

Title	Magnetouch : 身体への永久磁石貼り付けによる空中触覚ディスプレイ
Sub Title	Magnetouch : mid-air tactile display by attaching permanent magnets to the body
Author	鵜重, 誠(Ujū, Makoto) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2019
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2019年度メディアデザイン学 第748号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002019-0748

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2019年度

Magnetouch: 身体への永久磁石貼り付けによる
空中触覚ディスプレイ



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

鵜重 誠

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

鵜重 誠

研究指導委員会：

南澤 孝太 教授	(主指導教員)
砂原 秀樹 教授	(副指導教員)
ロシャン ペイリス 訪問講師	(副指導教員)

論文審査委員会：

南澤 孝太 教授	(主査)
砂原 秀樹 教授	(副査)
ロシャン ペイリス 訪問講師	(副査)

修士論文 2019年度

Magnetouch: 身体への永久磁石貼り付けによる空中触覚 ディスプレイ

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

近年、触覚ディスプレイが日常生活に浸透し、触覚の提示対象が特定の個人から特定の場所にいる多人数へと変化している。将来、触覚ディスプレイは空中立体像と組み合わせて空中UIなどの不特定多数への提示へ変化し、そのような触覚ディスプレイのデザイン要件を不特定多数のユーザーがすぐに使用できること、装着の手間やコストが低いこと、触感クオリティが高いことと定義し、非接触触覚ディスプレイが適当であると判断した。しかし、既存の非接触触覚ディスプレイは空気を媒体とするため触感クオリティが低い。そこで本研究では磁力を媒体とし、永久磁石によってエネルギーを触覚に変換する触覚ディスプレイである Magnetouch を提案した。特性計測実験により、振動は1Hzから800Hzにかけて出力が可能であることと力覚として13cNの力を提示できることを確認し、十分な触感クオリティを提示できた。また、デモンストレーションを通じてコンセプトの実現性や有効性を示した。

キーワード：

触覚, 磁力, 永久磁石

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

鵜重 誠

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2019

Magnetouch: Mid-air Tactile Display by Attaching Permanent Magnets to the Body

Category: Science / Engineering

Summary

In recent years, tactile displays have permeated everyday life, and the target of tactile presentation has changed from a specific individual to a large number of people at a specific location. In the future, tactile displays will change to presentation to an unspecified number of aerial UIs in combination with aerial stereoscopic images. Low labor and cost and high tactile quality were defined, and a non-contact tactile display was determined to be appropriate. However, existing non-contact tactile displays have low tactile quality because they use air as a medium. In this study, we proposed Magnetouch, a tactile display that uses magnetic force as a medium and converts energy into tactile sense using a permanent magnet. By the characteristic measurement experiment, it was confirmed that the vibration could be output from 1Hz to 800Hz and that 13cN force could be presented as a force sense, and sufficient tactile quality could be presented. Through demonstrations, the feasibility and effectiveness of the concept were demonstrated.

Keywords:

Haptics, Magnetic, Permanent Magnet

Keio University Graduate School of Media Design

Makoto Uju

目 次

第 1 章	序論	1
1.1.	日常生活に浸透する触覚ディスプレイ	1
1.2.	触覚ディスプレイを用いたコンテンツの進化	2
1.3.	未来の触覚ディスプレイと本研究の目的	4
1.4.	本論文の構成	4
第 2 章	関連研究	6
2.1.	人間の触知覚	6
2.2.	触原色原理	6
2.3.	触覚ディスプレイ	8
2.3.1	接地型触覚ディスプレイ	10
2.3.2	非接地型触覚ディスプレイ	10
2.3.3	非接触型触覚ディスプレイ	11
2.4.	日常利用を想定して触覚ディスプレイを利用している事例	14
第 3 章	提案手法	15
3.1.	デザイン要件の整理	15
3.2.	Magnetouch の提案	18
3.3.	Magnetouch の設計と実装	21
3.3.1	電磁石の設計と実装	21
3.3.2	永久磁石の貼り付け方法の検討	22
3.3.3	触覚提示コントローラのハードウェア	23
3.3.4	触覚提示コントローラのソフトウェア	25

3.4. 特性計測	30
3.4.1 振動特性計測	30
3.4.2 力覚特性計測	31
3.5. 本章のまとめ	35
第4章 コンセプト実証	36
4.1. 空中立体画像とのインタラクション	36
4.1.1 空中立体画像の提示方法の選択と什器の設計	36
4.1.2 ボルマトリックスへの Magnetouch の組み込み	36
4.1.3 KMD Forum 2019 でのデモンストレーション	38
4.2. 物体を経由したインタラクション	41
4.2.1 コンテンツの選定と作成	41
4.2.2 ユーザーフィードバック	42
4.3. 考察	42
第5章 結論	43
謝辞	45
参考文献	47
関連発表	52

目 次

1.1	Taptic Engine ¹	2
1.2	Nintendo Switch ²	2
1.3	次世代型ライブビューイング B.LIVE in TOKYO ³	3
1.4	ラグビー 触覚ビューイング ⁴	3
1.5	空中ユーザーインターフェース ⁵	4
1.6	未来の触覚ディスプレイは空中立体像と組み合わせて不特定多数 が利用できる ⁶	5
2.1	皮下の触覚受容器とその組織（[1]より抜粋）	7
2.2	触覚受容器の振動感覚閾値（[1]より抜粋）	7
2.3	視覚における3原色原理（[2]より抜粋）	8
2.4	触原色原理（[2]より抜粋）	9
2.5	触原色原理の物理空間，整理空間，心理空間における触感の対応 （[2]より抜粋）	9
2.6	3DS Systems 社 Touch ⁷	10
2.7	Gravity Grabber [3]	11
2.8	HAPTIC PLASTeR [4]	12
2.9	超音波振動子アレイ [5]	12
2.10	Fairy Lights [6]	13
2.11	Magnetips [7]	14
3.1	不特定多数へウェアラブル触覚ディスプレイを装着することは難 しい	16

3.2	アニメ「電腦コイル」にてMRメガネを通じて空中に表示されたGUIに触れているが、そこに触覚フィードバックはない ⁸	17
3.3	指が物体に衝突した時の各受容器の反応（[8]より抜粋）	18
3.4	空気以外の媒体を通じてエネルギーを伝送し、変換素子で取り出す	18
3.5	磁力によってエネルギーを伝搬し、永久磁石で取り出す	19
3.6	Magnetouch のコンセプト	19
3.7	Magnetouch のシステム構成	20
3.8	ピックアップエレキバン ⁹	21
3.9	作成した電磁石	22
3.10	電磁石の動作確認用デバイス構成	23
3.11	永久磁石をサージカルテープで手に貼り付けた	24
3.12	振動出力パッチ	26
3.13	AM変調の入出力波形（[9]より抜粋）	27
3.14	AM変調による力覚提示パッチ	27
3.15	矩形波による力覚提示パッチ	28
3.16	極低周波の正弦波による力覚提示パッチ	29
3.17	極低周波の正弦波による力覚提示パッチ（位相制限版）	30
3.18	振動弁別実験に使用したMaxパッチ	31
3.19	振動弁別結果	32
3.20	実験セットアップと無出力時のテンションゲージの指示位置	33
3.21	最大値指示時のテンションゲージ	34
4.1	天板部分の設計図	37
4.2	什器外観	37
4.3	立体画像とのインタラクションコンテンツのパッチ	38
4.4	着脱容易化のためにピアノ練習用フィンガーウェイトに永久磁石を取り付けた	39
4.5	永久磁石を指に装着した状態	40
4.6	体験について感想を言い合う体験者	40

5.1 空間や携帯端末に Magnetouch が埋め込まれた未来 44

第 1 章

序 論

1.1. 日常生活に浸透する触覚ディスプレイ

触覚とは人と外部環境との接触などによる皮膚変形を検出し知覚される感覚である [10]. 普段我々は常に触覚を利用しながら生活を営んでいる. 近年では触覚を実際の物体ではなく, 擬似的に触覚を再現する触覚ディスプレイを利用して提示する試みも行われている. 日常生活に浸透している触覚ディスプレイとして携帯電話やゲームコントローラーなどの振動フィードバックがあり, 着信時やゲーム内で状況が変化した際にユーザーに対して振動を提示する. これらの振動は偏心重りをモーターで回転させることによって作り出しているため, 強弱やオン・オフなど比較的簡易な制御ができる. さらに, モーターではなく重りを線形に振動させるリニアアクチュエータを使用し, より高精細な振動を提示できる触覚ディスプレイを搭載した製品も登場している. Apple 社の iPhone7 以降に搭載されている Taptic Engine はガラス面を押し込む際に「カチッ」という振動を提示することでガラス面をボタンのように押し込んだと錯覚させる (図 1.1). Nintendo より発売されている Switch では同様のアクチュエータがコントローラーに搭載され, ガラスコップに入った氷の個数が再現できる (図 1.2).

-
- 1 出典: Youtube - Apple - September Event 2016, 2020/01/31 アクセス, https://www.youtube.com/watch?v=NS0txu_Kz18
 - 2 出典: Nintendo Switch | 任天堂, 2020/01/31 アクセス, <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/index.html>

図 1.1 Taptic Engine¹図 1.2 Nintendo Switch²

1.2. 触覚ディスプレイを用いたコンテンツの進化

従来の触覚ディスプレイを用いたコンテンツは、触覚ディスプレイの所有者個人に対して通知や臨場感の提示を行う。一方で、インターネットの発達により視聴覚以外にも触覚を遠隔地に伝送することが可能になり、スポーツのライブビューイングなどのコンテンツでも触覚が利用され始めている。「B.LIVE in TOKYO」(図 1.3) や「ラグビー 触覚ビューイング」(図 1.4) では試合中の振動をライブビューイング会場で再現し、より会場との一体感や臨場感の向上が図られている [11]。つまり、ある特定の場所に集められた複数の体験者に触覚を提示する触覚ディスプレイへと進化しているといえる。

3 出典：ライブビューイングレポート - B.LEAGUE (Bリーグ) 公式サイト, 2020/01/31 アクセス, https://www.bleague.jp/all-stargame2018/liveviewing_report/

4 出典：ICC — 《ラグビー 触覚ビューイング》(2019), 2020/01/31 アクセス, <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/watching-a-rugby-game-using-haptic-sense/>



図 1.3 次世代型ライブビューイング B.LIVE in TOKYO³



図 1.4 ラグビー 触覚ビューイング⁴

1.3. 未来の触覚ディスプレイと本研究の目的

このように触覚ディスプレイの利用方法は、個人への提示から多人数への提示へと変化してきた。この先、触覚ディスプレイはより大人数で、不特定多数の体験者への提示へと変化していく。触覚を目当てに体験を行うのではなく、日常生活を営んでいるうちに無意識に触覚を提示される未来になる。

具体的には、SF 映画に描かれるような空中像ディスプレイ [12] と組み合わせた空中ユーザーインターフェース (図 1.5) や触覚付きデジタルサイネージ、アミューズメント施設での利用などである。



図 1.5 空中ユーザーインターフェース⁵

本研究の目的は、空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイ (図 1.6) の要件を整理し、定義、実装、検証することである。

1.4. 本論文の構成

第 1 章では触覚ディスプレイの現在と未来を提示し、本研究の目的を設定した。第 2 章では人間の触覚のメカニズムと触原色理論、現在実現している触覚ディ

5 出典：VR がさらに現実に近づく、驚きの「ハプティクス技術」 — 電通テックの公式メディア BAE, 2020/01/31 アクセス, <https://bae.dentsutec.co.jp/articles/haptics/>

7 <https://dribbble.com/shots/5413021-Hologram> を元に作成, 2020/01/31 アクセス



図 1.6 未来の触覚ディスプレイは空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる⁷

スプレイについて紹介し，本研究の立ち位置や貢献を示す．第 3 章では本研究で提案する触覚ディスプレイのコンセプトやシステムの実装要件を示し実装を行う．第 4 章では提案手法コンセプト検証を行う．第 5 章では，本研究の結論を示す．

第 2 章

関 連 研 究

本章では人の触知覚の原理について述べ、実際に触知覚を再現する触覚ディスプレイの事例を取り上げる。

2.1. 人間の触知覚

人の触覚受容器の様子を図 2.1 に示す。触覚受容器は主にマイスナー小体 (FA I)、パチニ小体 (FA II)、メルケル触盤 (SA I)、ルフィニ終末 (SA II) の 4 種に分類される [1]。これらの触覚受容器は特定の振動の周波数帯に対して応答する。実際に振動を人の皮膚表面に加えた際の各受容器の振動検出閾値を図 2.2 に示す。図 2.2 より各触覚受容器の周波数に対する感度に注目すると、メルケル触盤 (SA I) の検出閾値は 1Hz から 1kHz である。マイスナー小体 (FA I)、パチニ小体 (FA II) はそれぞれ異なる周波数検出特性を持つ。ルフィニ終末 (SA II) はメルケル触盤 (SA I) と同じ特性を持つ。この感度特性から、人が知覚できる触覚振動周波数は 1kHz 程度までである。

2.2. 触原色原理

人間の触覚は振動以外の要素も含まれる。触原色原理とは眼球の錐体細胞が持つ光の感知特性をもとに光の 3 原色で色を再現するように、触覚においても生理学的特性に基づき触覚の再現を行う技術観念である [2]。人間の眼は、電磁波のうち $0.40\text{-}0.75\mu\text{m}$ の可視光を検出する。自然の色は様々な波長の光が連続的に混合されているが、これを全て記録、再現することは現実的ではない。しかし、網膜

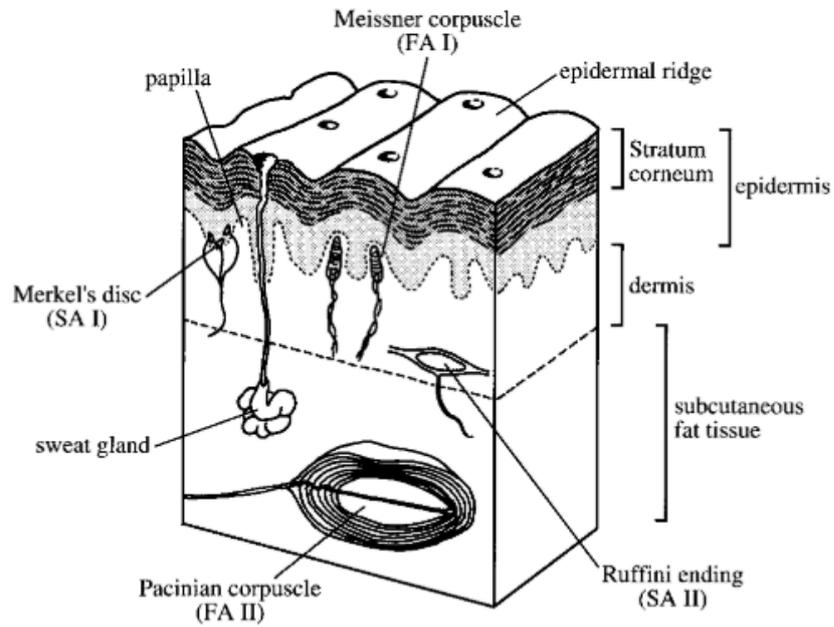


図 2.1 皮下の触覚受容器とその組織（ [1] より抜粋）

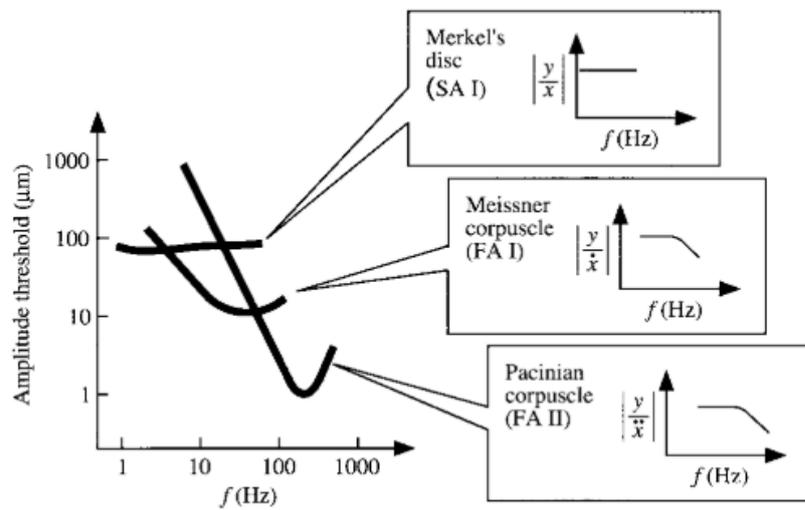


図 2.2 触覚受容器の振動感覚閾値（ [1] より抜粋）

で光を知覚する錐体細胞では光のうち3色のみを知覚し、脳内で混合することで様々な色を認知できる。これを利用した3原色原理によって視覚情報の記録、再現を可能にしている。物体の色は実際の波長と異なっていても、各錐体細胞に同じ強度で光を提示すれば同じ色であると感じる。(図2.3)。皮膚感覚においてもある物体に触れた時と同じ触覚受容器を刺激すれば、同じ触覚を認知できるという原理が触原色である(図2.4)。

触覚は体性感覚である。体性感覚とは体分節性の感覚という意味をもち、皮膚の変化に由来する感覚である皮膚感覚と手や足がどこに位置するかなどの筋や腱に由来する感覚からなる固有受容感覚から構成される [13]。この皮膚感覚と固有受容感覚をあわせたものを触覚と呼ぶ。物体には表面の起伏、摩擦、熱、弾性といった物理特性がある。物体に触れると皮膚表面に力、振動、温度変化が生じ、皮膚感覚を知覚する。これらの物理現象とそれらの刺激を受ける受容器、その結果感じる触感の対応を図2.5に示す。

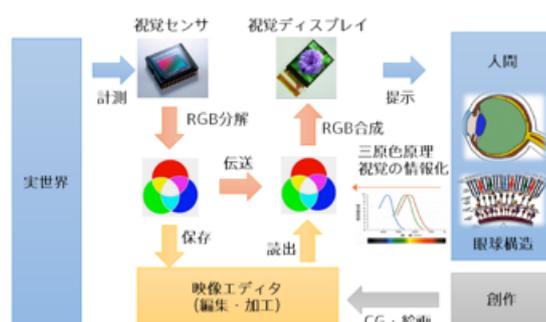


図 2.3 視覚における3原色原理 ([2]より抜粋)

2.3. 触覚ディスプレイ

触覚ディスプレイは接地型、非接地型の2種類に分類される。また、近年接地型と非接地型の中間である空中で触覚を提示する非接触型触覚ディスプレイが登場している。

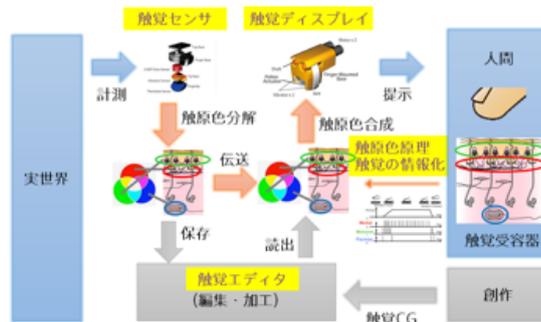


図 2.4 触原色原理 ([2] より抜粋)

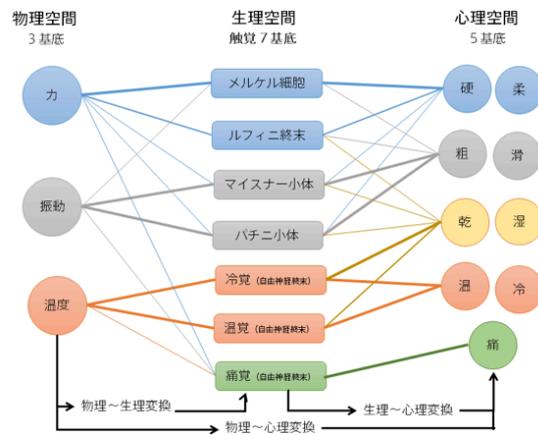


図 2.5 触原色原理の物理空間，整理空間，心理空間における触感の対応 ([2] より抜粋)

2.3.1 接地型触覚ディスプレイ

接地型触覚提示ディスプレイはディスプレイの一端が接地しているため、接地部を支点にして反力を提示することができる。そのため主に、力覚を提示する。

SPIDAR [14] は4つの視点からプーリーを経由して直線的に貼られた4本の糸が取り付けられたリングを指に装着し、糸の反力を調整することで指に対して力覚を提示する。

Touch は3D SYSTEM が販売している触覚ディスプレイである（図2.6）。ユーザーは素片と呼ばれるペンのようなインターフェースを握るように保持する。素片はモーターが搭載されたリンクを経由して接地しており、モーターによってユーザーに力覚提示を行うことで擬似的に物体の感触を提示したり、ロボットアームの操作に適用することでロボットアームが感じた反力を体験者の手に提示できる。



図 2.6 3DS Systems 社 Touch¹

2.3.2 非接地型触覚ディスプレイ

非接地型触覚ディスプレイは接地型触覚ディスプレイと異なり、ディスプレイが接地されておらず、手に持って利用することができる。小型化や提示する触覚の多様化が進んでいる。

1 出典：3D Systems Inc., 3D Systems Touch ハプティクスデバイス, 2019/12/20 アクセス, <https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch>

南澤らの Gravity Grabber [3] は、2つのモータを指の背側に配置し、2つのモータの軸をつなぎ合わせるように指の腹側にベルトを巻きつけて使用する触覚ディスプレイである（図2.7）。モータによってベルトが巻き取られることでユーザーは力覚を得る。また、2つのモータの動作を制御することで指に対して垂直力、せん断力の提示が可能である。

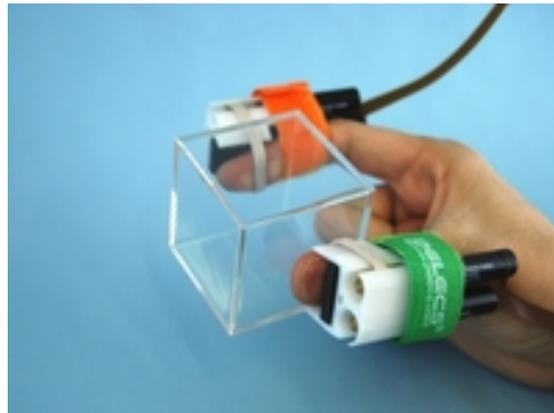


図 2.7 Gravity Grabber [3]

村上らの Altered Touch [15] は Gravity Grabber の力覚提示メカニズムに加えて、触原色理論に基づき振動と温度を提示できる触覚ディスプレイである。Altered Touch は視覚情報と組み合わせて触覚フィードバックをレンダリングすることで実際の物体の触覚特性を変更することができる。

黒木らの HAPTIC PLASTeR [4] は従来の触覚ディスプレイがボイスコイルやスピーカーなど硬い素材で構成されている中で、柔らかい触覚ディスプレイを実現した（図2.8）。HAPTIC PLASTeR は柔らかく、薄く、軽いためサイズや形状を柔軟にカスタマイズすることで、日常生活へシームレスに触覚デバイスを導入できる可能性を示した。

2.3.3 非接触型触覚ディスプレイ

ここでは空中に触覚を提示する触覚ディスプレイ（Mid-air Haptic Display）を非接触型触覚ディスプレイと定義した。



図 2.8 HAPTIC PLASTeR [4]

非接触型触覚ディスプレイは接地型触覚ディスプレイと非接地型触覚ディスプレイの中間に位置する触覚ディスプレイで、触覚提示は直接身体に行われるが、触覚を発生させるアクチュエータは接地している。ユーザーは触覚ディスプレイを利用するためにデバイスを装着したり、特別な動作を行う必要はなく、自然に触覚を得ることができる。

星らは多数の超音波振動子を配列した超音波振動子アレイ（図2.9）により、空中の任意の位置に超音波の焦点を作り出し、何も装着していない人体表面に触覚を提示する触覚ディスプレイを構築した [5]。超音波の焦点においては正負に変動する音圧の平均値が上昇し（音響放射圧）人体表面を圧迫する。焦点は「フェーズドアレイ」原理によって形成される。

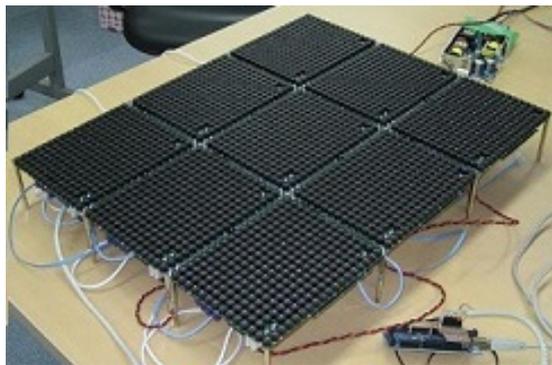


図 2.9 超音波振動子アレイ [5]

Fairy Lights [6] は空気中に強力なレーザーの焦点をすることにより、プラズマが発生して光を放つことにより空中に映像を表示できる。この映像に触れることで、ごく短時間に皮膚に対して熱や空気の膨張を発生させる。このため、映像だけでなく触覚も空中にレンダリングできるディスプレイとして利用できる。

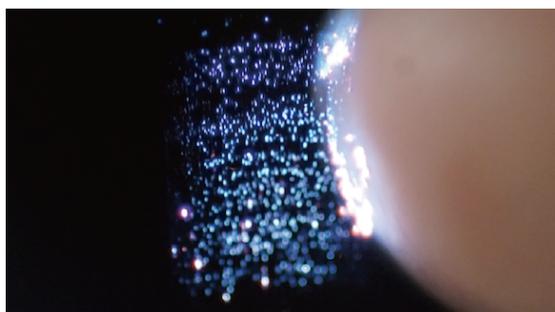


図 2.10 Fairy Lights [6]

星野らの Jorro Beat [16] は、水を触覚を伝達する媒体として利用している。シャワーヘッドに取り付けられたバルブをモーターとカムによって開閉することで触覚をデバイスの接触なしに実現している。

また、電磁石によって磁界を発生させ、身体に永久磁石を貼り付けて振動させる触覚ディスプレイも登場している。これらは振動子として永久磁石を使用し、永久磁石を身体に接触させる必要があるが、触覚提示のために永久磁石にケーブルやバッテリーを接続する必要はないため非接触型触覚ディスプレイに分類する。

Karunanayaka [17] らは、鉄芯入りの電磁石とホール素子のアレイを構成し、永久磁石の位置を推定しポインティングを行う。ユーザーの動作に合わせて電磁石を駆動し永久磁石を振動させる。

McIntosh [7] らの Magnetips は軽量化のために鉄芯入りの電磁石ではなくコイルのみを使用し、スマートウォッチと組み合わせて使用する (図 2.11)。永久磁石の磁力を位置検出に利用するため、コイルの駆動にインターバルを設けている。その影響で提示できる振動はシンプルなものである。このようなデバイスの周囲でインタラクションを行う研究分野を “around device interaction” と呼ぶ。

FingerFlux [18] は磁力によって触覚を提示するが、振動だけではなく液晶ディスプレイの下に敷き詰められた電磁石アレイの極性を変化させることでスライダー



図 2.11 Magnetips [7]

やボタンなどの位置を示している。

2.4. 日常の利用を想定して触覚ディスプレイを利用している事例

TECHTILE toolkit [19] は身の回りのものや身体に触覚の入出力モジュールを取り付け、触覚を音声情報として取り扱い、簡易に触感コンテンツの作成や加工、編集が可能になった。

早川らは触感を無線で共有できる無線触感伝送キットにより容易に同時に複数人への触覚の共有を可能にした [20]。

触覚を日常的に収集し共有することにより、臨場感や現実感を持った身体的体験を共有できるようになる。スポーツにおいて触感を共有する SMASH [21] がある。

REVEL [22] は物体に静電気を帯電させ、様々なものに触感を持たせることができる。触覚の提示に、物体の形状は影響しないため靴や食器などの日用品から触覚を提示できる。

第 3 章

提案手法

本章では空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイの要件を明らかにし、提案する Magnetouch の実装方法について述べ、設計および実装を行い、特性の計測を行う。

3.1. デザイン要件の整理

序論では触覚ディスプレイが日常生活に浸透していることを述べ、触覚の提示対象が特定の個人から特定の場所にいる多人数へと変化していることを述べ、触覚ディスプレイは今後空中立体像と組み合わせて空中ユーザーインターフェースや街中での触覚付きデジタルサイネージなど不特定多数への提示へ変化するだろうと予想した。

関連研究で述べた通り、従来の触覚ディスプレイはウェアラブルにフォーカスし、体に直接身につけ、行動が可能なものが現れている。ウェアラブルな触覚ディスプレイでは力覚・振動・温度など高精度に提示できるため提示クオリティとしては問題ない。しかし、不特定多数が利用することを想定すると、多人数へ装着を行う必要があるため価格や装着に必要な時間などが発生するため、公共空間や街角、テーマパークなどでの利用は考えにくい（図 3.1）。また、触覚が存在する手や指は視聴覚と異なり感覚器官としての機能だけでなく、外界に対して働きかけを行う運動器官でもある [23]。つまり、触覚提示のためにデバイスを装着することは本来手や指が持つ運動機能を阻害する要因になり得るため MR メガネ等と異なり、装着したまま生活することに対するハードルを感じる。アニメ「電腦コイル」ではミックスリアリティ（MR）メガネを通じて空中 GUI を使用する描

写があるが、ここに触覚提示は行われていないとされている (図 3.2)。監督の磯はパワーグローブは存在するものの機能優先であり「ペットを撫でた時にグローブをはめて撫でたら、どんな映像になるだろうと想像した時に、ハードルが高いと感じてやめました。」[24] と述べている。

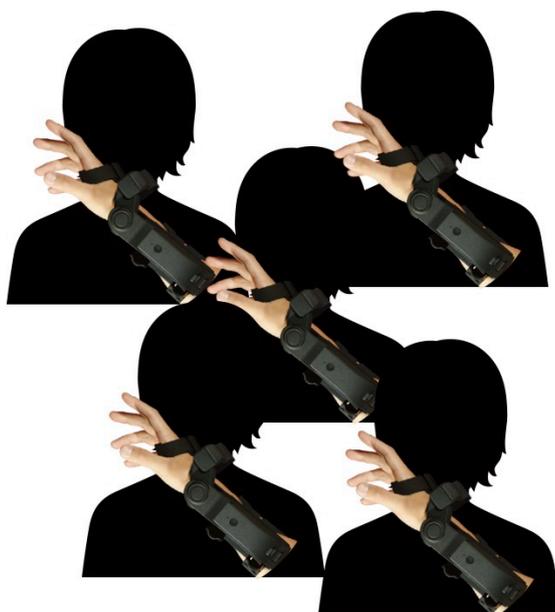


図 3.1 不特定多数へウェアラブル触覚ディスプレイを装着することは難しい

一方で、レーザーや AUTD などの非接触触覚ディスプレイを用いれば体験者へのデバイス装着は不要であるため、不特定多数への提示という要件は満足できる。レーザーを使用した非接触触覚ディスプレイは空気をレーザーのエネルギーにより膨張させ、衝撃波によって皮膚を直接振動させている。しかし、振動強度が弱く、強度をあげるためにレーザーの出力を強化すると皮膚へダメージを与えてしまう。また、衝撃波のため任意の振動波形を出力できない。星らの Touchable Holography [25] は空中 超音波触覚ディスプレイ (AUTD) と凹面鏡を用いた空中立体像ディスプレイ、赤外線カメラによるハンドトラッキングを組み合わせ、空中の立体像に触れると振動触覚を得られる。このシステムが住空間において利用で

2 出典：磯光雄監督, 電腦コイル, 第 2 話より, 2007



図 3.2 アニメ「電腦コイル」にて MR メガネを通じて空中に表示された GUI に触れているが、そこに触覚フィードバックはない²

きるようになれば SF 映画のような空中 GUI を実現することができる。AUTD も空気を媒体とし、超音波でエネルギーを直接皮膚へ伝搬している。しかし、こちらでも空気中で減衰してしまうため力覚提示能力は 1cm^2 あたり最大 50mN である。

また、空中ユーザーインターフェースを実現する場合、空中に表示されたボタンを押し込む行為が必要である。これを実現させるためには日常的な動作において頻繁に発生する衝突感覚を表現する必要がある。衝突時、触覚の各感覚受容器は図 3.3 に示されるように全て反応を示し、メルケルとルフィニで変位、マイスナーで速度、パチニで加速度を検知している [26]。これらの受容器はそれぞれ、メルケル細胞とルフィニ終末は圧力とせん断力、マイスナー正体は低周波振動、パチニ小体は高周波振動を検知している。これらを触原色に当てはめると、衝突感覚は力覚と振動によって再現できる。よって、少なくとも空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイは力覚と振動を提示でき、ある程度の触覚提示クオリティを持つ必要がある。

これらから、空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイの要件を以下に示す。

- 不特定多数のユーザーがすぐに使用できること
- 装着の手間やコストが低いこと
- 触感クオリティが高いこと

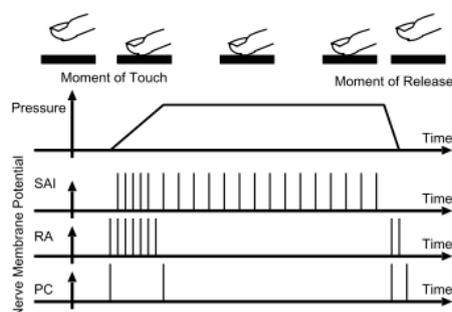


図 3.3 指が物体に衝突した時の各受容器の反応（ [8] より抜粋）

やはり、これらの要件を満たす触覚ディスプレイとしてもっとも近いものは非接触触覚ディスプレイであるが、提示できる触感クオリティが低いことが問題である。しかし、レーザーや AUTD において触感クオリティを低下させる主な原因が空気を媒体としてエネルギーを伝搬していることであり、空気以外の媒体を利用してエネルギーを送り届け、体に装着するメガネのような装着中に意識しないパッシブな変換素子によってエネルギーを取り出すことができれば解決できる（図 3.4）。さらに、空気以外の媒体を利用することで遮蔽物による反射を抑えられる可能性があるが、例外的に UltraHaptics [27] では超音波アレイの全面に映画館のスクリーンのように音を透過する素材のスクリーンによる遮蔽は可能である。

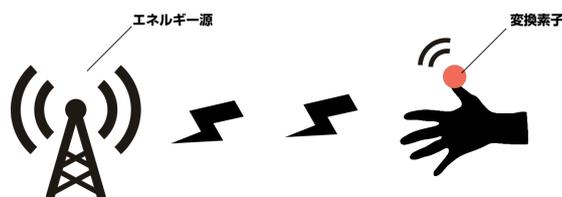


図 3.4 空気以外の媒体を通じてエネルギーを送り届け、変換素子で取り出す

3.2. Magnetouch の提案

空気以外の媒体を利用してエネルギーを送り届け、体に装着するメガネのような装着中に意識しないパッシブな変換素子によってエネルギーを取り出せるとい

う条件に合致するものとして磁力がある。エネルギーは磁力によって伝送され、永久磁石によって振動や力覚のエネルギーとして取り出せる（図 3.5）。



図 3.5 磁力によってエネルギーを伝搬し、永久磁石で取り出す

関連研究でも述べているように、磁力と永久磁石を利用する触覚ディスプレイに関する研究が注目されている。しかし、これらの磁力を利用した触覚ディスプレイは振動出力だけでなく、位置検出などの入力としての機能も磁力で実現するアプローチのため、任意の振動と力覚を提示できず、触感クオリティの高いものはない。

よって、本研究では磁力によってエネルギーを送り、永久磁石を身体に貼り付けることで触覚に変換し、触感クオリティの高い出力が可能な触覚ディスプレイ「Magnetouch」を提案する。Magnetouch のコンセプトを図 3.6 に示す。



図 3.6 Magnetouch のコンセプト

Magnetouch の構成図を図 3.7 に示す。Magnetouch は電磁石、アンプ、振動と

力覚を再現する音声信号を生成する音源からなるコントローラと身体に装着する永久磁石からなる。触覚信号を電磁石に入力することにより振動や力覚を提示する磁界を発生させ、身体に貼り付けた永久磁石を吸着および反発することで振動を提示する。また、電磁石に入力する信号を直流信号にすることで、持続的な吸着・反発力を提示できるため、力覚として利用することも可能である。電磁石から発生した磁界は木材やアルミ、ガラスなどの非磁性体であれば貫通し電磁石の隠蔽が可能であり、より生活空間での利用可能性が高まる。

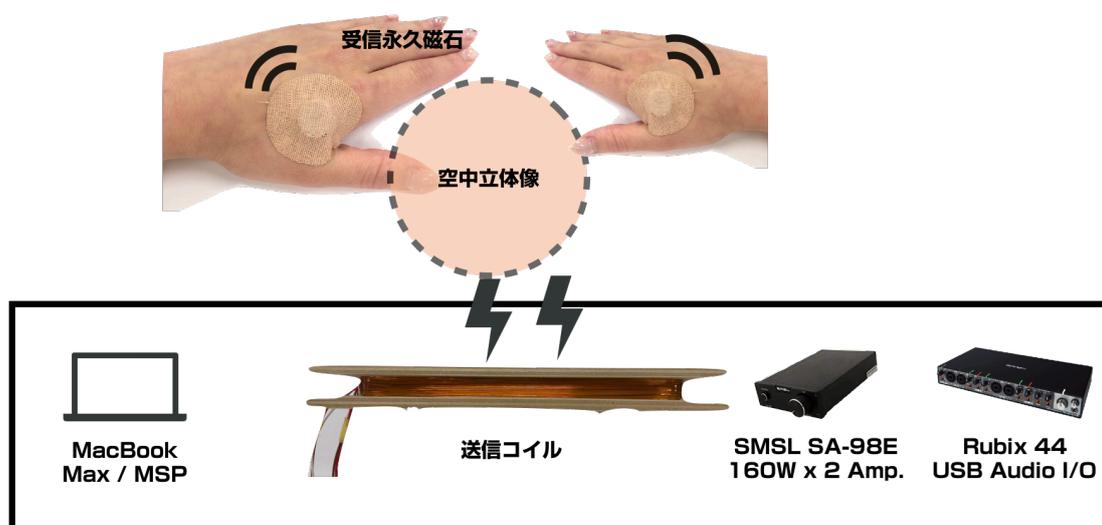


図 3.7 Magnetouch のシステム構成

さらに、永久磁石を利用することの利点として、エネルギー変換素子を身につけなければならないという欠点を克服できる。永久磁石を身体に貼り付けるという行為はピップエレキバン（図3.8）で日常的に利用されている。ピップエレキバンはメガネや衣服のように装着し始めは意識し、むず痒いものであるが、時間の経過とともに身体の一部になり意識しなくなるという特性がある。よって、貼り付けているが貼り付けていない状態と同じと言える。

3 出典：ピップエレキバン MAX200 — ピップエレキバン® | ピップ（株），2020/01/31 アクセス，<https://www.elekiban.com/products/200.html>

図 3.8 ピップエレキバン³

3.3. Magnetouch の設計と実装

Magnetouch のコンセプトを実現する触覚ディスプレイの設計と実装を行う。

3.3.1 電磁石の設計と実装

Magnetouch の電磁石は立体像ディスプレイとともに設置されるため埋め込まれることを想定する。電磁石はテーブルに組み込まれることを想定しサイズを設定した。鉄芯は厚さ 10mm，奥行き 100mm，幅 160mm の鉄板である。鉄芯を挟み込む保持材として厚み 6mm，奥行き 160mm，幅 210mm のシナベニヤ材をカプトンテープで絶縁済みの鉄芯に接着した。電磁石の線材は 0.5mm の UEW を使用し 1 層あたり 20 回ずつ鉄芯の周囲に隙間なく巻きつけた。層間はカプトンテープを挟み絶縁する。これを 20.5 層作成した。総巻き数は 410 回である。作成した電磁石を図 3.9 に示す。

単純な矩形波を入力し、永久磁石を近づけ振動を感じることによって作成した電磁石が正しく動作していることを確認する。

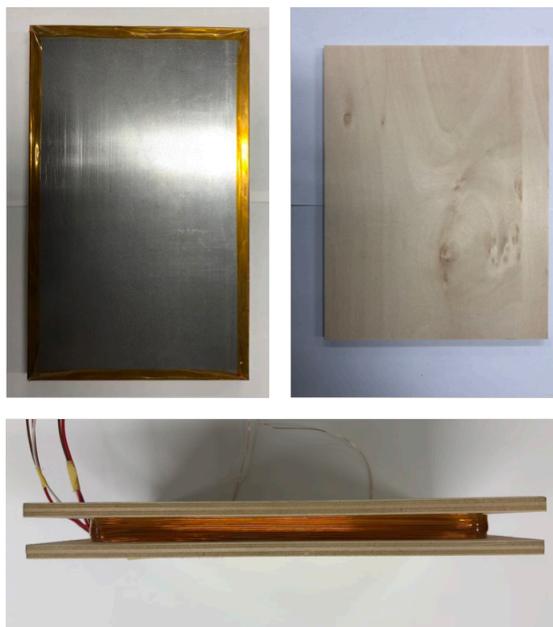


図 3.9 作成した電磁石

信号源として Seedstudio 製 Motor Driver Shield V1 と Arduino Uno を使用した。シールドには最大出力電流 2A のモータドライバである L298N を搭載している。外部電源として 12V 10A の AC アダプタをシールドに接続した。出力する波形は 50Hz の矩形波で、モータドライバの正転および逆転を 10ms ごとに入れ替えることで生成した。動作確認用のデバイス構成を図 3.10 に示す。

永久磁石は直径 8mm、高さ 5mm、磁力 0.6T のネオジム磁石を使用し、マスキングテープを用いて右手人差し指の腹側に巻きつけた。電磁石の表面から 10cm 離れた高さで振動を感じたため電磁石は正しく動作していることを確認した。

3.3.2 永久磁石の貼り付け方法の検討

本研究では永久磁石をピップエレキバンなどの健康器具のように身体に貼り付けることで、最小限の装着負荷で利用できるとしている。しかし、市販されているピップエレキバンは 20mT が最大の強度であり、十分に触覚を提示できない。そこで、永久磁石として強力なネオジム磁石を使用するが、健康器具と同じよう

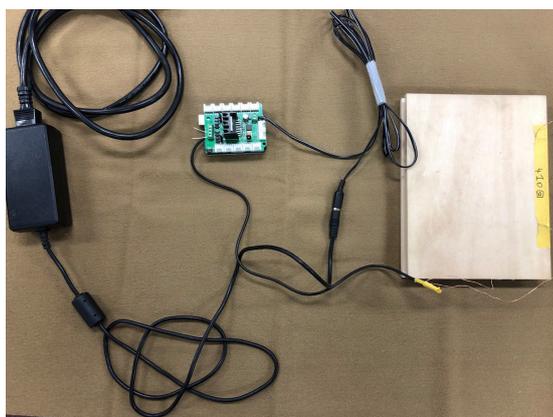


図 3.10 電磁石の動作確認用デバイス構成

に身体に貼り付けるための方法が必要である。

今回は、テーピング用のサージカルテープを直径 8mm, 高さ 5mm, 磁力 6000 ガウスのネオジウム磁石に合わせてピックアップエレキバン状にレーザーカッターで切り抜くことで貼り付ける粘着テープを作成した。

装着イメージを図 3.11 に示す。

3.3.3 触覚提示コントローラのハードウェア

Magnetouch は電磁石へ音声信号として触覚振動および力覚信号を入力することで触覚提示を行う。音声信号は PC で生成し、オーディオインターフェース、オーディオアンプを経由して電磁石へ入力される。コントローラで使用している機器を以下に示す。

- PC: Max/MSP を実行し、振動および力覚信号を生成する (MacBook Air)
- オーディオインターフェース: 4チャンネルオーディオインターフェース。PC で生成した振動および力覚信号を実際の電気信号として出力する (Rubix44)
- オーディオアンプ: 160W D級パワーオーディオアンプ。オーディオインターフェースからの振動および力覚信号を増幅し、電磁石に十分な強度の磁

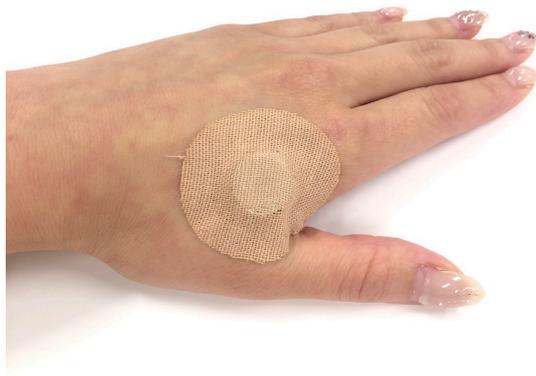


図 3.11 永久磁石をサージカルテープで手に貼り付けた

界を発生させる (SMSL SA-98E)

3.3.4 触覚提示コントローラのソフトウェア

先述の通り, Magnetouch において振動と力覚信号は Max/MSP で音声信号として生成される. Max/MSP は音声処理を得意とするビジュアルプログラミングソフトウェアで Cycling '74 によって開発されている.

本項では Magnetouch の要件である振動および力覚信号を生成するアルゴリズムを検討する.

Magnetouch では任意の振動波形を提示できることを要件としている. よって, 触覚振動の音源は実際に触覚マイクなどで収録した触覚振動や, 通常の音声マイクを使用して収録した音声信号を信号処理により触覚振動として提示することになる. 合わせて, 力覚の提示のためには直流成分を入力するアルゴリズムが必要である.

振動波形の生成

まず, 振動成分を生成するアルゴリズムについて検討を行う. 先述の通り, Magnetouch において振動波形は単純な矩形波や正弦波のみで構成されたものではなく実際にマイクを利用して収録された音源を利用したい.

触覚マイク, 音声マイクによらず収録された音声信号から触覚振動を提示する際に触覚ディスプレイの特性に合わせた信号処理を行うことは一般的である. 特に人間が知覚できる触覚振動は 1kHz が上限と言われており, ローパスフィルターを利用して 1kHz 以上の周波数成分をカットする. また, 音声マイクによって収録された音声信号から擬似的に触覚を再現する方法としてピッチシフトを行う. これらを実装した Max パッチを図 3.12 に示す.

実際に音声信号として収録された蛙の鳴き声をアルゴリズムに入力し, ローパスフィルターのカットオフ周波数を 1kHz に設定した. この状態で, 3.3.1 節と同じように接近させたところ, 振動を感じた. また, ピッチシフトにより 1 オクター

ブ音程を引き下げた場合、ピッチシフトを行わない場合に比べて強く振動を感じたため、双方のアルゴリズムが正しく動作していることを確認できた。

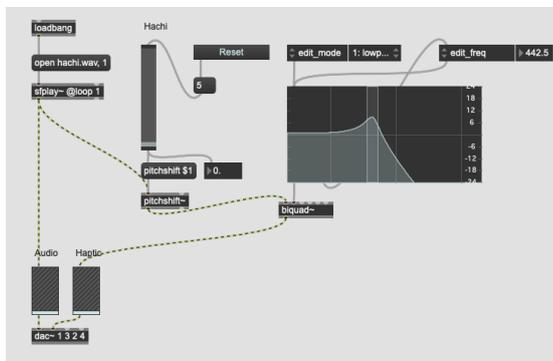


図 3.12 振動出力パッチ

力覚の生成：AM 変調

続いて、力覚の生成を行う。力覚は先述の通り、直流成分であるが状況によっては提示すべき力の大きさが時間とともに変化する可能性もある。一方で振動は交流成分である。よって、振動を提示しながら力覚を提示したい場合、微変動する直流成分を含む交流波形を生成する必要がある。

微変動する力覚の提示量を 0.5Hz の正弦波で表現することにした。また、触覚振動として 300Hz の正弦波を使用した。この 2 種類の波形を利用して AM 変調を行うことで、永久磁石の極性にかかわらず力覚を提示できると考えた。

AM は Amplitude Moduration の略で振幅変調と訳される。AM 変調を行うことによって搬送波を変調波の振幅に合わせて変化させる。AM 変調の出力波形を図 3.13 に示す。AM 変調を触覚に適用する場合、振動波形を搬送波、変調波を力覚信号とした。

AM 変調を行う Max パッチを図 3.14 に示す。

3.3.1 節と同じように接近させたところ、AM 変調では力覚の提示量を変更しても、ボリュームつまみを操作するように振動の強弱が変わるだけで振動成分を強く認知してしまった。

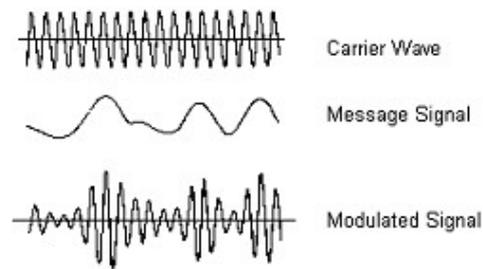


図 3.13 AM 変調の入出力波形（ [9] より抜粋）

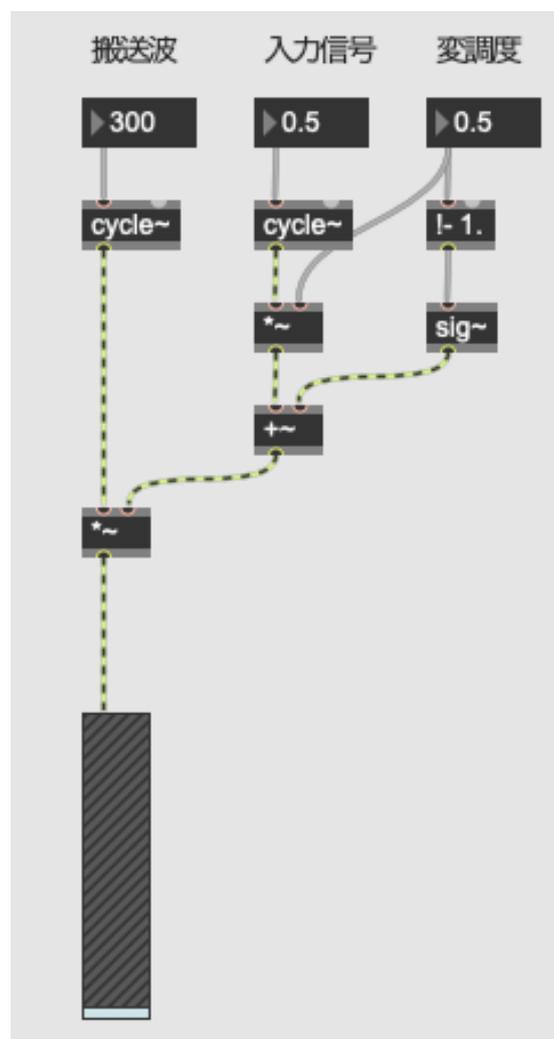


図 3.14 AM 変調による力覚提示パッチ

力覚の生成：矩形波

前述の通り、振動と同時に力覚を提示することは困難である。ここでは振動成分は提示せず、力覚を提示することに専念する。1Hz 程度の低周波で Duty 比を 10% に設定した矩形波を提示し、力覚を得ることができるか確認する。作成した Max パッチを図 3.15 に示す。

3.3.1 節と同じように接近させたところ、極性が反転する際に力覚を感じるもののすぐに変化がなくなったように感じた。これは極性が反転した際に永久磁石も反転しようとして回転動作が発生したため急激に力覚を感じたが、オーディオアンプの保護回路により直流成分がカットされたと推察する。

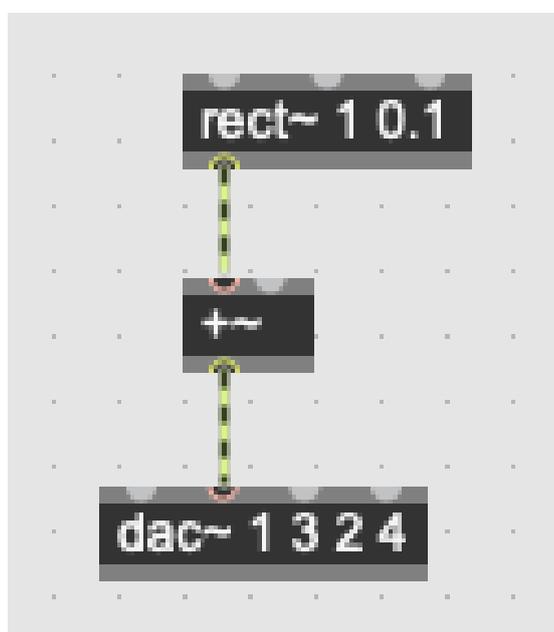


図 3.15 矩形波による力覚提示パッチ

力覚の生成：0.5Hz の正弦波による擬似的な直流成分の提示

矩形波では反発感はあるもののすぐに変化がなくなったように感じた。そこで、完全な直流成分ではなく 0.5Hz 程度の極低周波の正弦波を提示し、変化のある磁界を提示した場合、どのように力を知覚するか確認する。

まず、単純に 0.5Hz の正弦波を入力した。作成した Max パッチを 3.16 に示す。3.3.1 節と同じように接近させたところ、“ブルンブルン”とゆっくり強く永久磁石から力を感じた。しかし、1 方向だけでなく逆方向への力も感じた。これは正弦波の位相が π 進むたびに極性が反転することが影響していると思われる。

続いて、反転の影響を除去するため、提示する正弦波の位相を 0 から $\frac{\pi}{4}$ に制限した波形を入力した。作成した Max パッチを 3.17 に示す。3.3.1 節と同じように接近させたところ、“ブルブル”とゆっくり強く永久磁石から力を感じた。正弦波を 1 波長入力した場合に比べ、力は 1 方向にのみ発生するように感じた。



図 3.16 極低周波の正弦波による力覚提示パッチ

力覚の生成：直流駆動

そもそも、Magnetouch の電磁石へ直流を印加した際にどのような力覚を得るか確認してみることにした。

直流安定化電源を電磁石に接続し、24V を印加した。電流は約 2.5A 流れていた。その状態で、3.3.1 節と同じように接近させたところ、電磁石の表面から 1cm 程度で指に対して力を感じた。

よって、純粋に直流電流によって電磁石を駆動すれば力覚を提示できることは確実であった。しかし、依然振動と同時に力覚を提示する手法が求められる。

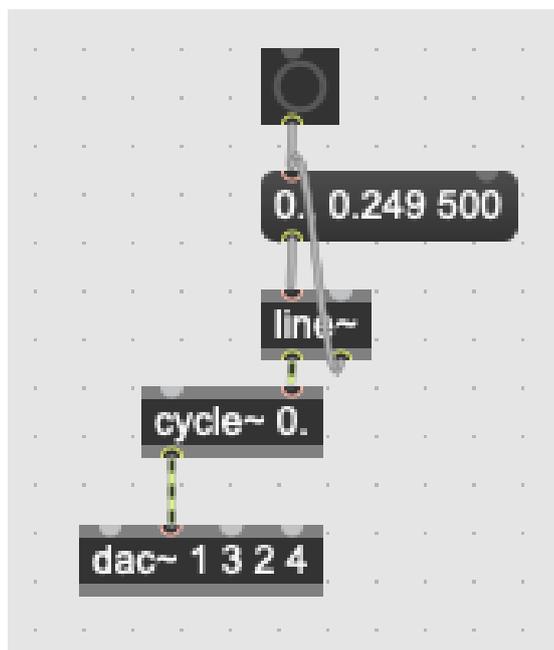


図 3.17 極低周波の正弦波による力覚提示パッチ（位相制限版）

3.4. 特性計測

作成した Magnetouch が要件 3,4 を満たしていることを確認するため特性計測試験を行った。

3.4.1 振動特性計測

作成した触覚ディスプレイが触覚領域の周波数帯である 1kHz 以下の振動を出力できているか振動弁別実験を行う。

実験方法

被験者の右手示指の先端と永久磁石の円周が接するように示指腹側に永久磁石を密着させ、マスキングテープで固定する。電磁石の上に 20mm 厚のメラミンスポンジを設置し、永久磁石がメラミンスポンジ端に接することのないように被験

者に示指を維持させる。この時の永久磁石底面と電磁石天面の距離は約 15mm である。

電磁石から正弦波を出力 0% から 100% に向けて強度を上げてゆき、上下法 [28] により弁別閾を計測する。反転回数は 6 回とし、弁別閾は反転値の平均とする。測定する周波数は 1, 3, 10, 30, 100, 300, 800, 1000 Hz の 8 種である。使用した Max パッチを図 3.18 に示す。

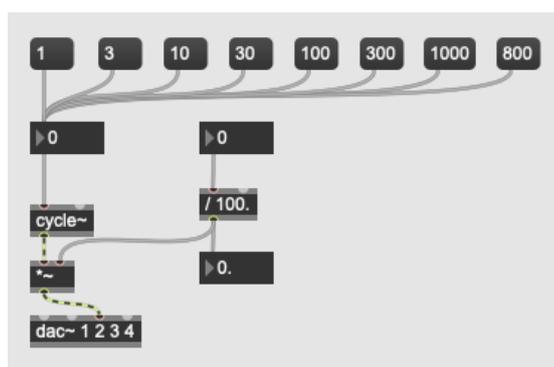


図 3.18 振動弁別実験に使用した Max パッチ

実験結果

被験者は 25 歳男性である。実験結果を図 3.19 に示す。このグラフにおいて出力強度が低い状態で弁別可能であれば、強く出力できる周波数であると言える。グラフより、1Hz から 800Hz までは弁別可能であったため出力が可能である。しかし、1000Hz は被験者が識別不能であったため出力不可能であったといえる。

3.4.2 力覚特性計測

3.3.4 節から力覚を提示するアルゴリズムは 0.5Hz の正弦波のうち位相が 0 から $\frac{\pi}{4}$ の波形を出力することで短期間ながら力覚を提示できることが判明している。この力覚提示アルゴリズムにより提示される力の簡易計測を行う。

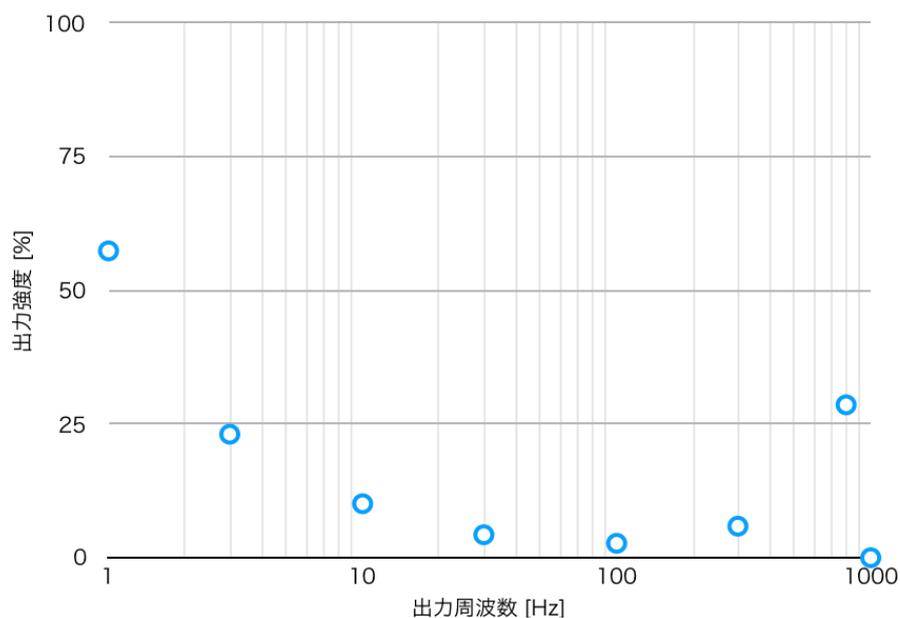


図 3.19 振動弁別結果

実験方法

棒型テンションゲージに永久磁石を貼り付け、永久磁石が電磁石表面から 60mm 離れた位置に固定する。力覚提示信号を入力し、テンションゲージの指針を動画撮影し、最大指示位置を記録する。無出力時の指示位置と比較し、提示された力を求める。棒型テンションゲージは中村製作所製 TK50CN（測定範囲 0cN から 50cN，誤差 ± 1 目盛り，1 目盛り 1cN）を使用した。

実験結果

無出力時のテンションゲージ指示位置は 8cN であった。出力時のテンションゲージの最大指示位置は 21cN である（図 3.21）。よって 13cN の力が提示されている。



図 3.20 実験セットアップと無出力時のテンションゲージの指示位置



図 3.21 最大値指示時のテンションゲージ

3.5. 本章のまとめ

本章では、空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイのデザイン要件を「不特定多数のユーザーがすぐに使用できること」、「装着の手間やコストが低いこと」、「触感クオリティが高いこと」と定義し、非接触触覚ディスプレイが適当であると判断した。しかし、既存の非接触触覚ディスプレイは空気を媒体とするため触感クオリティが低い。そこで本研究では磁力を媒体とし、永久磁石によってエネルギーを触覚に変換する触覚ディスプレイである Magnetouch を提案した。永久磁石を利用することでピックアップエレキバンなどと同じく、装着の手間やコストが低いため、全ての要件を満たせることがわかった。

また、Magnetouch の設計と実装を行い、要件を満たしていることを確認した。Magnetouch で振動を提示する場合、ローパスフィルタとピッチシフトを用いることで非触覚信号から擬似的に触覚振動を提示できることを示した。また、力覚提示に関しては長期間の提示と振動との同時の提示は不可能であるが、極低周波の正弦波を用いることで力覚を表現できることが示された。

最後に、特性計測実験により、振動は 1Hz から 800Hz にかけて出力が可能であることと力覚として 13cN の力を提示できることを確認し、十分な触感クオリティを提示できた。本論文での振動特性計測実験は事前に選択した周波数で離散的に計測を行なっているが、今後ホワイトノイズ提示による連続的な周波数特性計測を行いたい。また、距離による磁力の変化を抑制するため、デジタルフォースゲージを使用した力覚特性計測実験も行いたい。

第 4 章

コンセプト実証

4.1. 空中立体画像とのインタラクション

日常的な触覚ディスプレイのユースケースとして何らかの空中に表示された立体像の触覚を提示することで実在しないオブジェクトに触れる感覚を提示し、実体感を持ってインタラクションを行えるか確認する。

4.1.1 空中立体画像の提示方法の選択と什器の設計

空中に立体像を結像させる方法は多く研究・開発されてきた [29, 30]。本研究ではあくまで日常的に利用できる触覚ディスプレイの提案を主としているため空中立体画像ディスプレイに関する詳述は省略する。

今回はシンプルに空中立体像とのインタラクションを構築したいため、焦点距離の異なるパラボラ鏡を向かい合わせた空間に物体を置くと空中に浮かぶように結像するボルマトリックスを利用した。

また、異なるコンテンツを提示できるように什器には2つの Magnetouch を組み込み済みのボルマトリックスと音声スピーカーを配置している。

什器の天板はアクリル板を切り、ボルマトリックスとスピーカーを取り付けた。天板部分の設計図を図 4.1、什器外観を図 4.2 に示す。

4.1.2 ボルマトリックスへの Magnetouch の組み込み

ボルマトリックスと Magnetouch と組み合わせる場合、3章で作成した Magnetouch ではボルマトリックスの底面に設置することになり提示対象の永久磁石と

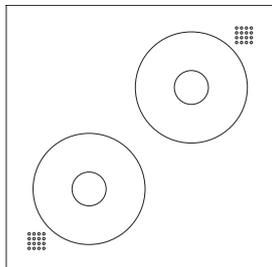


図 4.1 天板部分の設計図



図 4.2 什器外観

の距離が遠い。またボルマトリックスは中央に穴が空いた形状でその穴から立体像を結像させているため、Magnetouch をボルマトリックスの上面においてしまうと穴を塞いでしまう。そこで今回のコンテンツでは Magnetouch の電磁石をボルマトリックスへ組み込んだ。ボルマトリックスの上面に 5mm 厚の MDF 板を外径 210mm、内径 60mm で切り抜いた天板を接着し、ボルマトリックス本体と天板との間に 0.5mm 径の UEW を 560 回巻きつけた。

コンテンツ 1 として蛙のフィギュアを立体画像として使用し蛙の鳴き声の音声データをスピーカーに出力、および 500Hz のローパスフィルターをかけた音声データを触覚信号として出力するものを作成した。コンテンツ 2 として蜂の巣のフィギュアを立体画像として使用し、蜂の羽音の音声データをスピーカーに出力、および 500Hz のローパスフィルターをかけた音声データを触覚信号として出力するものを作成した。

アンプは 160W の SMSL SA-98E を使用し、オーディオインターフェースは Rubix44 を使用した。コントローラーの制御ソフトウェアは Max/MSP を利用した。作成したソフトウェアのパッチを図 4.3 に示す。

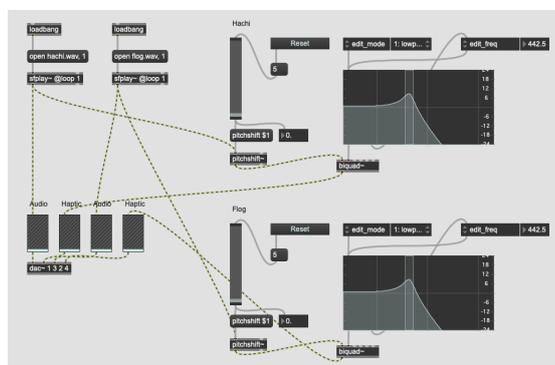


図 4.3 立体画像とのインタラクションコンテンツのパッチ

4.1.3 KMD Forum 2019 でのデモンストレーション

実際に空中立体画像とのインタラクションコンテンツを 2019 年 11 月 2 日に開催された KMD Forum 2019 に出展した。体験者は 20 代から 60 代程度で約 30 人

である。

実際のデモンストレーションでは、永久磁石の着脱の容易化のためピアノ練習用のフィンガーウエイトに永久磁石を接着したものを指先に装着するよう変更した。永久磁石は直径8mm、高さ5mm、磁力600mTのネオジム磁石を使用した。フィンガーウエイトと永久磁石と装着した状態をそれぞれ図4.4と図4.5に示す。

体験者は永久磁石を指先に装着した状態で空中立体画像に触れるように指を近づけると、音声に合わせて永久磁石が振動し、あたかも立体画像に触れているような体験を得ることができる。

体験者からは“蛙の喉を触ってる感覚がして生々しい”，“巣に近づいていくにつれて振動が強くなってリアル”といったフィードバックを得られ、実在しない物体を実体感を持って認知できていた。一方で，“これは指先が蜂になっているイメージでいいのか”といったコメントもあり、触覚コンテンツにおけるコンテキストの重要性を認識した。また、2から4人の体験者が同時に触覚コンテンツを利用し体験について感想を言い合う場面も見られた（図4.6）。また、展示者不在であっても体験者が自発的に磁石を装着し体験する姿も見られた。よって Magnetouch は不特定多数の体験者に同時に触覚を提示できることを確認した。



図 4.4 着脱容易化のためにピアノ練習用フィンガーウエイトに永久磁石を取り付けた



図 4.5 永久磁石を指に装着した状態



図 4.6 体験について感想を言い合う体験者

4.2. 物体を経由したインタラクション

空中立体像ディスプレイは多数研究開発されているが、実際に日常生活で活用される未来は未だ来ていない。そこで、空中立体像ディスプレイが普及するまでの間の過渡期での触覚ディスプレイの日常的利用を想定する。Gravity Grabber では指に装着した触覚ディスプレイから振動および力覚を提示することにより、中に何も入っていないキューブを振った時にキューブ内にあたかも物体が存在しているかのような感覚を提示している。そこで Magnetouch においても、空中に結像した立体像ではなくコップなどの実際に存在する物体を経由して触覚を提示することにより、実在しない物体とのインタラクションを実現できるか確認する。

4.2.1 コンテンツの選定と作成

氷がガラスコップを滑りガラスへ衝突する触感をプラスチックコップの角度に合わせて提示するコンテンツを作成した。

振動は TECHTILE toolkit のマイクをガラスコップに取り付け氷を落下させたものを録音した。

Unity で氷の摩擦を再現したオブジェクトを作成し、2つのホールセンサーの値の差分からどちらのセンサーに近接しているか計算を行いオブジェクトの角度に反映する。角度の変化に伴い滑り出したオブジェクトが壁に衝突した際に触覚を再生する。

電磁石の表面中央部には磁石の位置を検出するためにホールセンサー(A1324LUA-T)を2cmの間隔で2つ貼り付けた。ホールセンサーの値は0Gで2.5Vを基準とし、5mV/Gでアナログ電圧をリニアに出力する。この電圧をArduinoで読みとり1kHzでPCへシリアル送信する。振動提示先として今回のプロトタイプではプラスチックコップを使用する。プラスチックコップの側面を挟み込むようにネオジム磁石を取り付けた。ネオジム磁石は厚さ5mm、奥行き15mm、幅20mm、磁束密度は0.3Tである。

4.2.2 ユーザーフィードバック

24才男性被験者1名にプラスチックコップを電磁石の上で移動させ触感を提示した。“振動の強度は問題ないほど強い”，“ポヨポヨとした圧力を感じる”，“触覚の提示タイミングがずれた時に混乱する”，“氷のオブジェクトが表示されている画面を見ながら操作すると氷が移動しているように感じる”などのコメントを得たため，Magnetouchで物体を経由した触覚提示コンテンツが提供できることが示された。

4.3. 考察

空中立体画像とのインタラクションデモにより，不特定多数の体験者に触覚を提示できることを確認できた。また，展示者不在であっても体験できたため装着の手間やコストは十分低い。すでに基本特性計測により，0.5Hzから800Hzまでの振動が提示できることを確認したため触感クオリティが十分高い。よってMagnetouchは空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイの要件を全て満たすものと言える。

また，物体を経由したインタラクションデモにより立体空中像ディスプレイが普及するまでの過渡期においてもMagnetouchが触覚ディスプレイとして利用できる可能性が示された。

これらのデモを通じてMagnetouchのコンセプトが日常生活において利用できることを確認できた。しかし，Magnetouchは原理的に住空間に強力な磁力を放出する。理論値で160Wもの電力でコイルを駆動し磁力を発生させている。また，今回採用した磁石もネオジム磁石である。よって，磁石同士を近づけると強力に引き合うため指挟みの危険がある。指に一つずつ磁石を貼り付けた場合でも隣接する指同士が引き合う可能性がある。さらに，クレジットカードやパソコンなどの故障の原因なる可能性や，長時間の強力な地場へ人体が晒されることも何らかの悪影響を及ぼす可能性がある。デモ中は一時的に危険性を知らせる注意書きを掲示することで対応を行い，不具合や体調不良の報告を受けていないが磁力の安全性については今後も議論する必要がある。

第 5 章

結 論

本論文では触覚ディスプレイが日常生活に浸透していることを述べ、触覚の提示対象が特定の個人から特定の場所にいる多人数へと変化していることを述べ、触覚ディスプレイは今後空中立体像と組み合わせて空中ユーザーインターフェースや街中での触覚付きデジタルサイネージなど不特定多数への提示へ変化するだろうと予想した。

空中立体像と組み合わせて不特定多数が利用できる触覚ディスプレイのデザイン要件を「不特定多数のユーザーがすぐに使用できること」、「装着の手間やコストが低いこと」、「触感クオリティが高いこと」と定義し、非接触触覚ディスプレイが適当であると判断した。しかし、既存の非接触触覚ディスプレイは空気を媒体とするため触感クオリティが低い。そこで本研究では磁力を媒体とし、永久磁石によってエネルギーを触覚に変換する触覚ディスプレイである Magnetouch を提案した。永久磁石を利用することでピックアップエレキバンなどと同じく、装着の手間やコストが低いため、全ての要件を満たせることがわかった。

また、Magnetouch の設計と実装を行い、要件を満たしていることを確認した。Magnetouch で振動を提示する場合、ローパスフィルタとピッチシフトを用いることで非触覚信号から擬似的に触覚振動を提示できることを示した。また、力覚提示に関しては長期間の提示と振動との同時の提示は不可能であるが、極低周波の正弦波を用いることで力覚を表現できることが示された。特性計測実験により、振動は 1Hz から 800Hz にかけて出力が可能であることと力覚として 13cN の力を提示できることを確認し、十分な触感クオリティを提示できた。

コンセプト検証のため Magnetouch を実際に空中立体像と組み合わせたコンテンツを作成し、KMD Forum 2019 で展示を行い有用性を確認した。その結果、不

特定多数の体験者が同時に触覚コンテンツを体験し、体験を共有しながら歓談している姿が見られ、展示者が不在の場合でも体験者のみで触覚体験が行えた。また、空中立体像ディスプレイが普及するまでの過渡期での触覚ディスプレイの利用法として、実在する物体を介して触覚提示を行えることを確認した。しかし、原理的に住空間に向けて強力な磁力を放出するため、電子機器や人体への影響が懸念されるため、今後も議論する必要がある。

これらから、Magnetouch は不特定多数が利用できる触覚ディスプレイであると判断した。これにより、SF 映画のように空中ユーザーインターフェースが日常生活で利用できる可能性が生まれ、テーマパークやパブリックビューイングなどの大人数に対して同時に体験を提供する必要がある大規模エンターテインメントコンテンツに対しても触覚を提示でき、新たな体験が提供できると考えられる (図 5.1)。



図 5.1 空間や携帯端末に Magnetouch が埋め込まれた未来

謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見と先見性のある的確な指導と心が折れかけた時にも暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太教授に心から感謝いたします。多忙なスケジュールの中、自分の研究の本来の価値がわからなくなった時やストーリーに思い悩んでいる時などにも深夜まで繰り返し指導を親身にしていただきました。心より感謝いたします。

入学のきっかけとなり、半年間 Network Media Project でお世話になり、そして、KMD での自分の進むべき道を考えるきっかけをいただき、研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授に心から感謝いたします。

全ての始まりである Rochester Institute of technology のロシャン・ペイリス訪問講師に心から感謝いたします。研究やコラボレーションプロジェクトでの熱心な指導や普段の雑談のなかでの助言などを多くいただきました。また、入学して右も左もわからず、英語での講義に訳も分からず飛び込んだ「どこでもインタラクション」で、Cleaning DJ を作成していなければ、Embodied Media Project の代田ケンイチロウさんとも出会わなかったことでしょう。そして、その出会いがなければ Liquid VR はこの世に存在することはなく、私が Embodied Media Project に移籍することもなかったことでしょう。

そして、始まりを語る上で代田ケンイチロウさんは外すことができません。先述のように代田ケンイチロウさんとの初めてのコラボレーションは Cleaning DJ でした。その際のファーストインプレッションは正直に言えば良いものではなく若干怯えていました。しかし、アイディエーションや製作を通じて代田さんの全く私と異なるベクトルの知識や感性を感じられたことはこれからの人生において

武器になると思います。この素晴らしい出会いは人、環境、タイミングすべてが化学反応を起こした結果生まれました。この出会いに深く感謝するとともに私の体調や精神面によって多大なるご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げます。

PINOSEは1年半もの期間を要したプロジェクトでありましたが、IVRCに始まり、Laval Virtual、SIGGRAPHと大躍進を遂げました。PINOSEに関わった代田ケンイチロウさんはじめ浅田七星さん、清水光二さん、青木悠さんに大変お世話になりました。特にSIGGRAPHに参加することは長年の夢に近く第一歩として忘れることのできない経験になりました。心から感謝申し上げます。

加藤大弥さん、中村開さんとはInternet of Haptics Projectをきっかけとして、ネットワークスタジオで作業と雑談と研究を行いました。研究の不明な点や開発での不明な点を訳がわからないまま伝えてもお二人からの的確な助言をいただきました。長期間の展示の対応など通常の大学院生活では経験しない経験を得られたことや、突発的なスケジュールなど刺激的な体験は私の行動原理を大きくステップアップさせるものとなりました。お二人とはこれまでも、そしてこれからもお世話になり続けます。よろしくお願ひします。

Embodied Media Projectに移籍し生活空間がネットワークスタジオからハッキングスタジオに移った中、下川和俊さん、鍋島純一さん、古川泰地さん、山本大介さんをはじめEmbodied Media Projectの皆さんとはお互いに意見を交わし切磋琢磨しあう存在でした。徹夜での作業や何気ない会話、旅行などもう味わうことのできない体験だと思えば愛おしく、寂しく感じます。これまでの思い出をいただけたことを感謝するとともに、これからもかけがえのない同期としてどうかお付き合いください。

研究や学生生活においてご助力いただいた児島絵美理さんをはじめEmbodied Media, Network Media, KMDのスタッフの皆様には感謝いたします。

最後に大学院への進学を許し、生活面で多くをサポートしていただいた両親に心より感謝いたします。皆様と過ごしたこの素晴らしいKMDでの2年間をどうもありがとうございます。

参 考 文 献

- [1] Takashi Maeno. ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. *Journal of the Robotics Society of Japan*, No. 6, pp. 772–775. doi:10.7210/jrsj.18.772.
- [2] 暲 暲. Tachi_Lab - 触原色. アクセス日: 2019-12-19. URL: <https://tachilab.org/jp/about/hpc.html>.
- [3] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007: Emerging Technologies, SIGGRAPH'07*, 2007. doi:10.1145/1278280.1278289.
- [4] Tadatoshi Kurogi, Yuji Yonehara, Roshan Lalintha Peiris, Takeshi Fujiwara, and Kouta Minamizawa. Haptic plaster: Soft, thin, light and flexible haptic display using dea composed of slide-ring material for daily life. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, SIGGRAPH '19*, pp. 15:1–15:2, New York, NY, USA, 2019. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3305367.3327983>, doi:10.1145/3305367.3327983.
- [5] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [6] Yoichi Ochiai, Kota Kumagai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki. Fairy lights in femtoseconds: Aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 2, pp.

- 17:1–17:14, February 2016. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2850414>, doi:10.1145/2850414.
- [7] Jess McIntosh, Paul Strohmeier, Jarrod Knibbe, Sebastian Boring, and Kasper Hornbæk. Magnetips: Combining fingertip tracking and haptic feedback for around-device interaction. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. Association for Computing Machinery, may 2019. doi:10.1145/3290605.3300638.
- [8] 梶本裕之. 触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ. PhD thesis, 博士論文, 2003.
- [9] 振幅変調 - National Instruments. <https://www.ni.com/ja-jp/innovations/white-papers/06/amplitude-modulation.html>. アクセス日: 2019-12-20.
- [10] 仲谷正史, 笈康明, 三原総一郎, 南澤孝太ほか. 触楽入門: はじめて世界に触れるときのよう. 朝日出版社, 2016.
- [11] Hirohiko Hayakawa, Youichi Kamiyama, Mengyi Xu, Masuhito Tanaka, Noriyuki Suzuki, and Kouta Mi. 触覚伝送を伴うバスケットボールのライブフィードバックの実践. 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 4–7, 2018.
- [12] Ismo Rakkolainen. How feasible are star wars mid-air displays. In *2007 11th International Conference Information Visualization (IV'07)*, pp. 935–942. IEEE, 2007.
- [13] 太田信夫, 行場次郎. シリーズ心理学と仕事1 感覚・知覚心理学. 北大路書房, 2018.
- [14] Makoto Sato. Virtual work space for 3-dimensional modeling. In *Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'91)*, pp. 103–110, Tokyo, July 1991.

- [15] Takaki Murakami, Tanner Person, Charith Lasantha Fernando, and Kouta Minamizawa. Altered touch: Miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters, SIGGRAPH 2017*. Association for Computing Machinery, Inc, 7 2017. doi:10.1145/3102163.3102225.
- [16] Keisuke Hoshino, Masahiro Koge, Taku Hachisu, Ryo Kodama, and Hiroyuki Kajimoto. Jorro beat: Shower tactile stimulation device in the bathroom. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1675–1680. ACM, 2015.
- [17] Kasun Karunanayaka, Sanath Siriwardana, Chamari Edirisinghe, Ryohei Nakatsu, and Ponnampalam Gopalakrishnakone. Magnetic field based near surface haptic and pointing interface. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 8007 LNCS, pp. 601–609, 2013. doi:10.1007/978-3-642-39330-3_65.
- [18] Malte Weiss, Chat Wacharamanatham, Simon Voelker, and Jan Borchers. Fingerflux: near-surface haptic feedback on tabletops. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 615–620. ACM, 2011.
- [19] 正史仲谷, 康明寛, 孝太南澤, 聡一郎三原, 障館. 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践. *Tvrsj*, Vol. 19, No. 4, pp. 593–603, 2014. doi:10.18974/tvrsj.19.4_593.
- [20] Youichi KAMIYAMA Hirohiko HAYAKAWA and Kouta MINAMIZAWA. 多人数の触感共有のための無線触感伝送キットの提案. 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 9–12, 2019.
- [21] Marie-Stephanie Iekura, Hirohiko Hayakawa, Keisuke Onoda, Yoichi Kamiyama, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Smash: synchroniza-

- tion media of athletes and spectator through haptic. In *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*, p. 20. ACM, 2015.
- [22] Olivier Bau and Ivan Poupyrev. Revel: Tactile feedback technology for augmented reality. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, pp. 89:1–89:11, July 2012. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2185520.2185585>, doi: 10.1145/2185520.2185585.
- [23] 暲 暲. バーチャルリアリティにおける触覚の役割. 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol. 122, No. 10, pp. 461–464, 2002.
- [24] 田村秀行, 稲見昌彦, 蔵田武志, 酒田信親, 磯光雄. アニメ『電脳コイル』にみるリアルとバーチャルの接点～複合現実感の未来実現形態を探る. 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 6–19, dec 2008.
- [25] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Kei Nakatsuma, and Hiroyuki Shinoda. Touchable holography. In *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies, SIGGRAPH '09*, p. 795. ACM, 2009. doi:10.1145/1597956.1597979.
- [26] A B Vallbo' and R S Johansson'. Human Neurobiol(1984) Human Neurobiol-ogy 0 Springer-Verlag 1984 Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. Technical report.
- [27] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. UltraHaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *UIST 2013 - Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 505–514, 2013. doi:10.1145/2501988.2502018.
- [28] 木村 英司 三浦 佳世 行場 次朗 石金 浩史 坂上 貴之, 日本基礎心理学会. 基礎心理学実験法ハンドブック. 朝倉書店, 2018.
- [29] Ismo Rakkolainen and Antti Sand. A movable immaterial volumetric display. In *SIGGRAPH Asia 2013 Posters, SA ' 13*, New York, NY, USA, 2013.

Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/2542302.2542305>, doi:10.1145/2542302.2542305.

- [30] David Ebert, Edward Bedwell, Stephen Maher, Laura Smoliar, and Elizabeth Downing. Realizing 3d visualization using crossed-beam volumetric displays. *Commun. ACM*, Vol. 42, No. 8, p. 100–107, August 1999. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/310930.310979>, doi:10.1145/310930.310979.

関 連 発 表

国内学会

1. 鵜重 誠, ロシャン・ペイリス, 南澤 孝太, “永久磁石の貼り付けによる振動触覚提示システムの検討”, 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会, 東京, 2019.9.