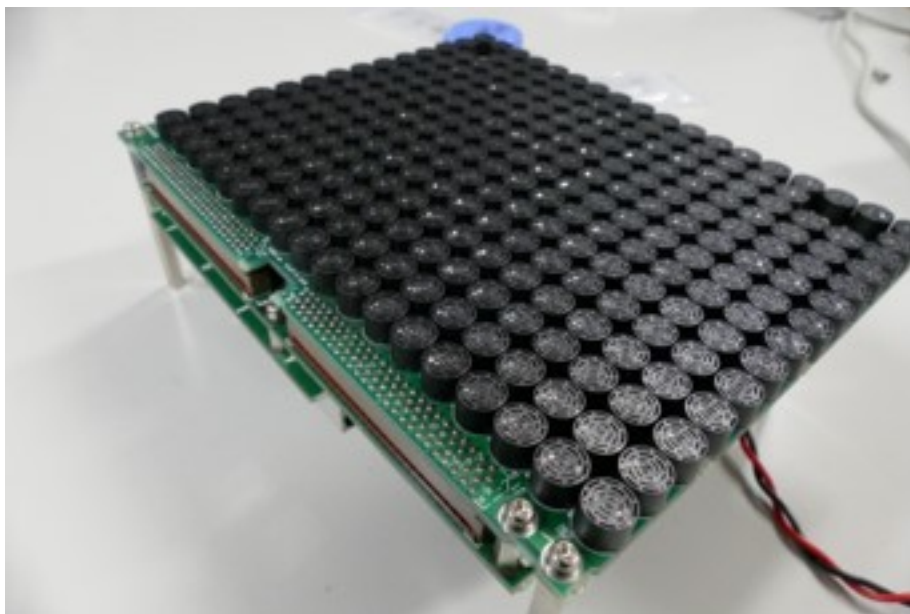


図 1.3. 超音波収束装置 (AUTD)

非接触とは、ユーザが何らかの装置を直接装着しなくても触覚フィードバックを得られる環境を指す。古くから、映像への接触に触覚フィードバックを発生させるシステムが多く発表されている。装着型に関しては、ピンアレイの隆起を用いたものや、振動刺激や電気刺激を使用

したもの等数多くの手法が提案されているが、空間分解能に限界があるだけでなく、装着をすることで刺激の対象部が隠れてしまい、実物とのインタラクションと比べると体験的違和感を感じざるを得ない。これに対し、ユーザが非装着状態で触覚フィードバックを得られるシステムは、視覚的により実物とのインタラクションと似た環境でインタラクションを行うことが出来る。例に、ディズニーリサーチによる AIREAL[9]がある。これはリング上のエアを身体で受けることで触覚フィードバックを得るものである。ただし、空気の塊を用いているため、触感の空間解像度とフィードバック発生までの時間応答に制限がある。これに対し、篠田らによって開発された超音波収束装置 [10](図 1.3)は超音波スピーカーをアレイ状に並べたもので、各振動子の位相を制御することで、空中任意の位置に音響放射圧による圧力分布を発生させることが出来る。焦点の空間分解能が直径数 cm 程度であり、音波を用いているため、フィードバック発生までの時間応答も音速となる。

1.2 提案システム応用例

本研究は立体映像を空中描画するだけでなく、接触の際に触覚をフィードバックするシステムを提案している。そのため将来像の一つとして、遠隔地における双方にカメラと本システムを設置することにより、触覚を付加したテレグジスタンスが実現し得る(図 1.4(b))。次に二つ目として、操作性において近年研究(Henriらによる新しいユーザインターフェースの提案[11]など)が行われている3DCADについての応用も期待できる(図 1.4(a))。現在の二次元インタフェースで立体物を設計することの困難さは古くから指摘されており、3Dプリンターで等スケールの物を具現化したり、HMDを装着してAR空間で視認する手法が試みられている。これらに対し、本提案システムでは浮き出た立体三次元映像に直接接触することが出来、装置を装着したり材料を逐一消費したりすることなく3次元の物体を操作し、設計を進めることができる。

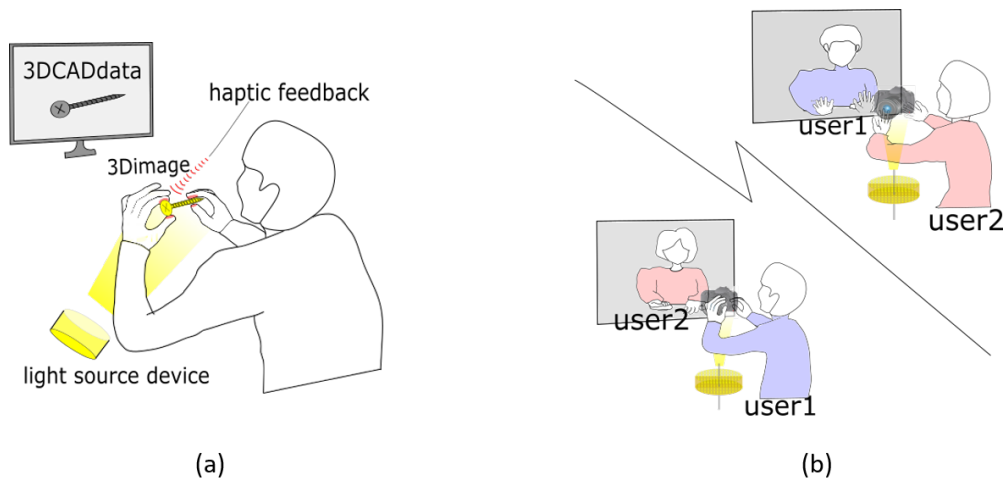


図 1.4. (a): 3DCAD への応用 (b): テレグジスタンスへの応用

1.3 研究目的

ここで本研究の目的を再度まとめておく。「触覚フィードバックを有するインタラクションが可能な立体映像システムの製作」を第一目標として念頭に置き、第二の目標として、「立体映像に対するユーザの操作性が、触覚フィードバックを付与する事で向上するか」の検証を掲げる。

1.4 論文構成

本章では、初めに研究背景として本研究の新規性を明確にする3つの特性を挙げ、各特性における意義と詳しい性質について個別にみてきた。新規性と位置づけを明らかにした後、本研究の提案するシステムについて考え得る応用例をあげ、研究の先にある将来像を論じた。次章”提案システム”では実際に製作を進めてきたシステムについての提案を行う。提案システムは大きく分けて、”立体描画部”，”センシング部”，”触覚生成部”の3セクションから構成される。よって各セクションを個別にみていくことにする。3章では提案システムに実装したアプリケーションの内、例に「シリンダー型オブジェクトの変形」と「直方体型オブジェクトの回転」を挙げ、それぞれのアルゴリズムについて触れる。4章では、本研究の目的の一つである、”触覚フィードバックの付加により、3D物体へのハンドリングやマニピュレーション精度が向上するか検証する”前段階の初期実験として、”触覚フィードバックの付与により、3D物体への奥行知覚精度が向上するかを検証する”という目的を掲げた実験を行ったので、目的、実験方法、実験結果、考察の順に論じていく。

第 2 章

提案システム

実際に開発した装置が図 2.1 である。本装置は大きく分けて、立体映像生成部・触覚生成部・センシング部の 3 つの要素 (図 2.2) から構成される。光学的な構造とワークスペースを明示する為、等角度から見た装置概略図を図 2.3 に示す。

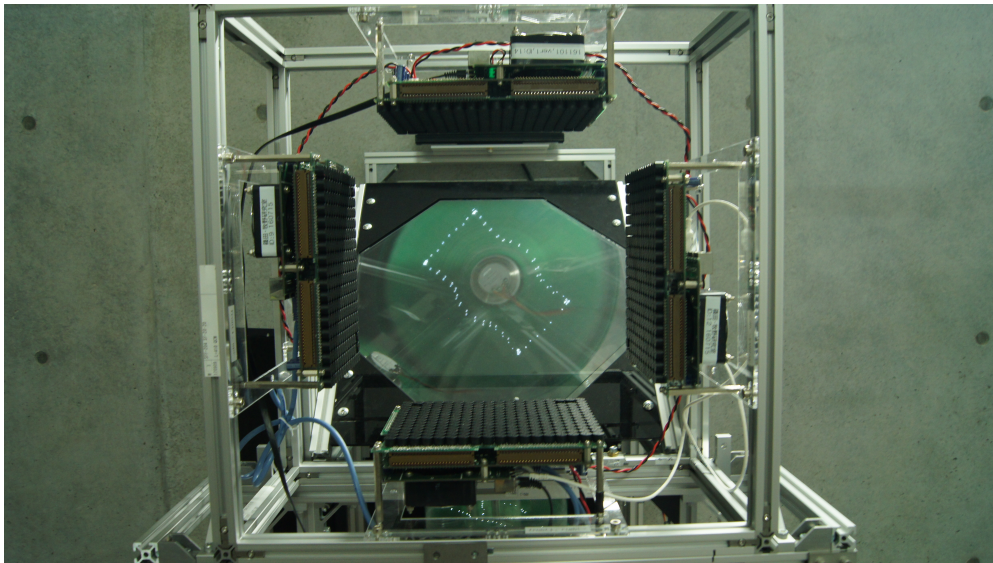


図 2.1. 提案装置 (正面)

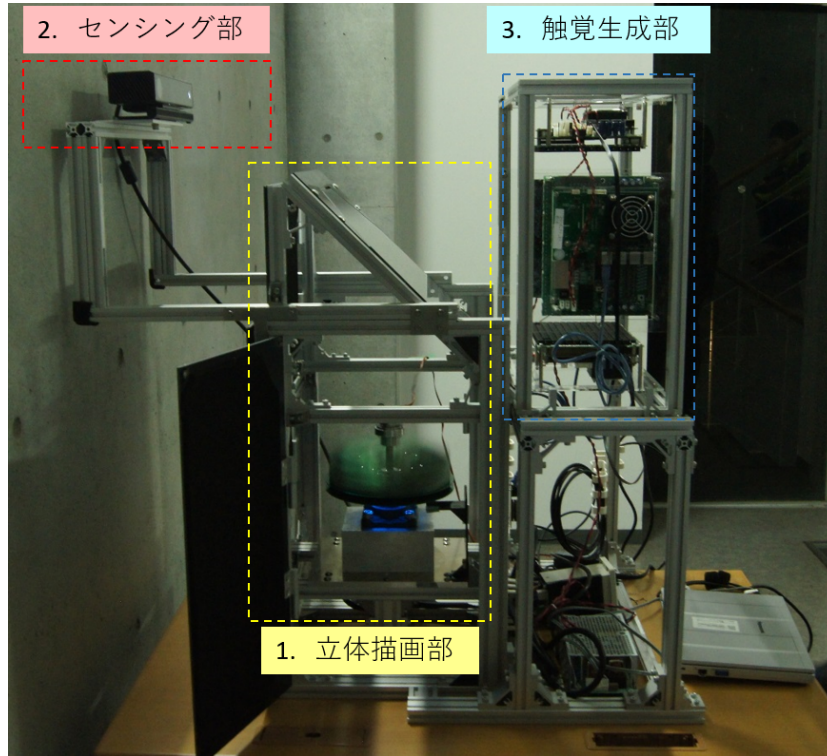


図 2.2. 提案装置 (側面) における構成要素

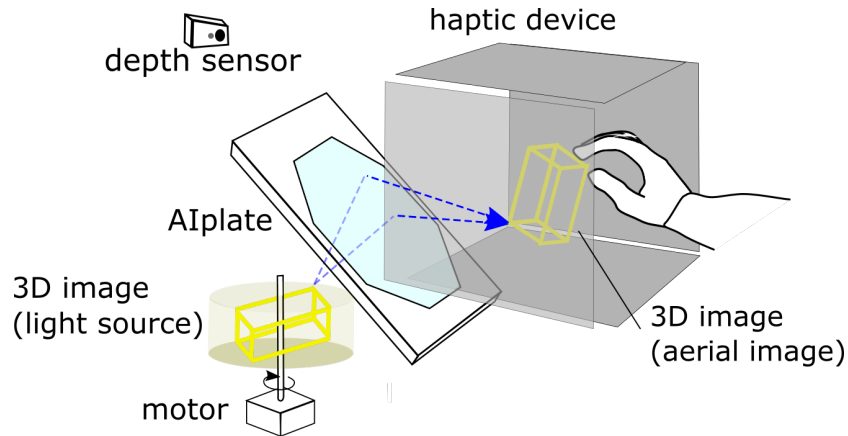


図 2.3. 提案システム概略図

2.1 立体描画部

本装置では序章で述べた通り、体積走査型とミラーアレイ型を組み合わせた立体描画手法を用いている。そのため、各手法に基づく要素をここではそれぞれ”立体光源装置”，”ミラーアレイ”とし、2つのセクションに分けて構成した装置を論じていく。

2.1.1 立体光源装置

立体光源装置では、LED アレイの回転体を用いている。図 2.4(a) が立体光源装置であり、合計 256 個の LED(図中黄色い点) が設置してある。立体描画の原理は、三次元的に LED を配置した円盤を回転させ、回転中適切なタイミングで各 LED を発光させることで、LED 光の残像によるボクセル立体映像が描画される仕組みをとっている。装置を実装した状態でもモーターが安定して駆動する回転速度として、900rpm を設定する。円盤が 1 周する間にある映像パターンが発光されるため、立体映像のフレームレートは 15Hz である。動径方向に 16 個の LED が 3mm 間隔で配置された基板が、3mm 間隔の高さ違いで 16 枚設置してあるため、256 個の LED は空間的にそれぞれ異なる位置に存在する。そのため、例えば 1 回転中の発光更新頻度を 144 回とした場合、 $16 \times 16 \times 144 = 36,864$ ピクセルの空間解像度を持つ。これら LED は図 2.4(c) のように回転円盤に取り付けた mbed というマイコンを用いて制御している。また、インタラクションによる影響は、PC と mbed 間のシリアル通信によって行っている。使用しているモーターにはエンコーダが付属していないため、円盤円周上に取り付けたホールセンサ(図 2.4(b) の赤丸)を用いて回転の情報を取得している。図 2.4(b) のように磁石が固定されており、ホールセンサが磁石上部を通る際に入力電圧が High になり、この電圧を信号として回転の基準点・回転速度の情報を得る仕組みである。最後に、表 2.1 に立体光源装置の主要なスペックをまとめた。

表 2.1. 立体光源装置のスペック

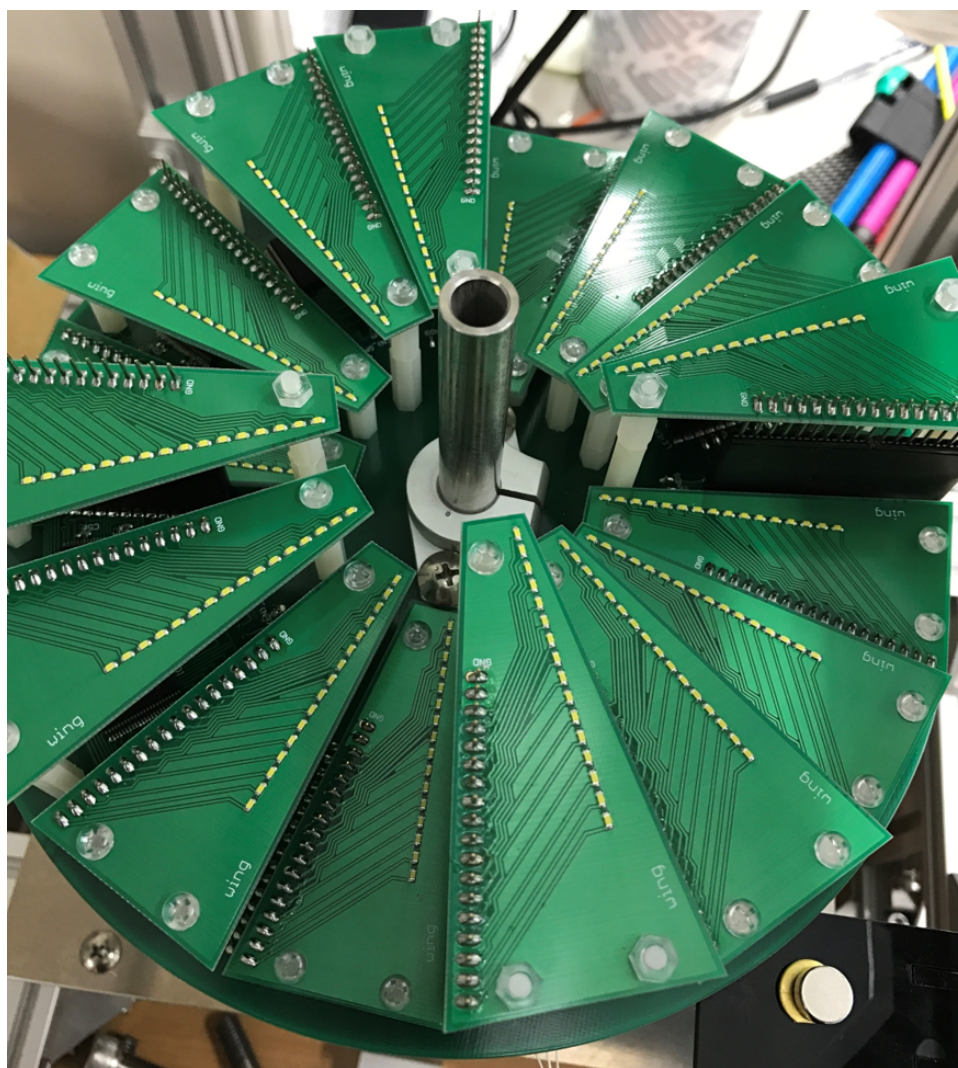
フレームレート	15fps (モーターの回転数に依存するため、十分安定する回転数を設定)
解像度	36,864 (一回転中の発光更新頻度を 144 回に設定した場合)
色	白色光
描画可能範囲	内半径 27mm, 外形半 75mm, 高さ 48mm の中空円筒領域

2.1.2 ミラーアレイ

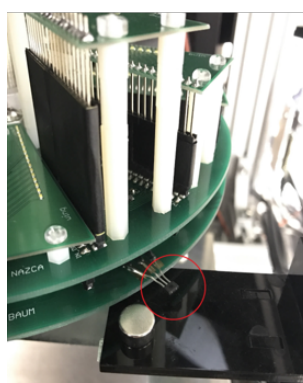
当然、体積走査型である立体光源装置で描画した映像に触れることはできない。よって光源再生型であるミラーアレイを用いて映像の空間像のみを空中に再結像させる。本装置では AIplate というミラーアレイを使用している。光源を AIplate を挟み反対側の仰角 45° の位置に再結像するものであり、図 2.5 のように、奥行情報が逆転する光学的特性を持つ。

2.1.3 立体描画部における立体視の確認

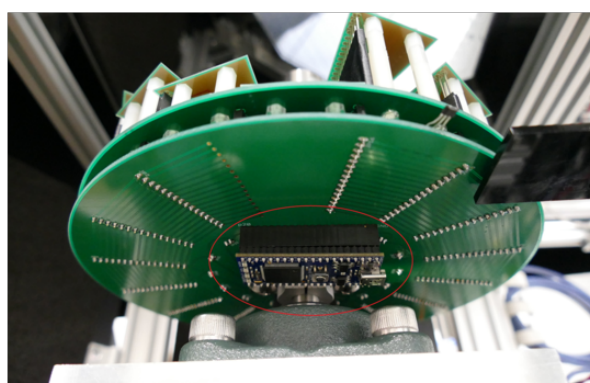
実際に開発した装置の、立体映像生成部に関して簡単な評価を行う。図 2.6 は Unity 内で作成したオブジェクトの表示と、表面の点群座標を取得している画面である。ここでは円筒型のオブジェクトを作成し、立体光源装置における 3D イメージと同期をとる。



(a)



(b)



(c)

図 2.4. 立体光源装置 (a): 立体光源装置全体像, (b): ホールセンサ, (c): mbed

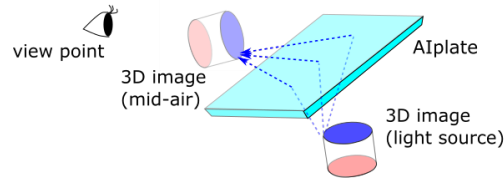


図 2.5. AIplate の光学的特性

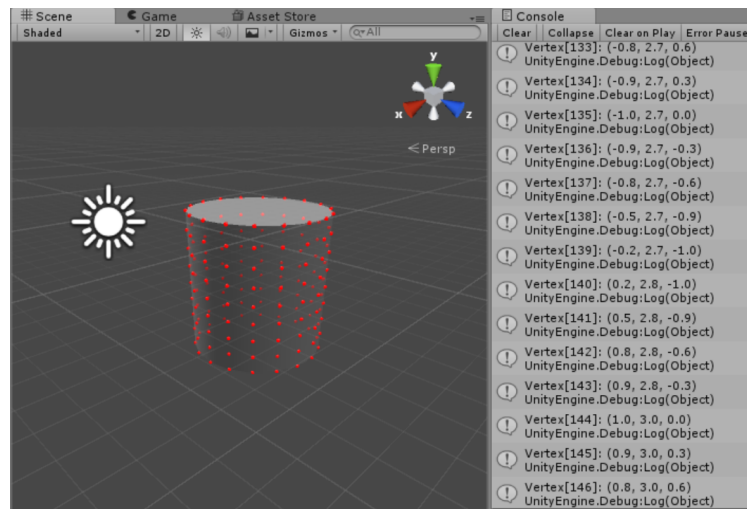


図 2.6. Unity 内で作成したオブジェクトと点群座標

ここで取得した点群の座標に対応する実空間座標に、LED をボクセルとして表示し、描画された立体映像を撮影した画像が図 2.7 である。(a) は上面から、(b) は側面から撮影したもので、二枚の違いから、立体的な円筒形が描画できていることが確認できる。ただしこれは空中結像前の、立体光源装置で描画した状態である。このときの駆動条件は、円盤を 15Hz で回転させているため、映像のフレームレートも 15Hz になっており、この円筒像に使用しているピクセル数は 128 ピクセルである。また、シャッタースピード 1/5 s の撮影条件で撮影をした。

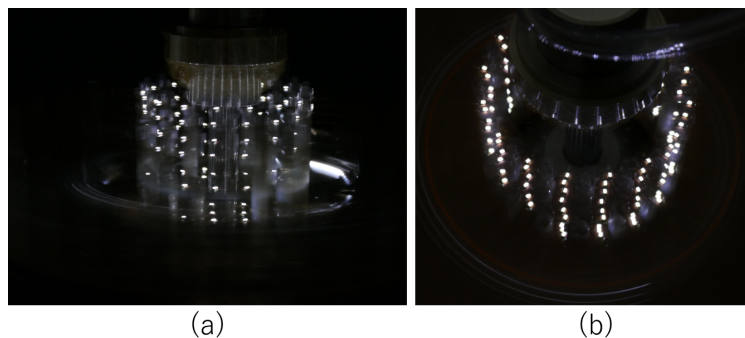


図 2.7. 立体光源装置の駆動 (a):上部 (b):側面

次に、図 2.7 のように立体光源装置で描画した立体映像を、空中結像した際、映像に奥行を感じられるかを評価する。ただし、AIplate の特性上、空中結像された立体映像を正面から見ると、立体光源上部から見た状態が視認される。また AIplate は、2.1.2 で述べたようにユーザの視点から見ると、図 2.5 において赤い面と青い面が逆転して見えるように、実際にも奥行情報が逆転する性質も持つ。

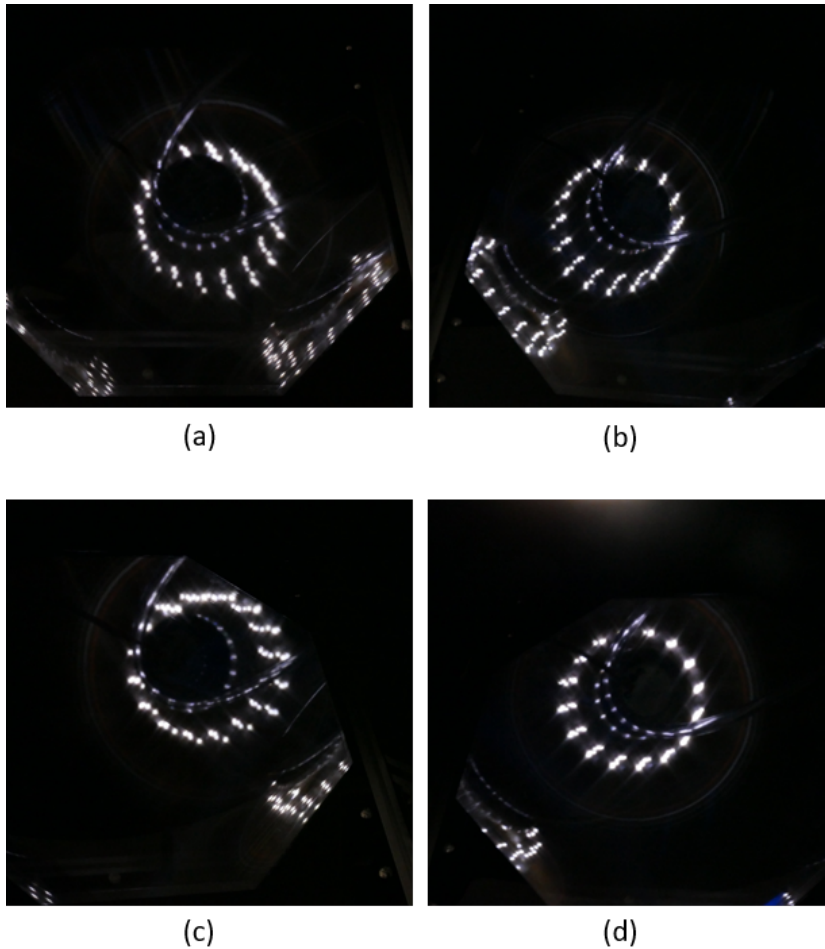


図 2.8. 空中結像された立体映像の撮影 正面に向かって (a):左上から (b):右上から (c):左下から (d):右下から

図 2.8 は、図 2.7 の立体映像を空中結像させたものを撮影した画像である。映像に奥行感があることを確認するため、正面に向かって 4 種類の方向から撮影を行った。例えば、図 2.8(a) の視点からは円筒右下の内側は視認できるが、左上部は LED が重なってしまい、視認することが出来ない。対して、図 2.8(b) の視点からは左下の内側が視認できる反面右上部は視認することが出来ない。これは運動視差によるもので、空中結像された像が立体であることを裏付ける。

2.2 センシング部

センシング部では、ユーザの手の位置・姿勢をセンシングし、3D モデリングツール (Unity) 内にモデル化する。3D イメージに同期したオブジェクトとモデル化された手がインタラクションを行う。この Unity 上でのインタラクション (手のモデル ⇄ 3D オブジェクト) が実空間上でのインタラクション (ユーザの手 ⇄ 立体映像) と同期するように、「Unity 上におけるモデルとオブジェクトの位置関係」と「実空間上における立体映像とセンサの位置関係」を調整する。これによって実空間上でのインタラクションを Unity 内で物理演算処理することが出来る。デプスセンサとして LeapMotion[12] での実装を行っていたが、Kinect[13] を用いたシステムに変更を行った。その理由をそれぞれのセンサにおけるスペックと特徴を踏まえた上で述べる。

2.2.1 LeapMotion

本装置において、ワークスペース内でインタラクションを行うのはユーザの両手のみを想定していたため、手のトラッキングする LeapMotion を用いた (図 2.9(a)). 図 2.9(b) ように、手の外形だけでなく、各指・各指における関節までも識別することが可能である。よって、指の種類を識別を必要とするような複雑なアプリケーションを実装するには適していると考えられる。ただし、手の角度によって、一部が遮蔽されてしまうような姿勢は認識されずらいという点において、十分誤作動なくインタラクションまたは実験を行うには不安定であり、Kinect を用いた新たなシステムの開発も行った。LeapMotion の主要なスペックを表 2.2 にまとめた。

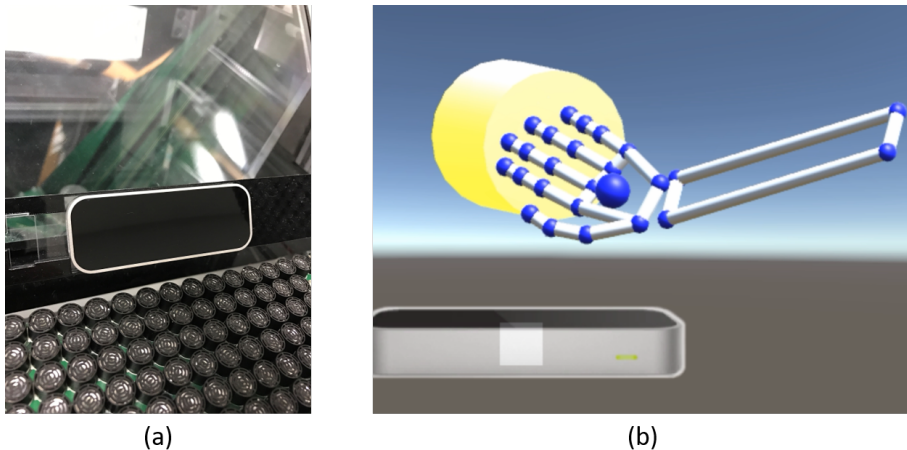


図 2.9. (a): デバイス外観, (b): LeapMotion によって取得した手の 3D モデル

表 2.2. Leap Motion のスペック

方式	三角測量…赤外 LED で対象を照射し，反射光を二つのカメラで撮影
トラッキング速度	60fps (精度重視のプレジジョンモード)
奥行認識範囲	25mm~600mm
特徴	ハンドトラッキング専用

2.2.2 Kinect

LeapMotion が手のトラッキングに特化しているのに対し，Kinect(図 2.10(a)) は Time of Flight 方式により，認識範囲内にある 512x424 点の深度情報を取得可能なデバイスである。即ち，センシングの対象は手に限らず，手の姿勢によってトラッキングが行われなかったりといった症状は起こらない。図 2.10(b) は Kinect で取得した手の深度情報を Unity 内で可視化したものである。LeapMotion で起こる誤認識が無い反面，左手右手の判別・各指の判別・関節の判別をすることが難しいという特徴がある。Kinect の主要なスペックを表 2.3 にまとめた。

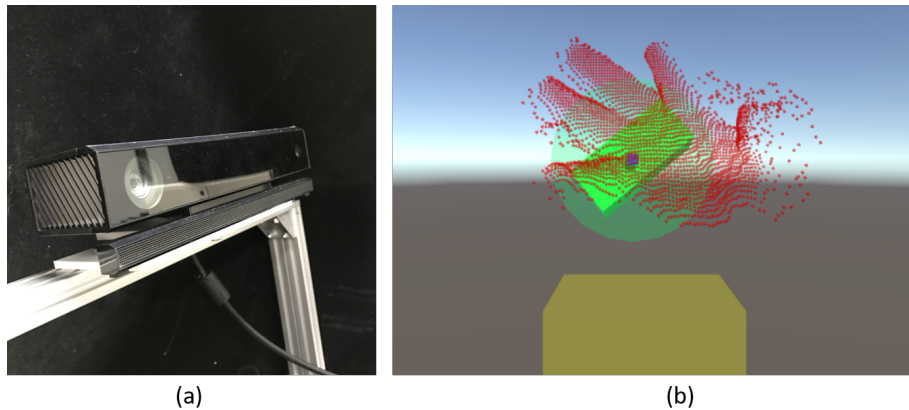


図 2.10. (a): デバイス外観, (b): Kinect による取得データにオブジェクトを生成した手の 3D モデル

表 2.3. Kinect のスペック

方式	Time of Flight…赤外光の点群を照射し，反射光が届くまでの時間で測量
トラッキング速度	30fps
奥行認識範囲	500mm~4500mm
特徴	認識可能領域内の対象を点群でデータ取得

2.3 触覚生成部

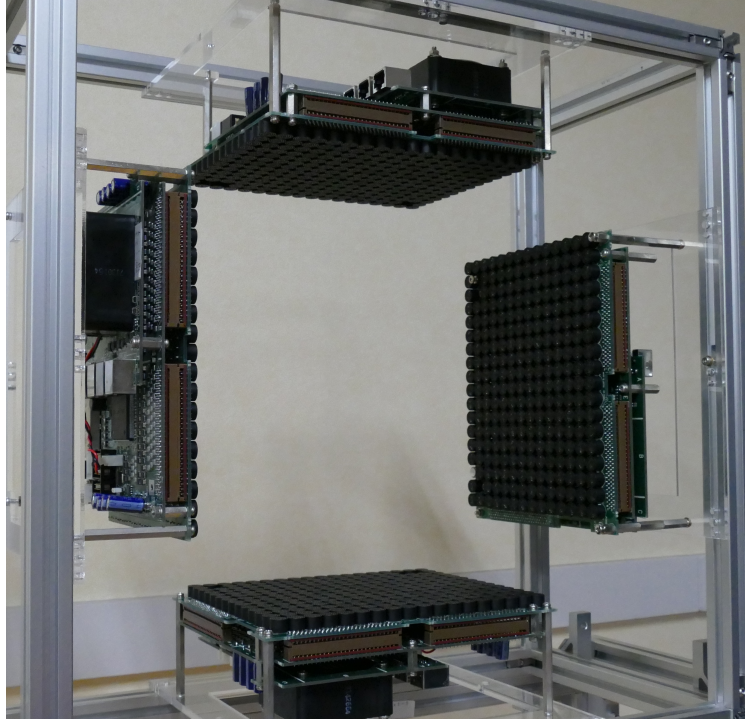


図 2.11. 実装した超音波収束装置

触覚の生成には、非接触によるフィードバックを実現する為、図 2.11 のように超音波収束装置 (以降 AUTD との表記もする) を 4 つ用いる。この装置は各振動子の位相を制御することで、空中任意の位置に音響放射圧を発生させるものである。定在する触像の生成を提案した井上らによる HORN[14] や HaptoClone[8] の触覚クローンを参考にし、AUTD でワークスペースを取り囲む事で、空間中任意の位置に触像を形成させる事が出来る。空中超音波ホログラフィ技術を用い、音響ポテンシャル場を構成するという原理を用いている。この圧力を、3D イメージとユーザの接触点に発生させることで、ユーザは実在感を持って 3D イメージに触れることができる。図 2.12 は触覚フィードバックを受けている様子である。手に持った付箋が収束超音波によってなびいていることがわかる。この圧力を直接ユーザの手で受けることにより、“触っている” という実在感を持ったハンドリングの実現を目指す。

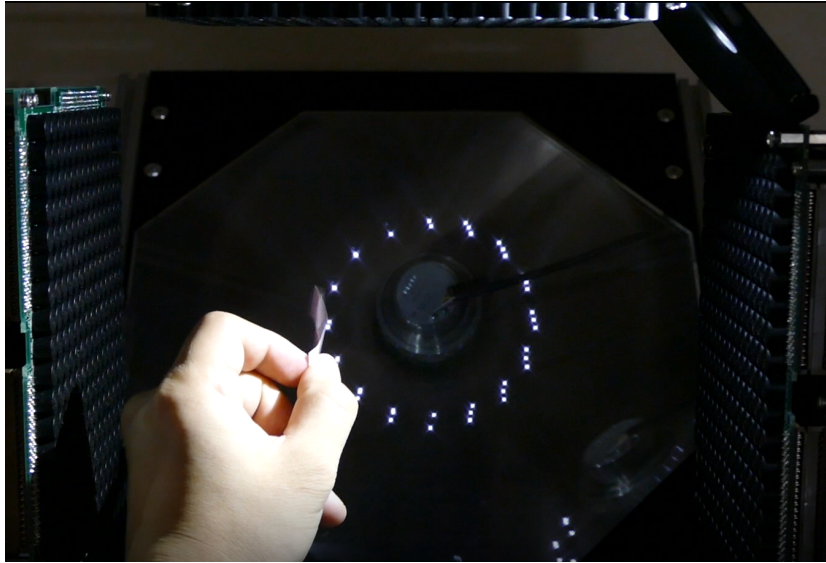


図 2.12. 触覚フィードバック生成の様子

2.4 相関

本装置を構成する3要素(立体描画部・センシング部・触覚生成部)について述べた。ここでは各要素間における情報のやり取りについて述べる。図 2.13 は各要素とユーザ，制御 PC 間の関係を簡単なフローチャートにまとめたものである。

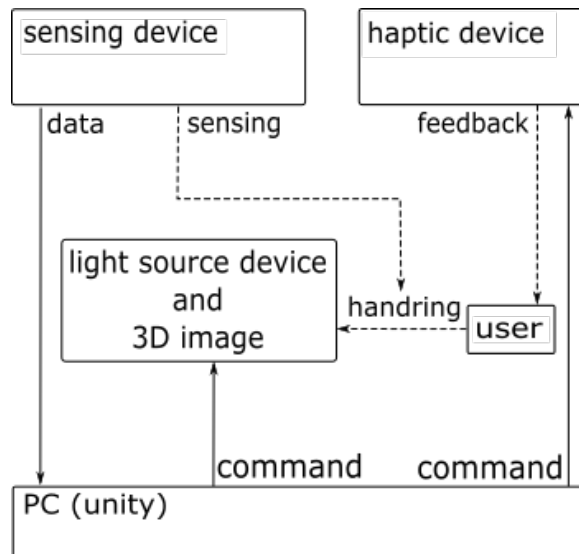


図 2.13. データと作用の流れ

まずユーザが立体映像 (3D image) に接触し，何らかのインタラクションを行う。このハン

ドリングをセンサ部 (sensing device) でセンシングし、手の位置・姿勢情報を制御 PC(Unity) に送る。Unity 上では、立体映像と同期したオブジェクトと、手のモデルが実空間と同じインタラクションを行う。これによる移動・回転・変形をしたオブジェクトの表面点群座標を、リアルタイムに取得すると共に、手のモデルとオブジェクト間の接触点の座標を取得する。接触点の座標データは超音波振動子アレイ (haptic device) に、オブジェクト表面の点群座標データは立体光源装置 (light source device) に送る。接触点座標データを受け取った超音波振動子アレイはその座標に対応した実空間上の座標に圧力を生成し、点群座標データを受け取った立体光源装置は、その点群座標に対応した発光パターンでオブジェクトと同様の 3D イメージを描画する。この手続きを繰り返すことで、リアルタイム且つプログラマブルなインタラクションを実現する。

第 3 章

アプリケーション

製作した装置を用いていくつかのアプリケーションを実装した。ここでは例としてシリンダー型の 3D オブジェクトを変形させるアプリケーションと直方体型の 3D オブジェクトを回転させるアプリケーションを挙げる。

3.1 シリンダーの変形

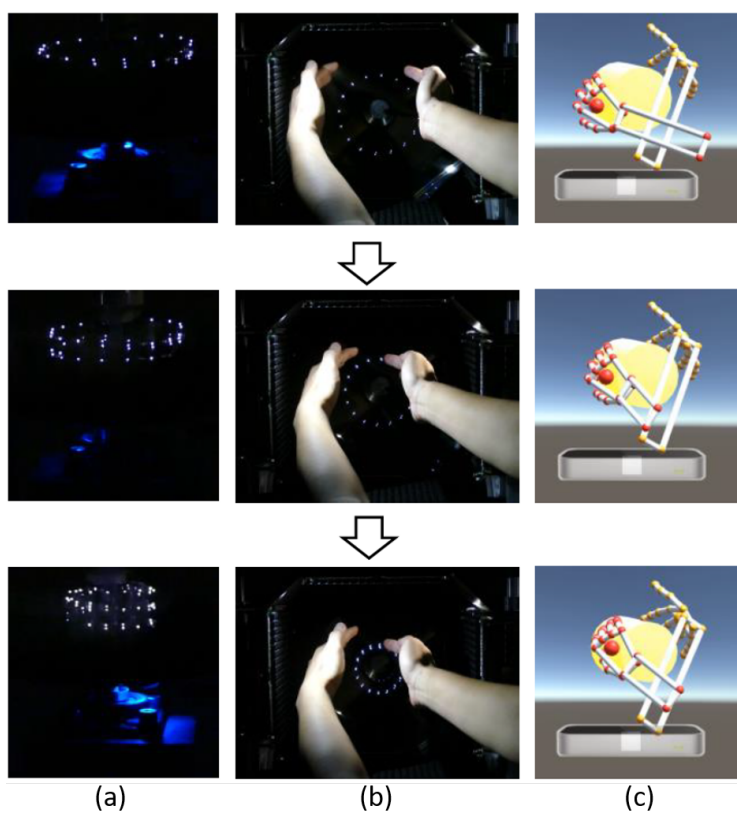


図 3.1. インタラクションの様子 (a): 立体光源装置におけるシリンダー描画 (b): 実空間におけるインタラクション (c): Unity 内でのインタラクション

本システムにおいて、試験的にシリンダー型の3Dイメージを用いたインタラクションを実装した。図3.1(a)のように、LEDボクセルがシリンダー側面に位置するような3Dイメージを描画する。実装したインタラクションは、シリンダーの体積を一定とした変形である。変形パターンは二種類あり、一つ目がシリンダー底面部を押すことで、高さを縮めて底面積を広げる変形である。二つ目はシリンダー側面を押すことで、高さを伸ばし底面積を狭める変形である(図3.1(b))。この押し縮める・引き延ばすという変形は、柔らかい素材へのハンドリング・変形をイメージして実装したものである。Unity上では接触点をAUTDに送り、AUTDが対応する実空間上の座標に触覚を生成する。これと同時にUnityはインタラクション(図3.1(c))を受けたオブジェクトの高さ情報を光源装置に送り、その高さ情報にあった形状変化を反映させるという手続きを繰り返し行っている。この手続きのアルゴリズムをフローチャートにまとめたのが図3.2である。

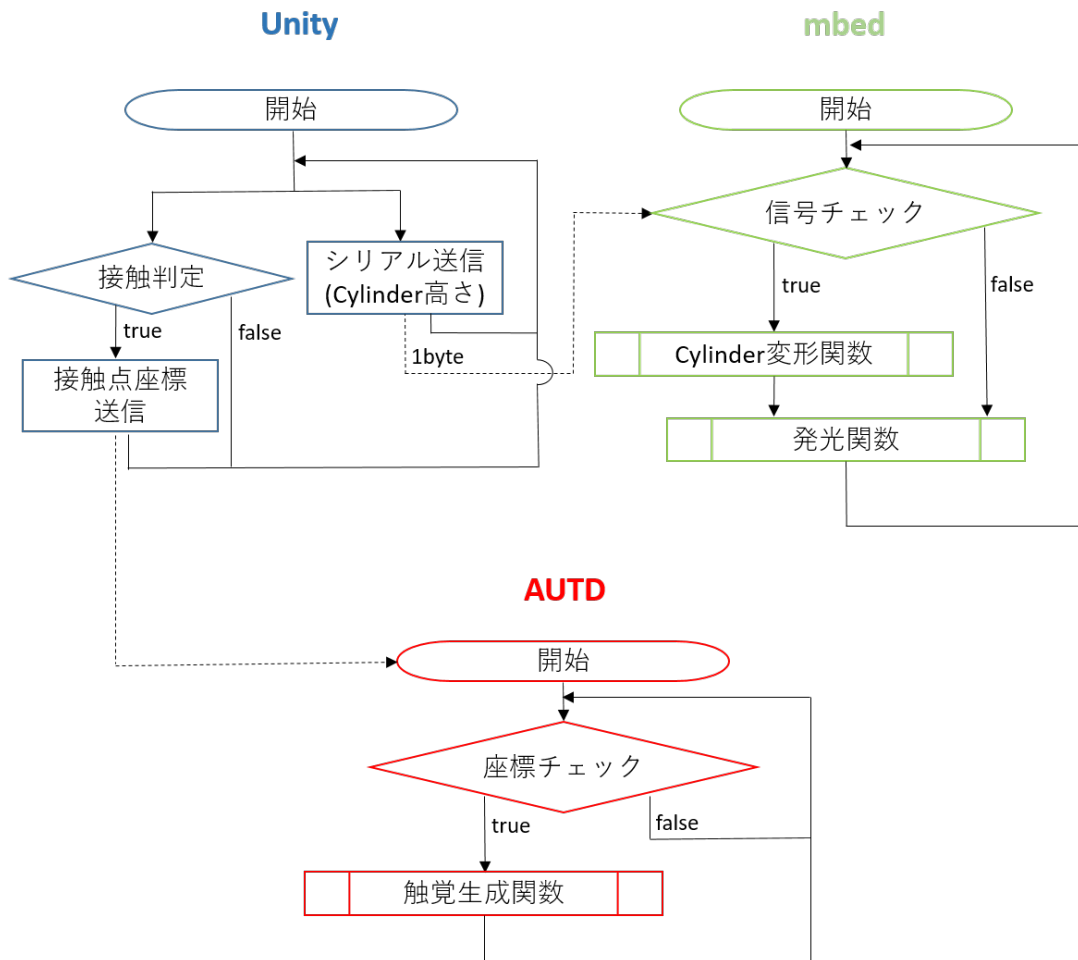


図3.2. シリンダー変形アプリケーションにおけるフローチャート

3.2 直方体の回転

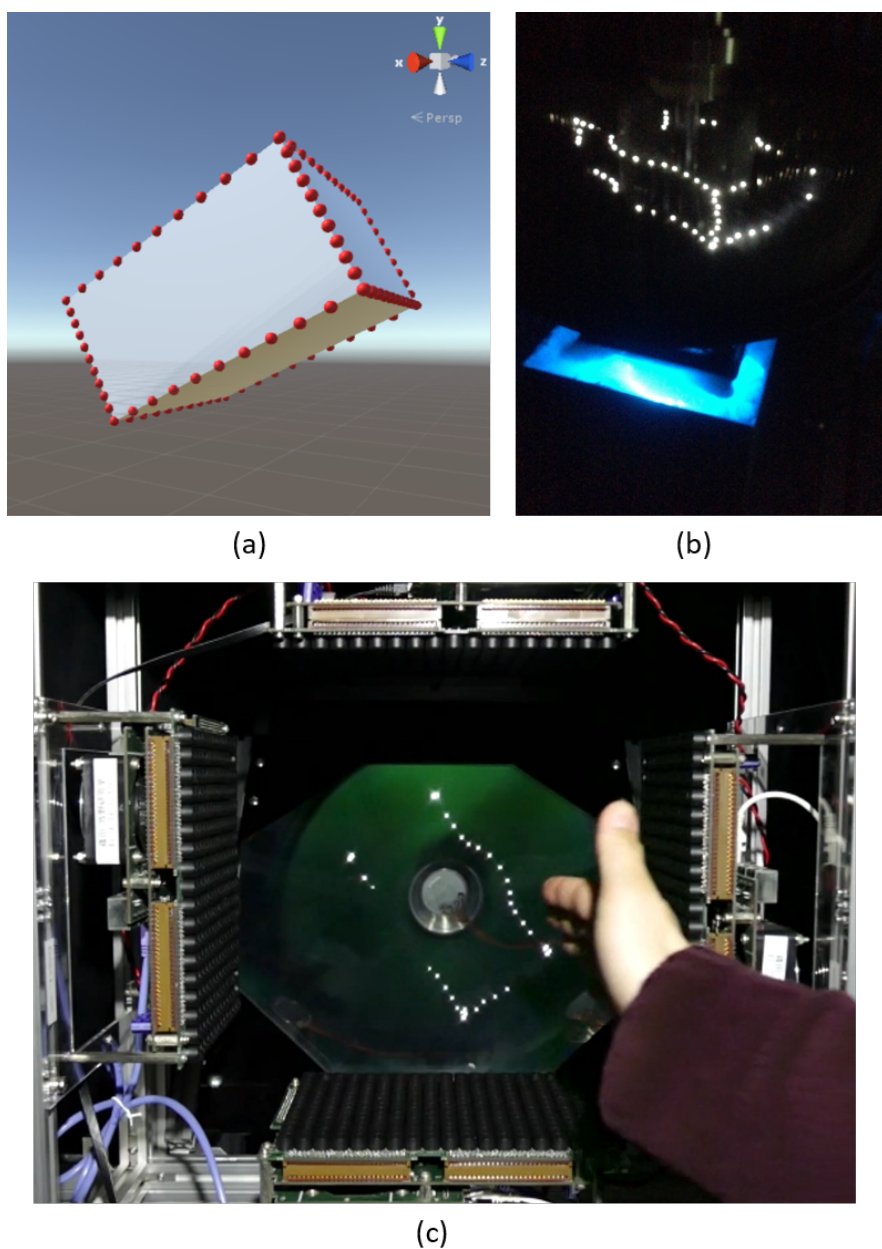


図 3.3. (a): Unity 内の仮想オブジェクトと対応点 (b): 立体光源装置の直方体ワイヤースケッチ (c): インタラクションの様子

光源が回転円盤であるため、前節のように円形イメージの形成は比較的容易であったが、LED 点滅のタイミングを上手く制御すれば直方体等、直線を要するイメージの形成も可能である。ここでは図 3.3(b) のような直方体のワイヤースケッチを描画し、この 3D イメージをユーザの視線を軸として回転させるアプリケーションを実装した。シリンダー変形アプリケー

シヨンは、触覚フィードバックを有する立体像に対する変形というインタラクションを試作したものであった。これに対し、直方体の回転アプリケーションは立体映像に対するハンドリングというインタラクションを試作した。まず unity 内で描画する直方体型のオブジェクトを作成しそのフレームに等間隔でオブジェクトを生成する (図 3.3(a)). 作成した赤いオブジェクトの座標に対応させ、直方体のワイヤーフレームを描画しておく。実空間では、ユーザ視線方向の軸を回転軸としたハンドリングを行う (図 1.4(c)). Unity は接触点を AUTD に送り、AUTD が対応する実空間上の座標に触覚を生成する。また、Unity は作成したオブジェクトとモデリングした手のオブジェクトが、それぞれ実空間上の立体映像とユーザの手に連動し、相互作用を物理演算する。そして Unity 上で変化した直方体オブジェクトの回転角を立体光源装置に送り、立体映像に反映させるといった一連の手続きを行っている。この手続きのアルゴリズムをフローチャートにまとめたのが図 3.4 である。

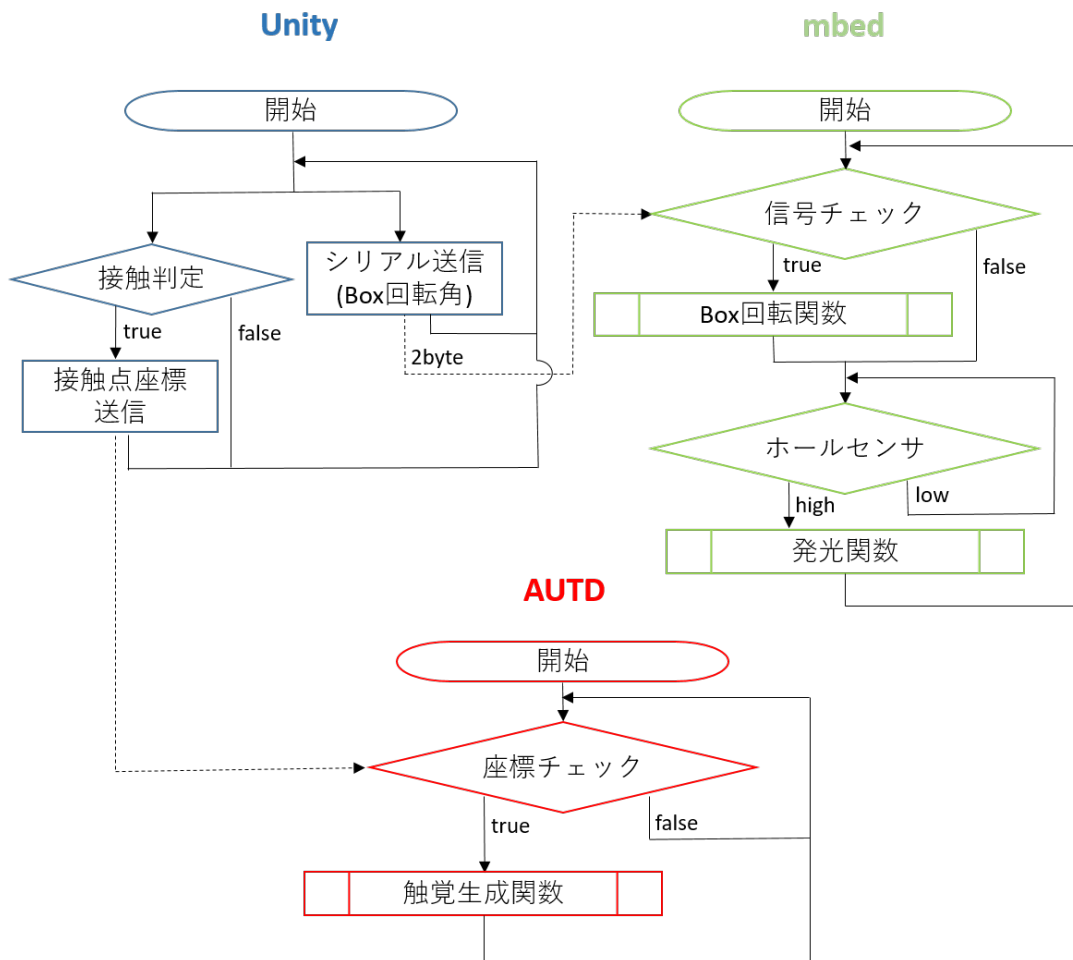


図 3.4. 直方体回転アプリケーションにおけるフローチャート

第 4 章

トレース実験

4.1 目的

本研究の目的の一つである，“触覚フィードバックの付与により，3D イメージへのハンドリングやマニピュレーション精度が向上するか検証する”前段階の初期実験として，“触覚フィードバックの付与により，3D 物体家の接触位置精度が向上するかを検証する”事を目的とした実験を行った．これは 3D イメージへのインタラクションを行う際，光学的結像位置に対する奥行き知覚の精度が重要になる事を念頭に置き，触覚フィードバックを付与する事で奥行き知覚の精度が向上するかを検証するための実験である．

4.2 実験方法

空中に LED 光によるピクセルでできた光の環を描画し，指先で円環をなぞるというタスクを課す(図 4.1)．その際，フィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の 3 条件で実験を行い，各条件において光学的結像位置と指先の軌跡とのずれ具合を定量化する．これをもって，視覚フィードバックに加え触覚フィードバックを付与することにより，立体映像に対する奥行知覚精度が向上するかを評価した．

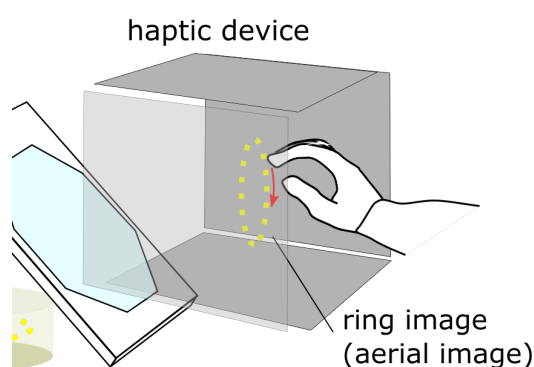


図 4.1. 実験イメージ図

4.2.1 環境設定

本セクションでは、実験環境の設定と指先の接触を判定する方法に触れ、その後発生させたフィードバックについて実際の映像を参照しながら論じる。図 4.2 は実験中における Unity 内の動作画面である。薄い緑色の領域が、実空間における AUTD に囲まれたワークスペースに対応し、黄色い円盤オブジェクトが描画される円形イメージ光学的結像位置に対応している。さらに、赤い球形オブジェクトが指先の座標に対応している。本来 Kinect で取得したデータを Unity 内でモデリングすると、手の形状を点群が模るが、被験者には指先のみを用いたタスクを課しているため、指先のデータのみを用いた。指先の座標とは本実験環境において、Kinect が取得するデータの内最深のものに当たるわけだが、この 1 点のみを用いるとノイズの影響等で指先と取得座標の一致性が大いに損なわれる。そこで、最深 10 点の重心点を指先座標とすることでノイズ等の影響を軽減した。したがって、実空間で円形イメージと指先が接触している状況は、Unity 内で黄色い円盤オブジェクトと赤いオブジェクトが接触しているという状況で再現されている。

なおここで、実空間における円形イメージが円環であるのに対し、Unity 内における円盤オブジェクトが円柱形をしている点について 2 点補足をしておく。1 点目は、あたり判定は円柱の外側だけに設けているため、円形イメージが描画されていない中心領域でのあたり判定は起きないという点である。2 点目は、描画している円形イメージがほぼ線であるのに対し、あたり

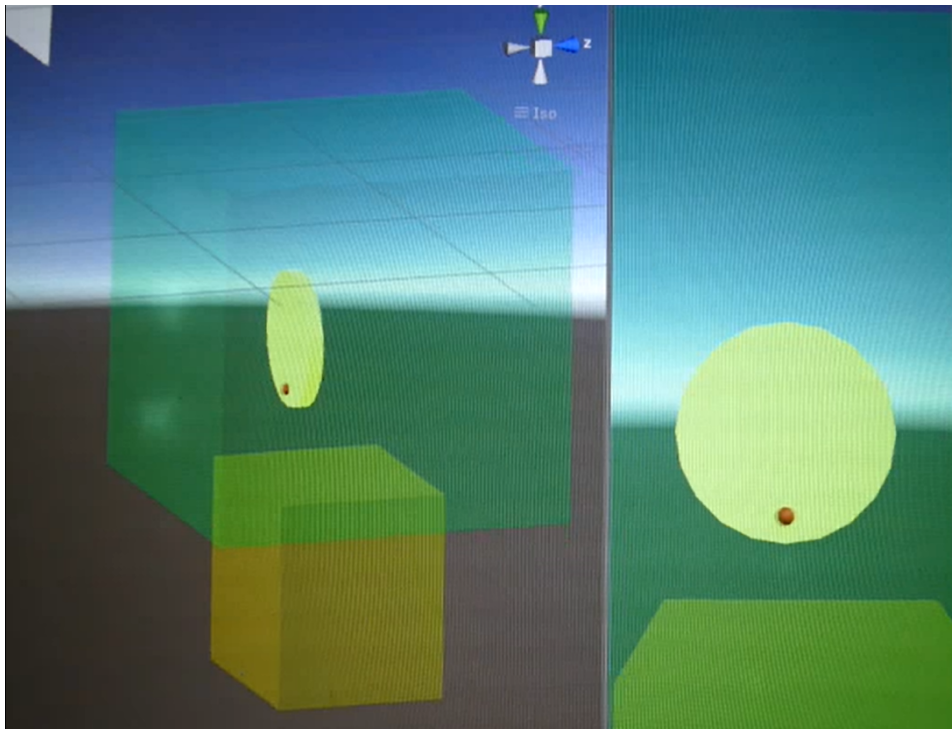


図 4.2. Unity 内の実験中における動作

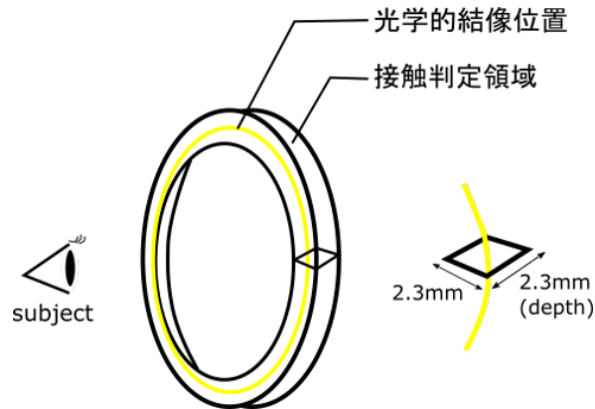


図 4.3. 接触判定領域

判定領域が体積を持つ点である。これは図 4.3 のような接触判定領域を設けたためである。本実験では動径方向 2.3mm 奥行方向 2.3mm の正方形断面の中空円筒領域を接触判定領域に設定した。この領域に指先が侵入した場合にフィードバックを発生させる。

次に、フィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の 3 実験条件について述べる。まずフィードバックなしの条件では、接触判定領域内への侵入を確認できるようなフィードバックが存在しないため、被験者は常に自分が知覚している位置で周回を行ってもらった。よってプログラムのフローは単純であり、”Enter” キーが押されている間指先の座標データを掃き出す働きのみをする。次に、視覚フィードバック付与の条件である

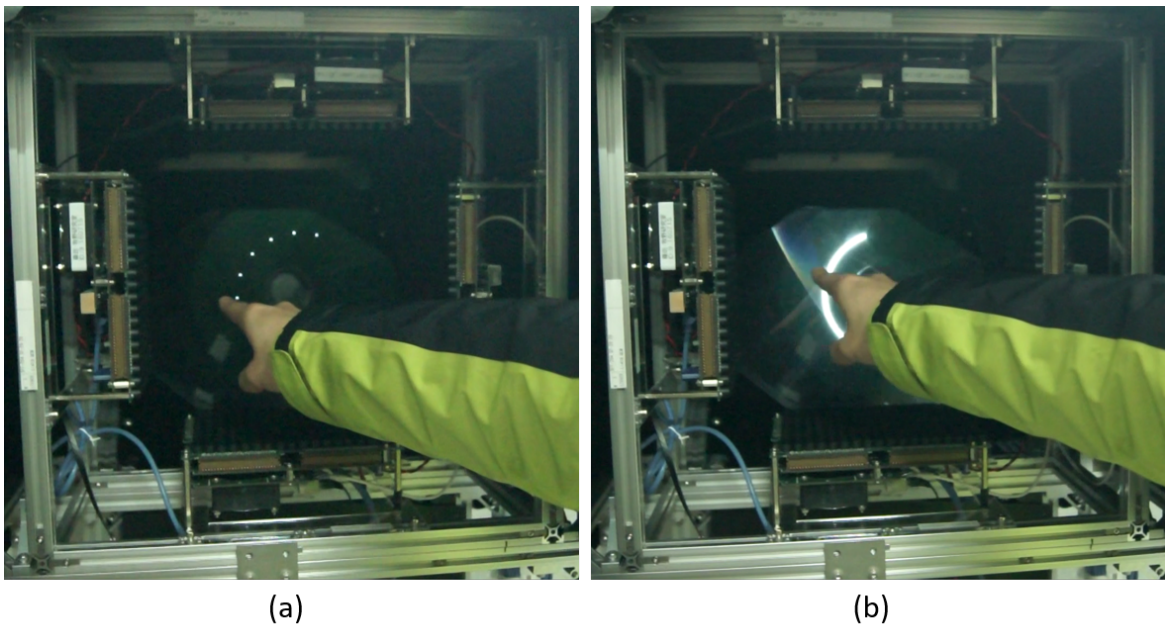


図 4.4. 実験の様子 (a): 定常時 (b): フィードバック発生時

が、実験中の様子として図 4.4 にフィードバックが発生していない状態 (a) と発生している状態 (b) の写真を載せる。このように定常状態では点線で円形イメージが描画され、接触時には円形イメージが線になるというフィードバックを実装した。

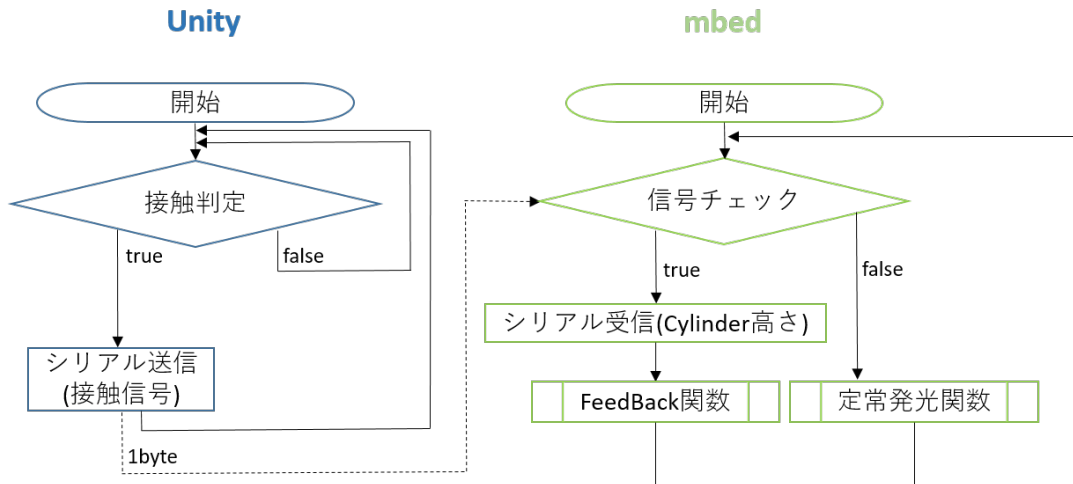


図 4.5. 視覚フィードバック付与の条件におけるフローチャート

図 4.5 は視覚フィードバックを付与する実験条件におけるプログラムのフローチャートである。ゲームエンジン Unity がマスターのような役割を担い、立体光源装置に実装したマイコン mbed がスレーブのように振る舞う。異なる環境で動作するため、それぞれ青・緑と色分けをした。Unity では、指先と接触判定領域との接触判定を常に行っており、接触が起きている間 mbed へシリアル通信を通して接触用信号を送っている。同時に”Enter” キーが押されている間、指先座標の掃き出しを行っているのも Unity である。mbed は LED の点滅パターンを制御しており、常に発光関数によって点線円環を描画している。ただし、シリアル通信によって Unity から接触用信号を受信した場合 FeedBack 関数によって点線円環の描画を行うといった振る舞いをする。

最後に視覚+触覚フィードバック付与の条件について、図 4.6 に実験中のフローチャートを載せる。視覚フィードバックのみの条件に比べ、触覚を発生させる装置 AUTD が含まれる。AUTD も mbed 同様、Unity に対しスレーブの様な振る舞いを別環境ですするため、赤色で色分けをした。触覚生成のためには、接触判定領域と指先との接触点に超音波による収束点を発生させる必要がある。そのため接触時において、視覚フィードバック用の接触信号送信以外に、触覚フィードバック用に AUTD に向け接触点の座標データを送信している。AUTD は接触点の座標データを取得すると、触覚発生関数によって実空間の対応座標へ超音波の焦点を生成する。これによって、被験者は円環イメージへの接触の際、視覚フィードバックと共に触覚フィードバックを得る。

また、解析データには、周回中の毎フレーム (約 60fps) ごとに取得した指先座標を用いる。周回開始と終了のタイミングは被験者に委ねるため、”Enter” キーを押し続けている間、指先データが掃き出されるようなシステムをとった。この解析データの取得方法は全行程において共通

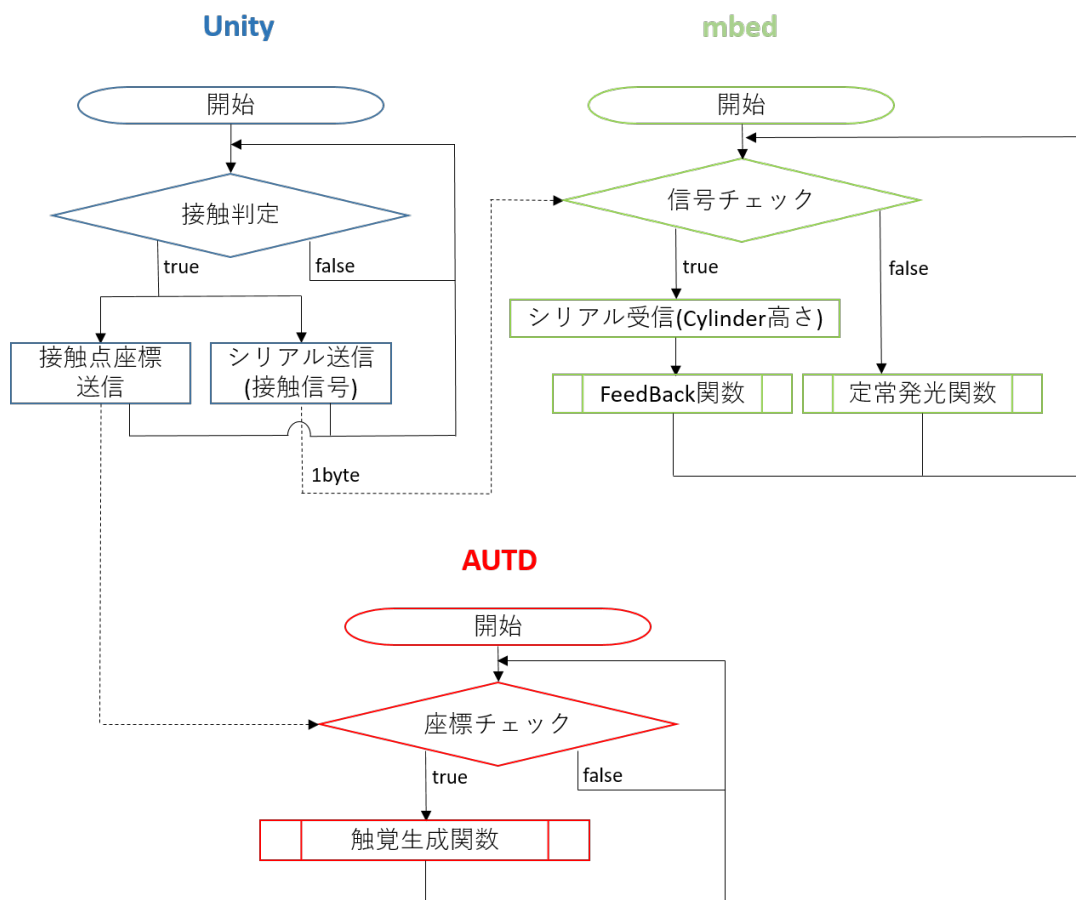


図 4.6. 視覚+触覚フィードバック付与の条件におけるフローチャート

の手続きである。

4.2.2 実験手順

ここでは、実際に被験者に課したタスクを手順を追ってまとめる。手順 1 では被験者に伝えた注意事項を載せた。被験者は右利の 20 代男性 6 名である。

1. 諸注意事項の説明

- 本実験は触覚・視覚をテーマにした実験であるため、ホワイトノイズを聞き、聴覚情報はシャットダウンすること。
- なぞっている最中の指先の軌跡データを取得する。その際、Kinect で最先端部をセンシングしているため、必ず人差し指を前に突き出した姿勢で行うこと。また、触覚フィードバック付与の際、触覚を感じやすくするため、指の向きは映像に垂直に突き立てるのではなく、指の腹で接触するような角度で周回すること。

- 立体映像は視点によって近く位置が変わってしまう。条件を一致させるため、必ず映像に対し正面から見るようにすること。
- 周回には 10 秒程で一周するような速度で行うこと。

2. 実験準備

- 両眼視差による立体知覚が出来ているかを確認する為、いくつかの立体映像を描画し、結像位置と被験者の知覚位置に大きなずれが無いかを確認した。これは、日常的に両眼視差による立体知覚を行っていない人がまれに存在する為である。
- 視覚フィードバックについて、フィードバック発生の際のパターン変化を確認してもらった。
- 触覚フィードバックについて、フィードバック発生の際の触感・感じる力の強さを確認してもらった。

3. タスク 1(フィードバックなし)

- 被験者が知覚した円形映像の最上部に指をおく。
- そこから”Enter” キーを押しながら周回を始め、周回開始位置に戻ったら”Enter” キーを放す。
- ある奥行位置における周回が終わると別の奥行位置(最初も含めて合計 3 パターン)に映像が移る。3 種の奥行位置でそれぞれ上記の手続きを行った。※各試行において共通の奥行位置で周回を行うとタスクに慣れてしまうため、1 周回ごとに奥行位置を変化させた。

4. タスク 2(視覚フィードバック付与)

- 次に視覚フィードバックを付与した状態で手順 3 のタスクを行った。
- 正しい結像位置から指先がずれると、フィードバックが途絶える。この際、周回速度を遅め、正しい結像位置をフィードバックの有無を頼りに探りながら周回を続けさせた。
- ただし、周回中逆周はしないよう中止した。

5. タスク 3(視覚フィードバック + 触覚フィードバック付与)

- 次に視覚フィードバックと触覚フィードバックを付与した状態で手順 3 のタスクを行った。
- 正しい結像位置から指先がずれると、両フィードバックが途絶える。この際、周回速度を遅め、正しい結像位置をフィードバックの有無を頼りに探りながら周回を続けさせた。
- ただし、周回中逆周はしないよう中止した。

6. 繰り返し

- 上記手順 3~5 までを 1 セットとし、計 3 セット行った。

4.3 実験結果

4.3.1 生データ (subjectB の set2)

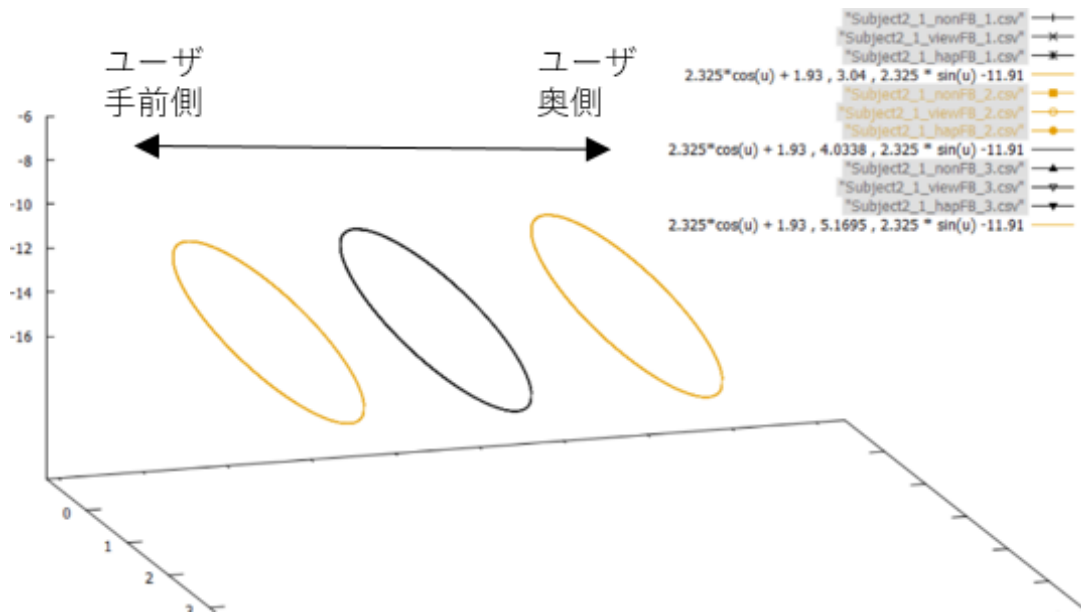


図 4.7. 光学的結像位置に対する指先軌跡の生データの例 (光学的結像位置)

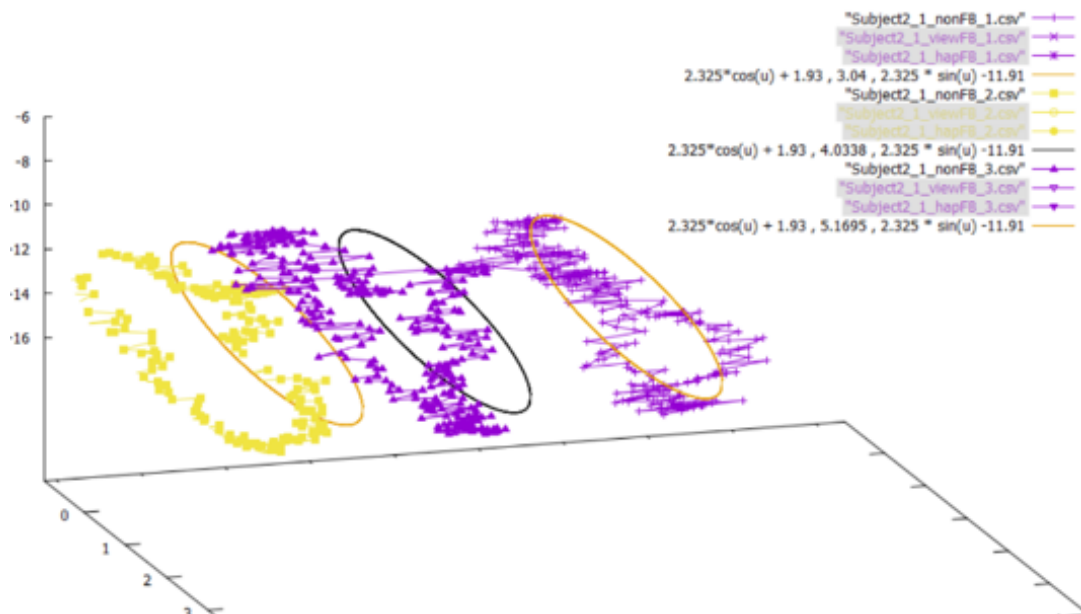


図 4.8. 光学的結像位置に対する指先軌跡の生データの例 (フィードバックなし)

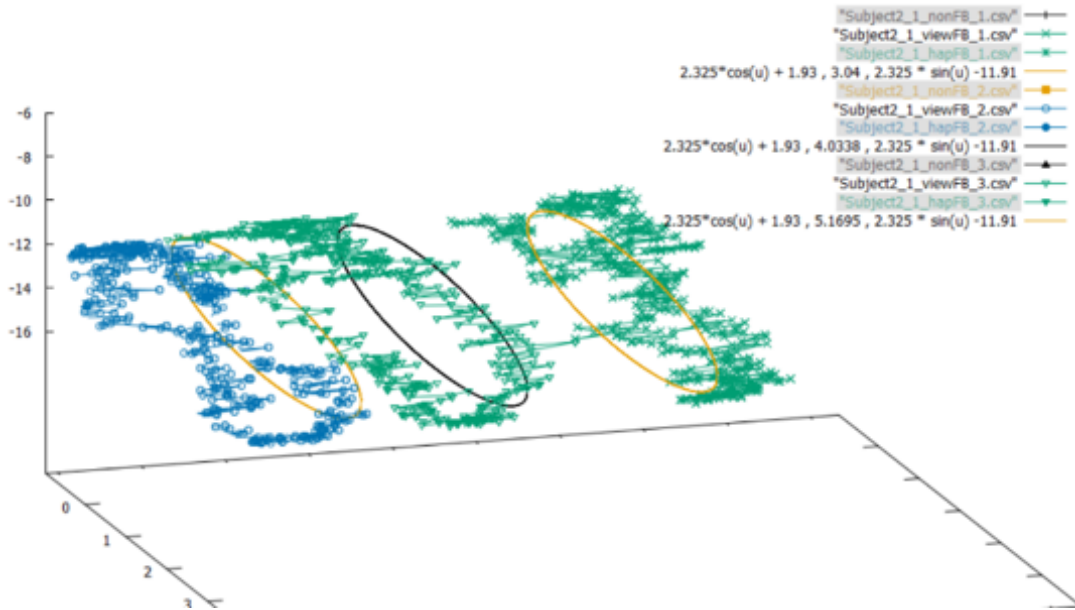


図 4.9. 光学的結像位置に対する指先軌跡の生データの例 (視覚フィードバック付与)

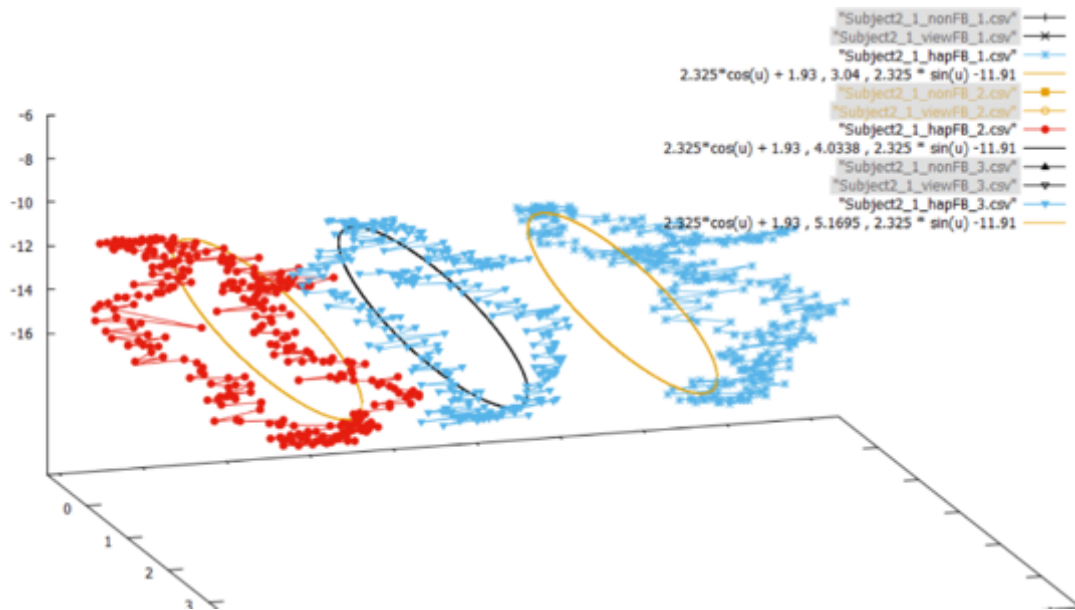


図 4.10. 光学的結像位置に対する指先軌跡の生データの例 (視覚+触覚フィードバック付与)

初めに実験結果として、ある被験者のあるセットにおける円環イメージに対する指先軌跡の生データを、光学的結像位置・フィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の4条件においてそれぞれ図4.7～図4.10に載せた。ただし、グラフにおけるマークと色は意味を持たない。また、3つある円環は、毎試行ごとに变化させる3パターンの奥行位置に対応しており、左側の円環がユーザ手前側であり右側がユーザから見て奥側である。直観的に結果を見る事ができるグラフであるが、このままでは定量的な評価が出来ない

ため、次に実際に解析に用いた評価方法とその根拠を論じる。

4.3.2 解析方法

ここでは取得した指先の軌跡データを解析する。本実験では、接触判定領域というフィードバックが発生する領域を、光学的結像位置の周囲に設けている。よって評価する値として、指先座標と接触判定領域との離れ具合、つまり接触判定領域から各指先座標への最短距離を採用した(図4.11の青線)。被験者の指先が光学的結像位置からずれているほど評価値が大きくなり、奥行知覚精度が低下したと言え、被験者の指先が光学的結像位置と近いほど評価値は小さくなり、奥行知覚精度が向上したと言えるわけである。ただし、図4.11青枠のように、接触判定領域内にある指先位置は評価値0とする。これは、たとえ指先が光学的結像位置とずれていたとしても、接触判定領域内に収まっていれば接触の合図であるフィードバックが発生するため、接触判定領域内のデータは”接触”と判断すべきであるという根拠に基づいている。

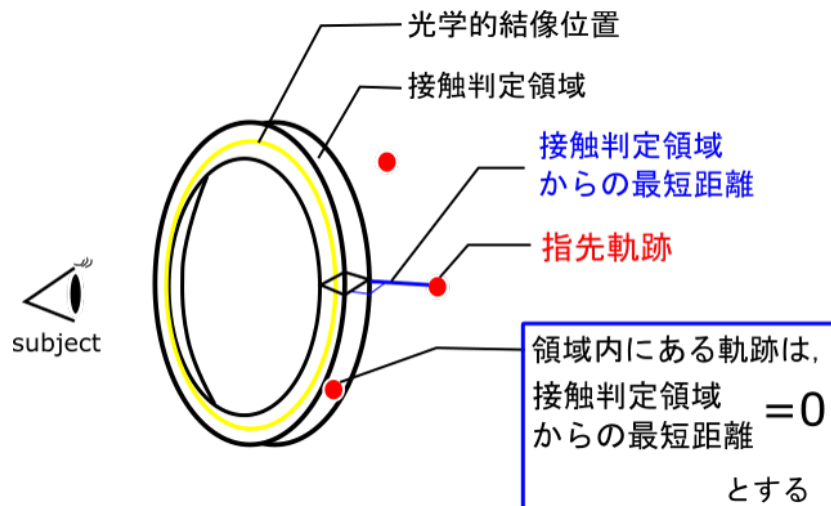


図4.11. 評価値の定義

4.3.3 解析結果 1 (subjectB)

4.3.1 の生データで例に挙げたある subjectB をここでも例にとり、被験者個別で見た実験結果を論じる。4.3.2 解析方法で述べたように、実験結果を評価する値は被験者の指先と接触判定領域との最短距離(以降これを評価値との記述もする)である。4.2.2 実験手順でまとめた通り、被験者一人につき周回タスクは計27回行われる。まずこれに対し、各試行において評価値の平均値を算出した。例に被験者Bの第2セット目の結果が図4.12である。横軸は実験条件を表しており、左からフィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与である。斜めの軸は奥行位置を表している。青色の奥行1がユーザ手前側であり、灰色の奥行2がユーザから奥側にあたる。最後に縦方向の軸は評価値を表しており、実空間ス

ケールに直したものである。このグラフからは、奥行1と奥行2ではフィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の順に評価値が低下していることがわかるが、奥行3に関しては触覚を付与した場合が最も評価値が大きくなっている。

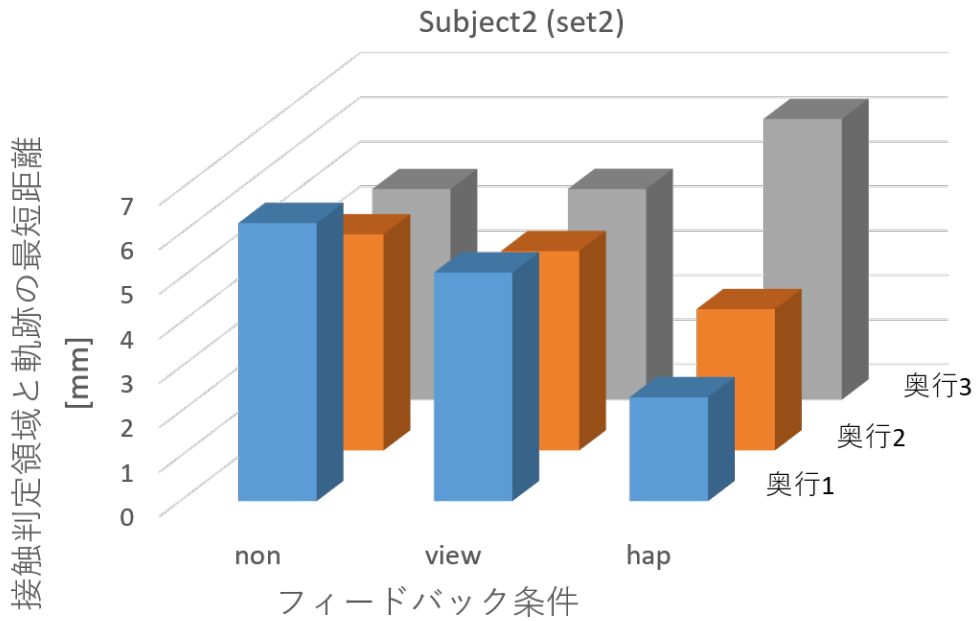


図 4.12. subject2 のセット 2 における実験結果

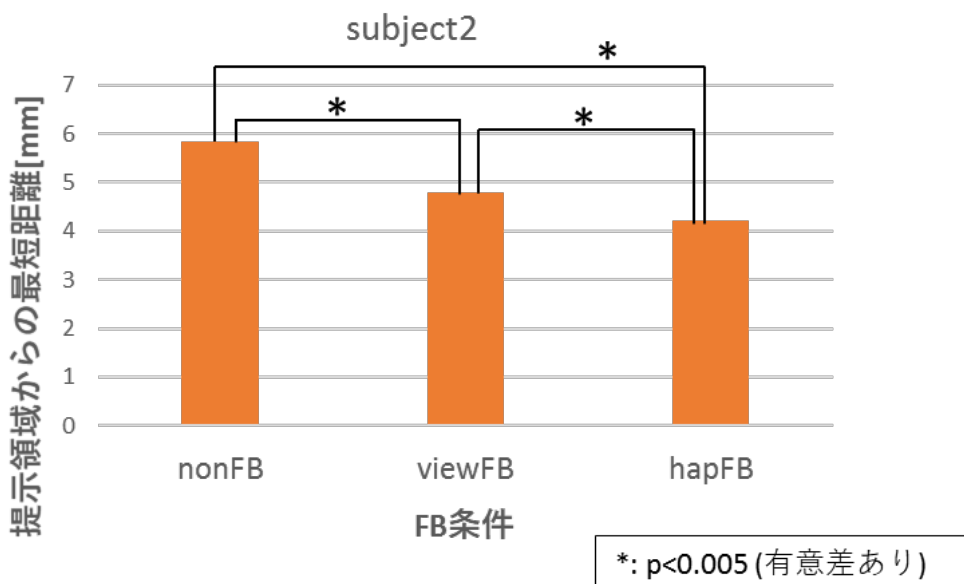


図 4.13. subject2 における全セットの平均実験結果

生データの例を挙げたため、特別被験者 B について第 2 セットの結果を取り上げたが、そもそも奥行位置の変化は被験者に慣れを生じさせないためのものであり、セット数は試行回数を確保するためのものである。よって、解析データとしては各 27 試行における評価値の平均値を、奥行位置とセット数で平均をとり、被験者一人に対しフィードバックの条件別でのみ評価を行う。被験者 B に対しこの処理を行った結果が図 4.13 である。検定を行った所 5% の水準での優位差をもって、フィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の順に評価値が低下した。これは、被験者 B においては触覚を付与した場合が最も円環イメージと指先位置のずれが少なかったという結果を示す。

4.3.4 解析結果 2 (全被験者)

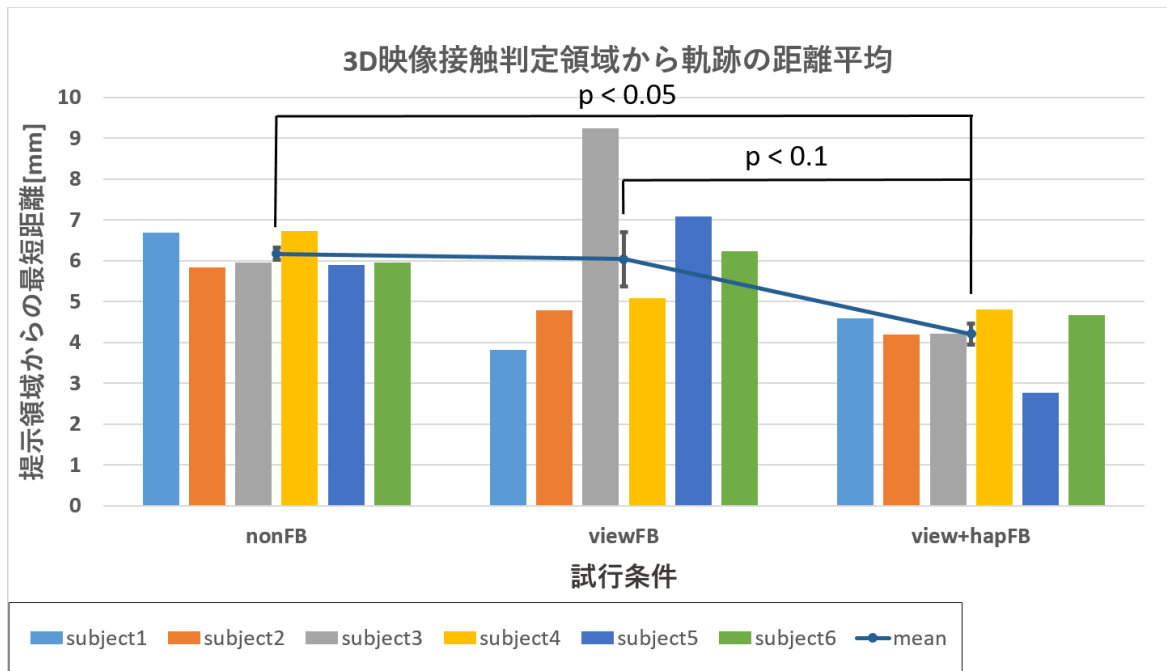


図 4.14. 全被験者における実験結果

最終的な実験結果として、図 4.13 で行った解析を全被験者 6 名で行った結果を図 4.14 にまとめた。横軸は実験条件であり、左からフィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与である。各グラフは被験者ごとに色分けをしており、縦軸は実空間スケールに直した評価値を表している。折れ線グラフはさらに 6 人の被験者同士で平均をとったものである。6 人の平均において評価値はフィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の順に低下したことがわかる。これから、被験者の平均において、触覚を付与した場合が最も円環イメージと指先位置のずれが少なかったと言える。

4.3.5 被験者感想

実験後、各被験者に感想を聞いた。そのうちいくつかの感想をまとめ、考察する手がかりの一つとして用いる。

1. 触覚が弱く感じた。
2. 触覚を感じるが、視覚フィードバックが遅れて発生することがあった。
3. 触覚があると何となくなぞりやすく感じた。
4. フィードバックが消えた時、正しい位置を探すために前後大きく動く事があった。

4.4 考察

行った実験についての考察を行う。注目したい実験結果は2点ある。1点目は、視覚フィードバック付与の条件について、フィードバックなしの条件に比べ被験者半数人しかずれが減少しなかったという事である。2点目は被験者同士で平均した結果、優位水準5%の有意差を持って、フィードバックなしの条件と視覚フィードバック付与の条件に対し、視覚+触覚フィードバック付与の条件が円環と指先軌跡とのずれが小さくなったことについてである。以下、それぞれの考察点について個別に論じていく。

4.4.1 視覚フィードバックについて

まずフィードバック別に見た実験結果について、フィードバックなしの条件に対する視覚+触覚フィードバック付与の条件下においては、被験者6名中6名全員がずれが減少している結果となった。これに対し、フィードバックなしの条件に対する視覚フィードバック付与の条件下においては、被験者6名中3名がずれが減少した。視覚フィードバック付与の条件に対する触覚フィードバック付与の条件においては、被験者6名中4名がずれが減少した。フィードバックなしの条件下に対して、フィードバックを付与した2条件がどちらもずれが減少するであろうことが予想されたが、特に視覚フィードバック付与の条件がフィードバックなしの条件に対して半数人しかずれが減少しないという結果になった点に注目する。接触時に視覚的フィードバックを発生させているにも関わらず、このような結果になった原因として、被験者感想にあった「フィードバックが消えた時、正しい位置を探すために前後大きく動く事があった。」が関連しているとする、視覚フィードバックの発生位置を探索するために指先が前後に大きく動き、その動きが円環イメージとのずれにつながったのではないかと考えられる。この推測を裏付けるために、視覚フィードバック付与の条件において著しくずれが増加しているsubject3について考察を行う。フィードバック探索のために指先が大きく動いたとすると、フィードバックを付与した条件の方が、軌跡のばらつきが大きくなるはずである。図4.15(a)~(c)に、subject3における指先軌跡座標の平均値を全試行においてまとめたグラフを載せ、軌跡の平均値からのばらつき具合を確認する。

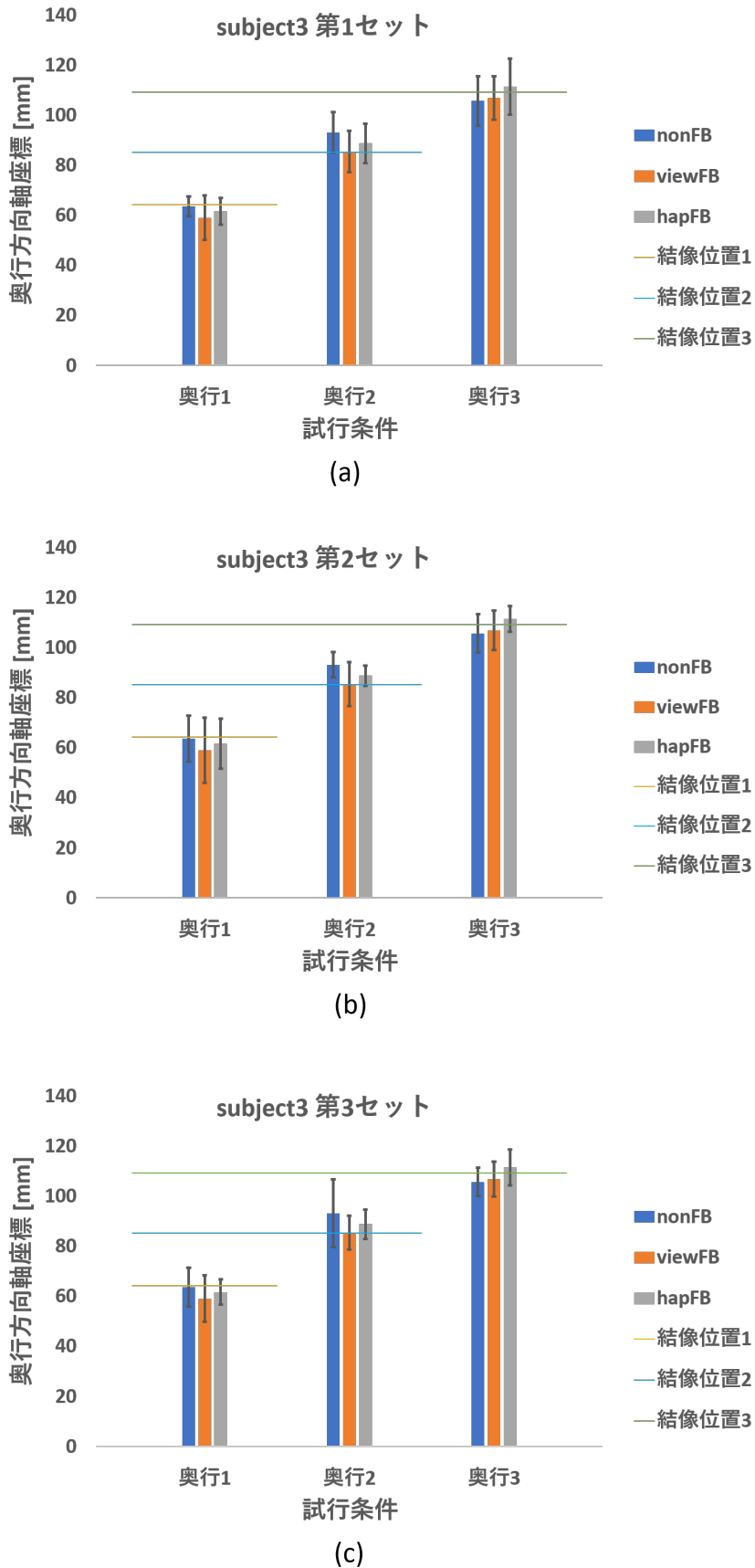


図 4.15. (a): subject3 の第 1 セットにおける軌跡の平均奥行位置 (b): subject3 の第 2 セットにおける軌跡の平均奥行位置 (c): subject3 の第 3 セットにおける軌跡の平均奥行位置

横軸は、各セット中に行った円環イメージの奥行位置変換に対応したものであり、青・オレンジ・灰色の順で、フィードバックなし・視覚フィードバック・視覚+触覚フィードバックの条件に対応している。縦軸は、被験者からの目線方向(奥行方向)軸における指先座標であり、正の方向が被験者から見て奥側である。ただしこのグラフにおける原点は意味を持たず、縦軸は円環イメージの結像位置と、指先の平均位置を比較する目盛りとして機能するものとする。水平方向に引いた3本の直線はそれぞれ下から、最も手前の奥行位置・中間の奥行位置・最も奥の奥行位置における円環イメージの結像位置を表している。3つのグラフを確認すると、視覚フィードバック付与の条件が比較的標準偏差によるエラーバーが大きいことがわかる。これはすなわち、視覚フィードバックを付与した場合が比較的、指先奥行位置に大きなばらつきが生じたという推測に繋がる。このばらつきの大きさが、フィードバックを付与してもずれが減少しなかった原因の一つであると考えられる。なお触覚フィードバックも同時に付与させた条件では、視覚フィードバックのみの条件とは異なり、全ての被験者がフィードバックなしの条件よりずれが減少したという結果である。これについては、フィードバックを探すための指先の大きな前後移動による寄与に比べ、次項4.2.2で述べる触覚フィードバックの特性による寄与が大きかったためであると考えられる。接触判定領域からのずれの平均値で評価した場合、フィードバックなしの条件に比べ半数名しかずれが減少しなかった視覚フィードバック付与の条件であるが、接触判定領域内に侵入した割合で評価すると別の結果が得られる。図4.16は接触判定領域内の指先位置の割合をグラフにまとめたものである。横軸・色分けは例によるもので、縦軸が全軌跡のうち接触判定領域内に存在する軌跡の割合を表している。このグラフから、すべての被験者において、フィードバックなしの条件に比べフィードバックを付与した2条件の割合が大きいことがわかる。すなわちフィードバックを付与すると、接触判定領域内に指先が高い確率で存在し得るという事が言える。

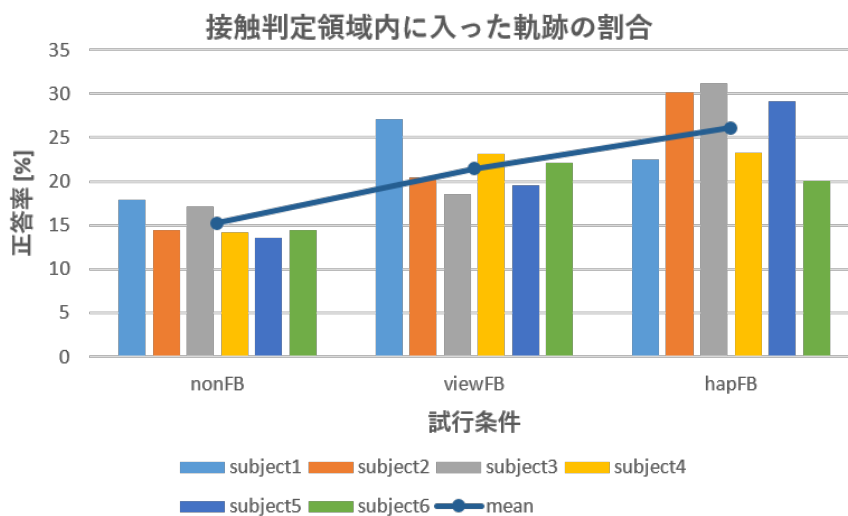


図 4.16. 接触判定領域内に侵入した指先位置の割合

4.4.2 触覚フィードバックについて

最終的な実験結果である図 4.14 から、被験者 6 名を平均として、フィードバックなし・視覚フィードバック付与・視覚+触覚フィードバック付与の順に円環イメージと指先位置のずれが減少していく結果を得た。つまり、触覚を付与させた場合が最も奥行知覚精度が向上したと考えられる。このような結果が得られた理由として以下 2 点の要因が考えられる。

1. 接触に対する反力及び振動刺激を感じる事で、指先の位置感覚への注目が高まった可能性。
2. 触覚フィードバック発生フレームレートが視覚フィードバック発生フレームレートより高くなったことによる可能性。

まず考えられる要因の 1 点目について、ここで表記した位置感覚について触れる。そもそも人間の持つ感覚は、分類の一例として、視覚・聴覚・味覚・嗅覚・平衡感覚等の、特化した感覚器官を持つ感覚と、分化した感覚器官を持たない感覚(体性感覚という)に分類される [15]。この体性感覚はさらに、皮膚で感じる皮膚感覚と、骨格筋、腱、関節で感じる深部感覚(自己受容感覚)とに分類され、自分の身体がどこにありどの向きでどう動いているかを空間認知する位置感覚は、この深部感覚に属するものである。ただし、刺激に対し特化した感覚器官をもつ感覚に比べ、体性感覚は複数種類の受容器で得た情報を脳内で統合することで知覚する。特に指先は、皮膚感覚と自己受容感覚の両方が関与する重要な身体部位であり、本研究でも用いたように多くの心理物理実験で用いられる部位である。指先における皮膚感覚は、受容器の変形により生成された神経信号が脊髄、視床等を経て、脳内の初期体性感覚野に入力される。そのため、皮膚感覚の神経信号を脳内に受信したばかりの段階では、「どのチャンネル」に関連する刺激が、「どの部位」に刺激が加えられたかという情報のみが保存され、姿勢に関する情報は含まれていない。一方、指先の筋や腱の受容器によって生成される姿勢に関する神経信号は 3a 野, 1 野, 2 野に入力されており、1 野や 2 野で初めて、皮膚感覚と自己受容感覚の統合が可能となる。その後、信号は SI から後頭葉の 5 野を経て、7 野に届く。5 野では手首や肘など複数の関節の姿勢情報が入力され、三次元的な空間処理が行われるとされている。このように、指先の皮膚感覚の情報は、その処理が進むにつれ、指の姿勢情報、さらには手首や肘の姿勢情報と段階的に統合されることで、指先が「どの空間位置」にあるかを認識する手がかりの一つになり得る [15]。話を本実験に置き換えると、触覚フィードバックを発生させ指先における皮膚感覚を誘起させた事で、自己受容感覚との統合が起こり、指先への位置感覚が高まったという事が考えられる。指先への位置感覚が高まることによって、知覚した円環イメージに触れる際の三次元的な空間認知力が向上し、より正しい位置を保ちながら円環をなぞる事が出来たのではないかという考察にたどり着く。被験者感想 3 の、「触覚があると何となくなぞりやすく感じた。」はこれに起因したとも考えられる。

次に考えられる要因として、視覚・触覚両フィードバック発生フレームレートが異なることが原因である可能性を考察する。ここでいうフレームレートとは、それぞれ図 4.6 における 1

ループの処理にかかる時間の逆数を指す。Unity(マスター)はすなわち、接触判定+接触信号の送信にかかる時間の逆数に当たり、実験時は約 60fps であった。次に、AUTD(触覚フィードバック制御)は、座標データを受け取り、触覚を生成したのち次の座標データの受信を待機する状態(非接触データが来るまでは前フレームにおける座標データに触覚を発生している)までの時間を表し、2000fps での更新が可能である。最後に mbed(視覚フィードバック制御)であるが、接触信号を受信し、FeedBack 関数でフィードバック用の発光処理をする。ただし、この際フィードバック用に 0.05 秒間発光し続け、この間ほかの処理は行われなため、信号を受信した後、次の信号を受信できる状態まで 0.05 秒間かかることになる。よって mbed のフレームレートは 20fps となる。補足すると、mbed への通信にはシリアル通信、AUTD へは csv ファイルを通したデータの受け渡しを行っているが、本実験環境でのデータ量においては、それぞれ Unity のフレームレート 60fps に比べると十分早い信号送受信速度を持つため、ここでは考慮しないことにする。さて、今ここで問題にしているのは、触覚フィードバックを発生させる装置 AUTD と視覚フィードバックを発生させる装置を制御している mbed が異なるフレームレートで動いているという点である。改めてそれぞれのフレームレートをまとめると、Unity が 60fps、AUTD が 2000fps、mbed が 20fps である。接触判定と、接触時に信号の送信をする Unity が 60fps であるのに対し、十分な更新速度を持つ AUTD は 60fps で送られてくる信号を毎フレーム全てを受信することが可能である。これに対し、mbed は Unity の 1/3 のフレームレートしか持たない。よって、Unity が 60fps で送信する接触データを毎フレーム全てを受信することが出来ない。すなわち、視覚フィードバックは接触判定の結果を正確に反映できておらず、視覚フィードバック付与の条件に比べ、触覚フィードバックを追加した条件の方がより正確に接触判定の結果を反映していたと考えられる。被験者感想の 2 はこのフレームレートの違いによって発生したタイムラグである可能性が高い。最後に実験結果に対して照らし合わせた論じ方をすると、触覚フィードバックを付与した場合が最も円環イメージと指先とのずれが小さくなった原因として、触覚フィードバックが接触判定の結果をより正確に反映していたという事が考察される。

第 5 章

結論

本論文では、超音波収束装置を用いる事で、非接触触覚フィードバックを有するインタラクションが可能なボクセル型立体映像システムの提案を行った。その後、提案システムを用い、立体映像に対する奥行き知覚における触覚フィードバックの有用性を検証した。提案システムと検証実験についてそれぞれ別々に結論をまとめる。

5.1 提案システム

触覚フィードバックを有する映像システムや立体映像システムに関しては古くから数多くの提案がなされているが、それらを組み合わせたシステムはようやく勢いをつけ始めた所である。その中で本研究は、プログラマブルに変化する裸眼立体映像に対し、非接触触覚フィードバックを有するインタラクションが行える新たなシステムの提案を行った。映像系において特殊な眼鏡・HMDの装着を要するものや、触覚系において振動子・電気刺激等を用いるものに比べ、より実空間における自然な環境を構築する事が可能である。3DCADを実空間でより直観的に操作をするという展望からシステムの構想を行ったが、今回実装した円柱型オブジェクトの変形アプリケーションや、直方体型オブジェクトの回転アプリケーションを通して構想実現の可能性がうかがえた。本論文では、時間的コスト面の関係で立体映像に体積走査型を採用したが、作成した立体光源装置では解像度に限界があり、代表的な図形のワイヤーフレームを描画するに留まった。より高解像度な映像とのインタラクションを可能にするには、プロジェクタと組み合わせた体積走査型を用いるか、インテグラル方式を採用する等の検討が必要である。触覚フィードバックを省いた状態と付与した状態で、アプリケーションにおける操作性を比較した場合、主観的ではあるが触覚フィードバックを付与した場合の方が実在感を持ってハンドリングする事が出来たため、操作性が向上したような印象を受けた。ただし、接触点に超音波の収束点を生成している性質上、面での接触は感じづらく、またオブジェクトのテクスチャを変えるような触り心地の再現は現状難しい。本装置で用いた超音波振動子は40kHzで駆動するものであり、焦点の大きさが約直径8mm程度になる。より高周波の超音波振動子を用いることで焦点の大きさが小さくなり、より空間分解能の高い触覚を生成する事が可能となる。これによって触り心地の変化を再現することが期待されるが、高周波の超音波を用いると

音圧の減衰量が大きくなり、十分なワークスペースを確保することが難しくなるというトレードオフが存在する。

5.2 検証実験

本研究では、研究目的の一つである「立体映像に対するユーザの操作性が、触覚フィードバックを付与する事で向上するか」の検証を行う前段階として、「触覚フィードバックの付与により、3D 物体家の接触位置精度が向上するか」を検証するための実験を行った。今回は、作成した装置を用い円環イメージを描画し、フィードバックを発生させない条件と、視覚的フィードバックを発生させる条件、視覚+触覚的フィードバックを発生させる条件においてそれぞれ円環イメージをなぞるという実験を設定した。フィードバック発生の有無を判断するために、円環イメージ結像位置の周りに接触判定領域を設け、その領域内に指先が侵入している際にそこが正しい位置であるというフィードバックを発生させるようなシステムを実装した。奥行知覚の精度を定量的に評価する為、接触判定領域からの最短距離を指先と円環イメージとのずれとし、その平均値を比較対象とした。すなわち、接触判定領域からの最短距離の平均値が小さいほどずれが小さく、これを奥行知覚が向上したと解釈したわけである。実験の結果、フィードバックなし、視覚フィードバック、視覚+触覚フィードバックの順にずれの平均が低くなり、そのうち視覚+触覚フィードバックが他の2条件に比べ優位水準5%の有意差を持ってずれが低くなった。考えられる原因として接触に対する反力及び振動刺激を感じる事で、指先の位置感覚への注目が高まった可能性と、触覚フィードバック発生フレームレートが視覚フィードバック発生フレームレートより高くなったことによる可能性を挙げ、それぞれ詳しく考察を行った。また、視覚フィードバックの条件がフィードバックを付与しているのにも関わらず、フィードバックなしの条件に比べ半数人しかずれが減少しなかった結果に注目し、その原因を推測した。これら考察より、最終的に本実験から以下の2点を結論として提示する。

1. 立体映像への接触に際し、付与するフィードバックが視覚的なもののみであると、奥行知覚の精度自体は向上しづらく、指を動かしつつ正確な光学的結像位置を保つための機能があるとは言い切れない。ただしフィードバックを発生させない状態に比べ、結像位置への接触が視覚的にわかるため、比較的高い確率で正しい接触位置に指を保持することが出来ると考えられる
2. 立体映像への接触に際し、視覚的フィードバックに触覚フィードバックを付与することで、フィードバックを発生させない状態と視覚的フィードバックのみを発生させる状態に比べ、指を動かしつつ正確な光学的結像位置を保つちやすくなると考えられる。

ただし、今回行った実験には課題も残る。上に挙げた結論の2点目が本実験における目的そのものであったが、触覚フィードバックの優位性を考察した際に論じた1目つの要因、“フレームレートの問題”は根源的なものではなく、実験設定の段階で生じてしまった要因である。この問題があったために、人間の身体的性質と関係なく触覚フィードバックがより正確な情報を与えるような実験環境となった。この問題の寄与がどの程度被験者に影響を与えたかは定かで

はないが，触覚自体が奥行知覚の精度を本質的に向上させるかについてより正確に検証するためには，フレームレートの問題による寄与を排除しなくてはならない。また，フィードバックの優位性を考察した際の要因の2点目として，指先への皮膚刺激が位置感覚を高めた可能性がある事を論じたが，本実験で提示した超音波による振動触覚と人間の知覚特性の関係を明らかにし，この仮説を明確に証明することも今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの方のお力添えを頂きました。まず篠田先生には、入学以前に当研究室に興味を抱かせていただいた所から始まり、現在まで私のモチベーションが下がることのないような研究環境を提供して下さったことに感謝いたします。自分から働きかけたアイデアやプロジェクトには積極的になって協力して下さる先生でした。学会参加のチャンスも多くいただき、とはいえ研究を急かすようなことはなく、のびのびと自分の研究に取り組むことができました。牧野先生は研究に関するまじめな話から、結婚に関する雑談など公私ともに様々なお話をさせていただきました。ふと閃いたようなアイデアも真剣に聞いていただき、あれだこれだとプレストをするのが楽しい時間でした。野田先生には経験のなかった私に電子回路の設計・加工等を根強く教えていただきました。本研究における装置が完成したのは野田先生の協力あってこそです。それだけでなく、研究室という場が私用の場ではなく公の場である事を再認識し、共有するという事がどういう事なのか、何が正しく何が間違っているのか、人間としての在り方も学ばせていただいたように感じます。長谷川先生にはプログラミングとは何かという基本的な部分を再認識させていただくことが多かったです。特に *Asia Haptics* では直前までデバック作業にお付き合いいただき、無事デモを終えることが出来ました。昼時になるとよく声をかけていただいたことも記憶に残っております。博士2年の井上さんには研究においてテクニカルなアドバイスを多くいただきました。*Ars electronica* での日々は忘れません。卒業された古山さんには、研究の開始当時から一番の相談相手になっていただきました。相談しやすい人柄と、わかりやすい説明が印象的です。博士1年の増田さん神垣さんには毎日のように雑談や息抜きにお付き合いいただきました。研究室に寝泊まりする日々も、お二人がいると心強かったです。篠田・牧野研究室同期の皆様には、日ごろふとした相談や雑談に付き合ってくださいました。ただの同期ではなく、仲間であり友達であったと思います。篠田・牧野研究室修士1年のメンバーには明るい人が多く、研究室が活気立ったように感じます。最後に、本論文は小学校から学業が始まり、今現在に至る19年間の学生生活における集大成です。当研究室スタッフ・メンバーだけでなく、今まで私に関わりを持ってくれた全ての人に感謝を申し上げたいと思います。そして両親には、現在まで一度残らず全て私の意思を尊重して見守って下さった事に、書き留められない感謝を送ります。

参考文献

- [1] LLC. Oculus VR. Oculus rift. <https://www.oculus.com>.
- [2] Kimura, H., Uchiyama, T., Yoshikawa, H., Laser produced 3D display in the air, Proceedings of Emerging technologies SIGGRAPH 2006. Boston, Massachusetts: ACM SIGGRAPH, July 2006. pp.147-151, Manchester, U.K., Aug. 1988.
- [3] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, and Jun Rekimoto. 2014. Pixie dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field. ACM Transactions on Graphics 33, 4 (July 2014), Article 85, 13 pages.
- [4] OCHIAI, Y., KUMAGAI, K., HOSHI, T., REKIMOTO, J., HASEGAWA, S., AND HAYASAKI, Y. 2016. Fairy lights in femtoseconds: Aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields. ACM Trans. Graph. 35, 2 (Feb.), 17:1?17:14.
- [5] Full Turn ECAL / Benjamin Muzzin. Project by ECAL.
- [6] Takumi Yoshida, Keitaro Shimizu, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Hideki Nii, Susumu Tachi: RePro3D: fullparallax 3d display with haptic feedback using retro-reflective projection technology, Proc.IEEE International Symposium on VR innovation 2011, pp.49-50, 19-20 March, Singapore
- [7] ASKANET: Aerial Imaging, <http://aerialimaging.tv> (2011)
- [8] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue and Hiroyuki Shinoda: HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, Proc. CHI 2016, to be published in May, 2016.
- [9] R.Sodhi, I.Poupyrev, M.Glisson and A.Israr, "AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air." , In Proceeding of SIGGRAPH 2013, Anaheim, USA, July 2013.
- [10] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Trans. on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010.
- [11] Henri Palleis, Mirjam Mickisch, Henrich Hussmann: A Concept for 3D Interaction on a Curved Touch Display, Proc CHI EA 2015, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Pages 1163-1168, 2015.
- [12] Leap Motion: Leap Motion. <http://www.leapmotion.com/>

- [13] microsoft: Kinect v2. <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect/>.
- [14] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 2015. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram. *IEEE World Haptics Conference*, 362–367.
- [15] 下条 誠, 前野 隆司, 篠田 裕之, 佐野 明人. 触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ-. S & T 出版. 2014.