

|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 触原色原理に基づくウェアラブル触覚提示デバイスの開発  |
| Sub Title        | Wearable haptic display based on the theory of haptic primary color   |
| Author           | 村上, 嵩樹(Murakami, Takaki)<br>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 | 2018  |
| Jtitle           |   |
| JaLC DOI         |   |
| Abstract         |   |
| Notes            | 修士学位論文. 2018年度メディアデザイン学 第634号   |
| Genre            | Thesis or Dissertation  |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002018-0634">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002018-0634</a> |

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 2018年度（平成30年度）

触原色原理に基づくウェアラブル  
触覚提示デバイスの開発

慶應義塾大学大学院  
メディアデザイン研究科

村上 嵩樹

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。

村上 嵩樹

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

チャリス フェルナンド 特任講師 (副査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

修士論文 2018年度（平成30年度）

## 触原色原理に基づくウェアラブル 触覚提示デバイスの開発

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

### 論文要旨

ハプティクス技術が色々な製品に組み込まれ一般的な機能となりつつある。また、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着したバーチャル・リアリティ（VR）技術もコンシューマゲームに浸透するまで一般的なものになってきた。それにともない、視覚や聴覚だけでなく触覚のVRへの関心や社会的ニーズが増してきている。そこで、本研究では、より多彩な触覚提示を行なうために、複数の触覚要素を使用して触覚を表現する、触原色原理に基づくウェアラブル内蔵触覚提示デバイスを開発した。加えて、本デバイスを活用してハプティクスの拡張現実感を体験するアプリケーションを実装し、デモンストレーションを実施することで本システムの有用性を示した。

キーワード：

触覚，触原色，触覚ディスプレイ，拡張現実，身体性メディア

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

村上 嵩樹

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2018

Wearable Haptic Display Based on the Theory of Haptic  
Primary Color

Category: Science / Engineering

Summary

Haptic technology has come to be recognized as a general function of various products. By having spreaded new kinds of consumer game installed with the head mounted display (HMD), Virtual Reality (VR) also came to be popular. Along with that, social needs, which we reproduce not only the sense of vision and audio but also tactile, are increasing. In this thisis, I developed wearable haptic display based on the theory of haptic primary colors, which provide multiple haptic elemnts in order to create various embodied experience in Virtual Space. I also created an application using this device and demonstrated the effectiveness of this system by carrying out demonstration.

Keywords:

Haptics, Haptic Primary Colors, Haptic Display, Augmented Reality, Embodied Media

Keio University Graduate School of Media Design

Takaki Murakami

# 目 次

|              |                                  |           |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>序論</b>                        | <b>1</b>  |
| 1.1.         | ハプティクスの現状 . . . . .              | 1         |
| 1.2.         | 本研究の目的 . . . . .                 | 4         |
| 1.3.         | 本論文の構成 . . . . .                 | 5         |
| <b>第 2 章</b> | <b>関連研究</b>                      | <b>6</b>  |
| 2.1.         | 人の触知覚メカニズム . . . . .             | 6         |
| 2.1.1        | 感覚受容器 . . . . .                  | 6         |
| 2.2.         | 触覚提示デバイス . . . . .               | 7         |
| 2.2.1        | 接地型触覚提示デバイス . . . . .            | 7         |
| 2.2.2        | 非接地型触覚提示デバイス . . . . .           | 8         |
| 2.2.3        | 触覚の伝送 . . . . .                  | 9         |
| 2.3.         | 触原色原理 . . . . .                  | 11        |
| 2.3.1        | 触原色に基づく触覚センサ/ディスプレイ . . . . .    | 13        |
| <b>第 3 章</b> | <b>触覚提示デバイスの提案と実装</b>            | <b>16</b> |
| 3.1.         | 触体験の分類 . . . . .                 | 16        |
| 3.2.         | 要件定義 . . . . .                   | 17        |
| 3.3.         | 触覚提示デバイスの設計 . . . . .            | 19        |
| 3.3.1        | 触原色（圧力・振動・温度）に基づく触覚の提示 . . . . . | 19        |
| 3.3.2        | ケーブル1本での接続 . . . . .             | 21        |
| 3.3.3        | 制御ソフトウェアの設計 . . . . .            | 23        |
| 3.3.4        | 安価なジェスチャー入力機器への対応 . . . . .      | 23        |
| 3.3.5        | 様々な指のサイズへの対応 . . . . .           | 24        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4. 触覚提示デバイスの実装 . . . . .                  | 26        |
| 3.4.1 使用部品の選定 . . . . .                     | 26        |
| 3.4.2 基板の実装 . . . . .                       | 26        |
| 3.4.3 制御ソフトウェアの実装 . . . . .                 | 26        |
| 3.4.4 外装の実装 . . . . .                       | 29        |
| <b>第4章 アプリケーションの実装・展示と展開</b>                | <b>32</b> |
| 4.1. アプリケーションの設計 . . . . .                  | 32        |
| 4.2. アプリケーションの実装 . . . . .                  | 32        |
| 4.2.1 Virtual Haptics アプリケーション . . . . .    | 32        |
| 4.2.2 Augmented Haptics アプリケーション . . . . .  | 33        |
| 4.3. Altered Touch . . . . .                | 35        |
| 4.4. デモンストレーション . . . . .                   | 35        |
| 4.4.1 フィールドテスト . . . . .                    | 36        |
| 4.4.2 体験フロー . . . . .                       | 36        |
| 4.4.3 体験のフィードバック . . . . .                  | 38        |
| 4.5. 考察 . . . . .                           | 39        |
| 4.6. 実製品への展開 . . . . .                      | 39        |
| 4.6.1 Telexistence.inc . . . . .            | 40        |
| 4.6.2 Telexistence.inc 向け触覚提示デバイス . . . . . | 40        |
| <b>第5章 結論</b>                               | <b>43</b> |
| <b>謝辞</b>                                   | <b>45</b> |
| <b>参考文献</b>                                 | <b>47</b> |

# 目 次

|      |                                     |    |
|------|-------------------------------------|----|
| 1.1  | N904 [1]                            | 3  |
| 1.2  | GameCube ゲームコントローラー [2]             | 3  |
| 1.3  | TapticEngine [4]                    | 3  |
| 1.4  | Joy-Con [3]                         | 3  |
| 1.5  | OculusRift CV1 [6]                  | 4  |
| 1.6  | PlayStation VR [7]                  | 4  |
| 2.1  | 無毛部皮膚断面と触覚受容器 [9] から抜粋              | 7  |
| 2.2  | Geomagic Touch [10]                 | 8  |
| 2.3  | SmartTool [11] から抜粋                 | 8  |
| 2.4  | GracityGrabber [12]                 | 9  |
| 2.5  | TECHTILE toolkit [13]               | 9  |
| 2.6  | HapticBroadcast [14]                | 10 |
| 2.7  | CLAW [15]                           | 10 |
| 2.8  | CyberGrasp [16]                     | 10 |
| 2.9  | TELESAR V [18]                      | 11 |
| 2.10 | HaptI/O [19]                        | 11 |
| 2.11 | 視覚における原色原理 [21] から抜粋                | 12 |
| 2.12 | 触覚における原色原理 [21] から抜粋                | 12 |
| 2.13 | 物理空間, 生理空間, 心理空間における触原色原理 [21] から抜粋 | 13 |
| 2.14 | 64 電極マウス [22] から抜粋                  | 14 |
| 2.15 | CLAW 構成図 [15] から抜粋                  | 14 |
| 2.16 | Submerged haptics [23] から抜粋         | 15 |

|      |                                   |    |
|------|-----------------------------------|----|
| 2.17 | 5節リンク機構を用いたデバイス [24] から抜粋         | 15 |
| 2.18 | ThermoVR [25] から抜粋                | 15 |
| 3.1  | 従来の提示デバイスのブロック図                   | 18 |
| 3.2  | 提案する提示デバイスのブロック図                  | 18 |
| 3.3  | シミュレーションでのモーター制御・振動混合回路図          | 20 |
| 3.4  | シミュレーション結果波形                      | 20 |
| 3.5  | TELESAR V の触覚提示で使われている制御機器        | 21 |
| 3.6  | TELESAR V 触覚のブロック図                | 22 |
| 3.7  | ケーブル1本での接続可能なウェアラブル触覚提示デバイスのブロック図 | 22 |
| 3.8  | 制御ソフトウェアのブロック図                    | 23 |
| 3.9  | 5DT Data Glove14 Ultra            | 24 |
| 3.10 | LeapMotion                        | 24 |
| 3.11 | LeapMotion を使用した使用感テストの様子         | 25 |
| 3.12 | 第1指爪中央指幅サイズ [26] から抜粋             | 25 |
| 3.13 | 第2指爪中央指幅 [26] サイズ抜粋               | 25 |
| 3.14 | 設計したウェアラブル触覚提示デバイス                | 26 |
| 3.15 | 圧力増幅・振動混合・温度計測部回路図                | 27 |
| 3.16 | 命令処理装置部回路図                        | 28 |
| 3.17 | 実装した基板(表側)                        | 28 |
| 3.18 | 実装した基板(裏側)                        | 28 |
| 3.19 | ウェアラブル触覚提示デバイスの制御ソフト画面            | 29 |
| 3.20 | 新しく設計したパーツ                        | 30 |
| 3.21 | 指サイズ対応機構(上側)                      | 30 |
| 3.22 | 指サイズ対応機構(前側)                      | 30 |
| 3.23 | 実装したウェアラブル触覚提示デバイス                | 31 |
| 3.24 | 指に装着したウェアラブル触覚提示デバイス              | 31 |
| 4.1  | VirtualHaptics アプリケーション           | 33 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.2  | Augmented Haptics のための, HoloLens [27], ウェアラブル触覚提示デバイス, アクリルボックス . . . . . | 34 |
| 4.3  | Augmented Haptics 体験手順 1 . . . . .  | 34 |
| 4.4  | Augmented Haptics 体験手順 2 . . . . .  | 34 |
| 4.5  | Augmented Haptics 体験手順 3 . . . . .  | 35 |
| 4.6  | Augmented Haptics 体験手順 4 . . . . .  | 35 |
| 4.7  | Altered Touch 体験手順 1 . . . . .  | 37 |
| 4.8  | Altered Touch 体験手順 2 . . . . .  | 37 |
| 4.9  | Altered Touch 体験手順 3 . . . . .  | 37 |
| 4.10 | Altered Touch 体験手順 4 . . . . .  | 37 |
| 4.11 | Altered Touch 体験手順 5 . . . . .  | 38 |
| 4.12 | Altered Touch 体験手順 6 . . . . .  | 38 |
| 4.13 | デモンストレーションの様子 . . . . .   | 39 |
| 4.14 | デモンストレーションの様子 . . . . .   | 39 |
| 4.15 | Telexistence.inc モデル H . . . . .  | 41 |
| 4.16 | ロボットハンド指先部 . . . . .  | 41 |
| 4.17 | 指先触覚提示デバイス . . . . .  | 41 |
| 4.18 | 「MODEL H」発表会触覚体験デモ . . . . .  | 42 |
| 4.19 | 体験デモでロボットが把持している様子 [30] から引用 . . . . .                                    | 42 |

# 表 目 次

|     |                             |    |
|-----|-----------------------------|----|
| 3.1 | ウェアラブル触覚提示デバイスの部品 . . . . . | 27 |
|-----|-----------------------------|----|

# 第1章 序

# 論

## 1.1. ハプティクスの現状

本研究をおこなう上で、最初に触れたハプティクスの機能がついている製品はなんだろう？と自分の中で記憶を辿ってみると、携帯電話 N904(図 1.1) に付いていた振動機能や家庭用ゲームコントローラー(図 1.2) に振動機能であった [1] [2]. ハプティクスとは、利用者に力，動き，振動などを与えることで皮膚感覚フィードバックを得るテクノロジーである．近年様々な製品に，ハプティクスが取り入れられてますます利用の幅が広がってきている．

前述の2つの振動提示ハプティクスは同じようなハプティクスをユーザーに提供していたが目的が異なっていた．前者は，音が出せない場所でユーザーに着信を振動で伝える方法のひとつとしてハプティクスが用いられていた．通常，携帯電話はユーザーに音で通知するが，音が出せない場合，LEDの点滅などの視覚による通知ではユーザが通知を見落とす恐れがある．しかし，服のポケットなどにしまった場合通知を受け取ることが出来ない．そこで，聴覚や視覚以外の通知方法としてのハプティクスが内蔵されていた．後者のゲームコントローラーのハプティクスは，ゲームの臨場感を生み出すために内蔵されていた．このコントローラーのグリップ内部に半円柱状に重りが回転軸に固定されたモーターが組み込まれており．このモーターを駆動させることでコントローラーを振動させる．当時は，振動の ON，OFF しか制御出来ない物が大多数だったが，単純な振動の ON，OFF 以外の振動の表現が可能な製品も登場した．

この一例として Nintendo 社から発売されている Switch のゲームコントローラーが挙げられる(図 1.4)．このゲームコントローラーの主な仕様としては，スティック

ボタンや bluetooth, 加速度センサーや, ジャイロセンサーが内蔵されている [3]. ハプティックとして, 振動機能が内蔵されている. Nintendo 社は, バリエーションが豊かな振動表現が可能な振動機能を「HD 振動」と呼んでいる.

図 1.3 に示す Apple の MacBook のトラックパッドにも多彩な振動表現がかのうである [4]. Apple 社ではこのような圧力を感知できるトラックパッドを「感圧トラックパッド」と呼び, 加える圧力にわずかに差をつけることで, 多彩な操作を可能にし, より高機能なインターフェースを実現した. また, ハプティックとして内蔵された「TapticEngine」を使用することで, 触覚的な反応を感圧トラックパッドがユーザーに返すため, ユーザーがより容易にクリックの強さを調整することができる.

今まではのボタンスイッチは, スイッチを押し込んだ時の「ポチッ」や「カチッ」, 「グニュ」という, 物理ボタンによるハプティクスが存在していたが, タッチパネルによる操作が主流になった現在は, その構造上, 押し込む感覚や押し心地が感じられなくなってしまっている. そこでより感覚的な反応を表現するためにハプティクスが内蔵され, 押し込む感覚がなくてもハプティクスによって, 押し心地などが表現できるようになってきた.

以上のように, 近年様々な製品にハプティクスが搭載され一般ユーザーの利便性を向上されている.

また, 2016 年はバーチャルリアリティ元年とも呼ばれ, 様々なバーチャルリアリティに関連する製品が市場で見られた. 主に PC ゲーム用途向けのバーチャルリアリティ向けヘッドマウントディスプレイとして, HTC と Valve Corporation により共同開発された HTC Vive は 2016 年 4 月 5 日に発売され, Oculus VR の Rift は一般向け製品 1.5 が 2016 年 3 月に発売された [5] [6].

HMD は, PC ゲーム用途だけでなく, コンシューマゲーム機向けのバーチャルリアリティシステムも発売された. 図 1.6 に示すのは, ソニー・インタラクティブエンタテインメントが用意している PlayStation 4 (PS4) 用バーチャルリアリティ (VR) システムで 2016 年 10 月 13 日に販売された [7].

体験者がヘッドマウントディスプレイを装着することで, あたかもその場にいるような視覚情報を受け取ることが出来る. また, 複数のスピーカーを使用する



図 1.1: N904 [1]



図 1.2: GameCube ゲームコントローラー [2]



図 1.3: TapticEngine [4]



図 1.4: Joy-Con [3]



図 1.5: OculusRift CV1 [6]



図 1.6: PlayStation VR [7]

サラウンド方式などが映画鑑賞などでは一般的になった昨今では、これとバーチャルリアリティを組み合わせ、バーチャル空間内での音源と体験者の位置や、向き、動きなどを基に計算することで立体音響レンダリングを実現している。

バーチャルリアリティが手軽に体験できるようになり、バーチャルリアリティを体験できるゲームやアミューズメントが一般化する中で、ハプティクスの重要性が増してきている [8]。バーチャル空間内で体験者に、より没入感の高い体験を提供するために「バーチャル空間内の物に触れることができる」やインタラクションが重要になってくる。

## 1.2. 本研究の目的

前述のように、バーチャルリアリティでのハプティクスの需要が高まってきている。より没入感の高い体験を提供するには、振動触覚だけでなく温感や圧感の触覚の同時提示や、目的に合わせたハプティックを提示する身体部位や種類の選択が必要になっていく。そこで、本研究では、従来の振動触覚だけではなく、複数のモダリティを組み合わせた触覚の同時提示を目的とした、ウェアラブル触覚提示デバイスの提案をする。

そこで、本論文では、複数種類の触覚を提示出来る触覚提示デバイスの設計を目的とし、実際に目的を定め詳細設計、実装をおこない有効性を示す。

### 1.3. 本論文の構成

第1章では、最近のハプティクスの背景について紹介した。そして今後のコンテンツと触覚の関係性を述べ、本研究の目的を定めた。第2章では関連研究として、技術について述べ、本論文の立ち位置や貢献を示す。第3章では、本論文で提案するコンセプトやシステムの設計要件について述べる。続いて第4章では提案手法に基づき実際に実装を行い、提案するコンセプトに基づくシステムの有効性を検証した。最後に、本研究における考察を示し、本論文の結論を示す。

## 第2章

# 関連研究

本章では、本研究に関連する研究を取り上げる。関連研究について、大きく分けて人の触知覚メカニズム、触覚提示デバイス、触原色原理の3分野を取り上げる。

### 2.1. 人の触知覚メカニズム

#### 2.1.1 感覚受容器

図 2.1 に示すように、皮下には多数の触覚受容器が表皮と真皮の境から皮下組織に存在していて、無毛皮膚部には、形、大きさ、配置の異なる複数種の触覚受容器が埋め込まれている [9]。感覚受容器は皮膚の下に、大きく分けて4つの感覚受容器があり特性が異なっている。

- マイスナー小体は真皮乳頭内に存在する楕円球状の受容器。指紋直下に2列で並んでいる。
- メルケル小体はメルケル細胞と軸索終末（メルケル盤）の複合体。真皮基底層の最深部に数個ずつ固まって存在している。
- パチニ小体は皮下組織内や真皮深層に存在する卵形受容器。
- ルフィニ小体は、真皮のやや深部に存在する受容器。横方向に引っ張るとインパルスを発射する。

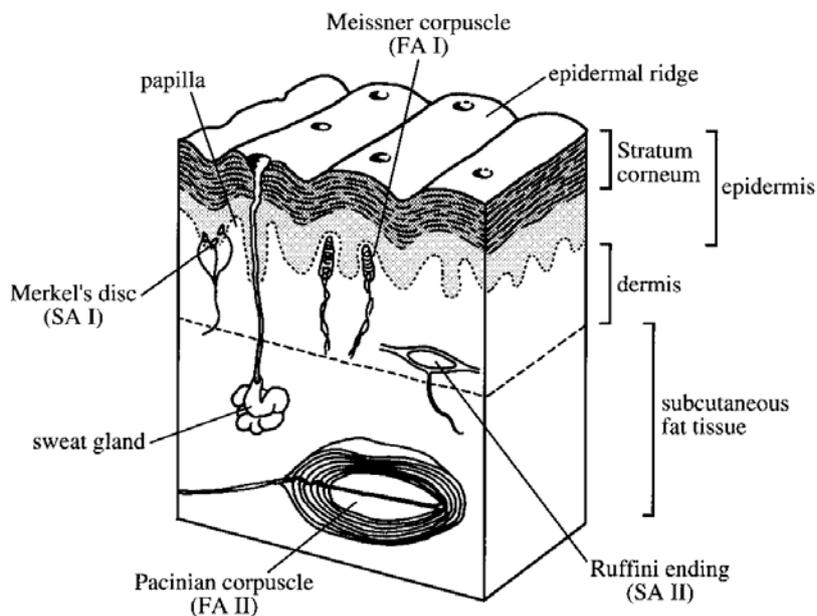


図 2.1: 無毛部皮膚断面と触覚受容器 [9] から抜粋

## 2.2. 触覚提示デバイス

触覚提示デバイスは接地型触覚提示デバイスと非接地型触覚提示デバイスの2種類に分類され、それぞれについて以下に述べる。

### 2.2.1 接地型触覚提示デバイス

接地型触覚提示デバイスは、提示デバイスの片側が接地している。そのため、接地部を支点にして反力を提示することが出来る。

Geomagic Touch [10] は、3D SYSTEMが発売している Haptic デバイスである。体験者はペンを握るようにデバイスを保持する。モーターによってユーザーの手にフォースフィードバックを加えることで、疑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 Geomagic Touch を使うことで、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。

SmartTool [11] は、並進3自由度、回転3自由度の計6自由度を持っており、並

進3自由度の力が出力可能な装置になっている。体験者は SmartTool のツール部を直接保持し、物体に対し、所定の操作をおこなう、センタ端部では変化する状態をセンサで取得したデータに応じて触覚を重畳付加することで触覚の AR を提示している。



図 2.2: Geomagic Touch [10]

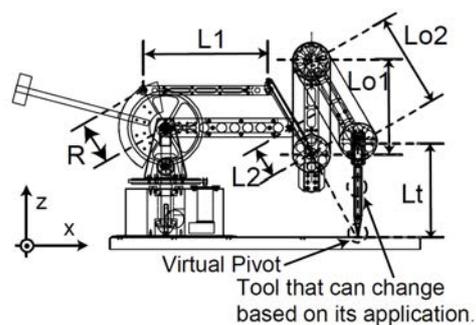


図 2.3: SmartTool [11] から抜粋

### 2.2.2 非接地型触覚提示デバイス

非接地型触覚提示デバイスは、接地型触覚提示デバイスと異なり、デバイスが接地されておらず、ゲームコントローラーの様に持つことが可能なため、デバイスの小型化が容易である。

図 2.4 に示す、Gravitygrabber では南澤らは、指先の背中側にモーターを 2 つ装着し、指腹を返してベルトと回転軸を接続した [12]。モーターを巻き取ることで、ベルトが指腹側に押しつけられ体験者は指先に圧力を感じることが出来る。また、2 つのモーターの動きを変えることで指腹から爪側への垂直圧力だけでなく、せん断応力を提示することを可能にしている。

図 2.5 に示すのは、南澤らが発表した TECHTILE toolkit [13] である。TECHTILE toolkit は、コンタクトマイクフォンとアンプ、振動子で構成されている。テクスチャーをコンタクトマイクフォンで音声信号で取得することで、既存の装置で記録や、再生することを簡便にしている。

また、水品らは、スポーツの観戦を、従来の映像と音声による受動的な「視聴」から能動的な「体験の共有」へと拡張することを目的としたシステムを提案した [14]。ラケット型触覚デバイスを使うことで、体験者にバトミントンの体験を伝えるシステムになっている。

Inrak らは、ゲームコントローラーの手に手で握られる触覚提示デバイス CLAW [15] を提案した。CLAW は人差指を動かして、3つのインタラクションが可能なように設計されていて、バーチャルオブジェクトの把持、バーチャルテクスチャーの提示、およびトリガーができる。

手の甲に装着するような形の CyberGrasp [16] は、小指以外の全ての指にワイヤーがつながっていて、仮想空間上で物体を掴んだり、触れた際ワイヤーが指を引っ張る事で反力を発生させて力覚を提示するタイプの触覚提示デバイスである。非接地型で、作用点が指先、支点が手首になっていて、装着したデバイスだけで力覚が提示出来るようになっている。



図 2.4: GracityGrabber [12]



図 2.5: TECHTILE toolkit [13]

### 2.2.3 触覚の伝送

触覚伝送の関連研究にテレイグジスタンスが挙げられる。テレイグジスタンスとは、バーチャルリアリティの一分野であり、舘が1980年にはじめて提唱した。自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し、その場所で自由に行動



図 2.6: HapticBroadcast [14]



図 2.7: CLAW [15]



図 2.8: CyberGrasp [16]

するという、存在拡張の概念である [17]. このテレイグジスタンスはバーチャルリアリティとロボティクスが融合した技術である. Telexistence は Tele と Existence の組み合わせである. 図 2.9 に示す, TELESAR V [18] での触覚提示デバイスは, マスタースレーブで動作している. スレーブ側のロボットハンドの指先にあるセンサで, 圧力, 温度, コンタクトマイクロフォンを取得し, マスター側にいる体験者の指先に出力する. この触覚提示デバイスは Gravitygrabber のベルトによる圧力提示に加え, ペルチェ素子と振動子を用いて, 温冷感とテクスチャー体験者に呈示して, 体験者がロボット越しに持った物の温冷感やテクスチャ感を感じることが出来る.

松園らは, 振動触覚情報を伝送するプラットウォームまた, 身体や有体物の振動触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード HaptI/O を開発した [19]. ネットワークを通じて複数の HaptI/O がサーバーに接続され, 1つのノードから複数のノードまた, 1対1の相互接続することが出来る.

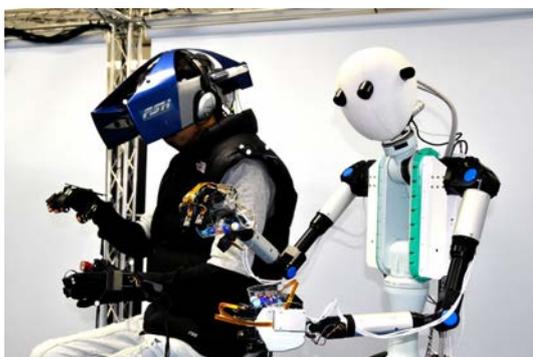


図 2.9: TELESAR V [18]



図 2.10: HaptI/O [19]

## 2.3. 触原色原理

触原色原理とは視覚の三原色が眼球の錐体細胞の特性に基づいているのと同じように, 触覚の生理学的知見に基づいて, 皮膚感覚を再現するような技術概念で

ある [20] [21].

人間の視覚は、電磁波のうち光と呼ばれる 0.40-0.76 マイクロメートルという領域を検出する。自然の色には、様々な波長の光が混じっているが、これを、全ての波長域を記録し伝送して提示する方法は現実的ではない。視覚情報の記録・伝送・提示を可能にしているのは、人間の錐体細胞の特性を利用した三原色原理に基づいている。赤・緑・青 (RGB) を担うそれぞれの錐体細胞に、同じように光を提示すれば、同じ色に見えてしまう。物体の色は実際のスペクトルと異なっているが、人間の RGB を担う受容器が同じように光の強さを感じたとき同じ色に見える。これにより、テレビやカラー写真、液晶ディスプレイがフルカラーを可能にしている (図 2.11).

皮膚感覚でも同じように、受容器がその物体を触ったときと同じように反応すれば、同じ触感を感じることが出来るのではないかと考えられている原理である (図 2.12).

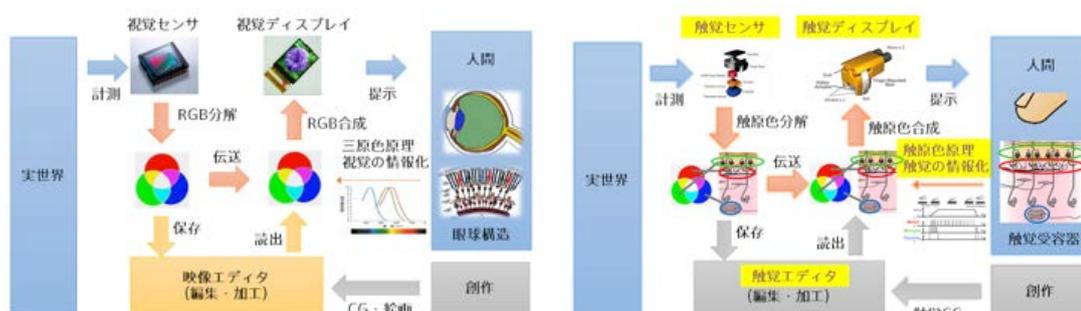


図 2.11: 視覚における原色原理 [21] から抜粋

図 2.12: 触覚における原色原理 [21] から抜粋

人間の感覚は、特殊感覚と体性感覚に分けられる。特殊感覚は視力であれば眼球、聴覚であれば耳のように対応した特別な感覚器が存在する感覚のことである。体性感覚とは、体文節性の感覚という意味で、大きく分けると皮膚に由来する皮膚感覚と筋や腱に由来する姿勢や運動感覚の固有受容感覚に分けられる。この皮膚感覚と固有受容感覚の体性感覚全体が、触覚と呼ばれている [21].

皮膚感覚とは「テクスチャー」と呼ばれる表面の細かい形状パターンを認識するものである。触れた実物体には、凸凹形状、摩擦、熱、弾性といった物理特性

がある。これら、すべて再現する必要があるれば、実物を持ってこなくてはならないが、皮膚感覚が生じる状況の場合、物体に触ると皮膚表面に、力と振動と温度変化が生じる。これら物理現象とそれを受け取る受容器、そこから感じられる触感の対応を示したのが図 2.18 である。

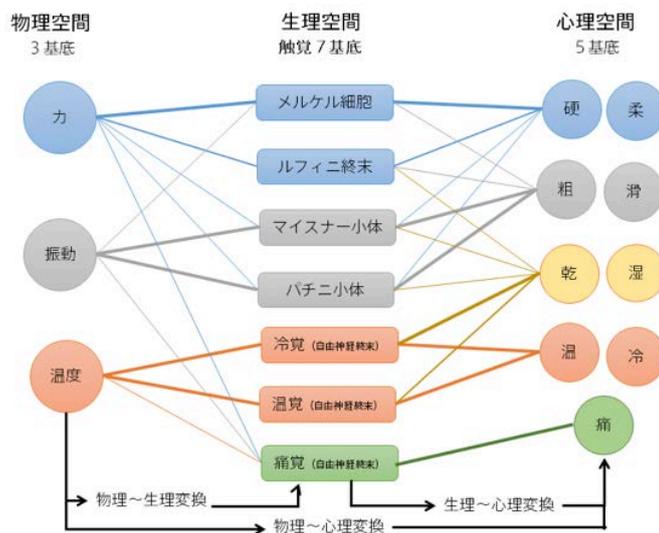


図 2.13: 物理空間，生理空間，心理空間における触原色原理 [21] から抜粋

### 2.3.1 触原色に基づく触覚センサ/ディスプレイ

また、この触原色原理に基づく関連研究を挙げる、梶本らは、触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイと題し、電気刺激による触原色生成を試みている [22]. 触れた際に生じる皮膚感覚の物理現象を受け取る受容野から発火される電気刺激に対応する電気刺激を提示することで、皮膚感覚の物理現象を触原色の生成している。

また前述した、CLAW も、力覚や、振動だけの触覚提示だけでなく、人差指の力覚だけでなく、人差指指腹部の振動を提示することで、より、複雑な触覚を提示することが出来る [15].

Feng らの Submerged haptics は、電子部品を一切使用しない水中で使用可能な触感デバイスである。1つのデバイスに4つのマイクロエアバッグが付いてお

り，スピーカーの動作でエアバッグ内の空気を制御することで，三軸方向の触覚情報を指先に圧力やテクスチャーなどの触覚フィードバックとして提示することが出来る [23].

森山らは，ウェアラブル触覚提示デバイスの着脱の手間や指の動きを妨げてしまうといった問題点から，指先で知覚する物理的な触覚を力の向きも含めて5節リンク機構を用いたデバイスにより，人差し指で物体に触れた時の圧力感覚と横ずれの感覚を手首や前腕に提示する触覚提示手法を提案し，人差し指に加わる水平，垂直方向の力を提示するデバイスを作成した．また，ペルチェ素子をデバイスに組み込むことで温度感覚も同様に前腕に提示することを可能としている [24].

Peiris らの ThermoReality は，ビジュアルコンテンツへの没入感を向上させることを目的に5つの熱（温冷）フィードバックモジュールを統合したヘッドマウントディスプレイである．バーチャルリアリティ空間内に表示されたビジュアルコンテンツに合わせて熱感覚フィードバックを顔部に直接提示することができる [25].



図 2.14: 64 電極マウス [22] から抜粋

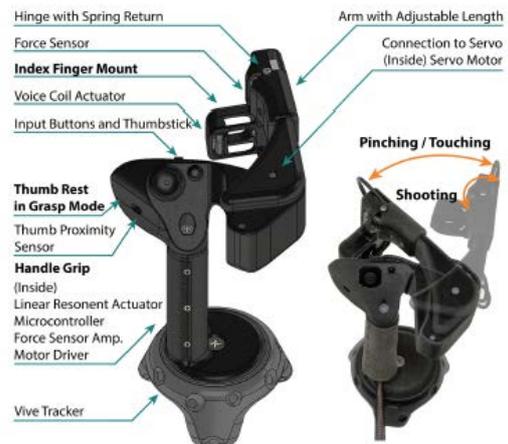


図 2.15: CLAW 構成図 [15] から抜粋



図 2.16: Submerged haptics [23] から抜粋

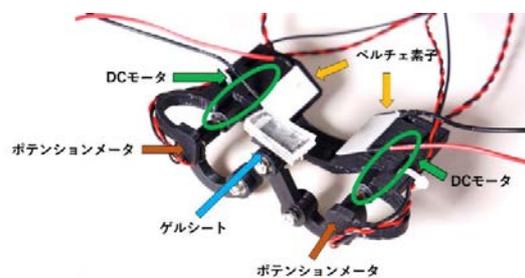


図 2.17: 5 節リンク機構を用いたデバイス [24] から抜粋



図 2.18: ThermoVR [25] から抜粋

## 第3章

# 触覚提示デバイスの提案と実装

### 3.1. 触体験の分類

触覚提示デバイスを提案するにあたって、モノに触れる体験，すなわち，触体験を4つに分類した。

1. 直接モノに触る触体験
2. Virtual Haptics
3. Augmented Haptics
4. Tele Haptics

1つ目の直接触る体験に対比して，触覚提示デバイスを使ってモノに触れる体験を Virtual Haptic, Augmented Haptics, Tele Haptics に分類した．まず1つ目の Virtual Haptics は，触覚提示デバイスを使って，VR空間内のオブジェクトに触る体験である．この触体験は，実際にモノは存在しないのに，触覚提示デバイスを用いることで，そこにモノがあるかのような触体験を経験することができる．

次の Augmented Haptics は，触覚提示デバイスを用いて，実際にあるモノに触る体験をする．しかし，そこで感じるハプティクスは，直接触るハプティクスではなく，拡張されたハプティクスを感じる事が出来る触体験である．関連研究で挙げた触覚提示デバイスの Gravitygrabber は，デバイスを装着して，親指と人差指で何も入っていないアクリルボックスを把持して，左右にふると，あたかもボックスのなかにモノが入っているかのような Augmented Haptics を感じられる．

最後の Tele Haptics は、触覚提示デバイスと対応した、触覚センサが接続されている。ハプティクスは触覚センサから、遠隔地へ伝送される。伝えられたハプティクスを触覚提示デバイスを通してモノに触れる体験する。遠隔ロボット操作など、触覚情報が付加されることによって操作性の向上などが挙げられる。

## 3.2. 要件定義

Virtual Haptics, Augmented Haptics, Tele Haptics に対応する触覚提示デバイスの要件定義を設定する。関連研究で挙げたように、触覚提示デバイスには大きく分けて、接地型と非接地型の触覚提示デバイスがある。接地型の触覚提示デバイスの場合、力覚提示はクオリティの高いハプティクスを提示できるが、デバイスが大掛かりでウェアラブルでは無くなってしまふ。また、接地型の場合、デバイスが卓上などに設置されるので、ハプティクスを提示出来る範囲が制限されてしまふ。Virtual Haptics, Augmented Haptics, Tele Haptics に対応する際、デバイスを動かせる範囲が制限されてしまふのは難しいと考えた。そこで非接地型の触覚提示デバイスを設計した。

実用製品のハプティクス機能が、単純な振動の ON, OFF から、複雑な振動表現に変わってきた。今後、VR や AR が一般的なものになっていくなかで触覚のニーズは高まっていく。そのなかで、振動だけで表現できるハプティクスには限界がある。冷たいものや温かいものを触ったことを感じるには振動だけでは感じることができない、そこで振動以外のハプティクスが豊かなハプティクスの表現のため触原色に基づく触覚提示を要件定義としてあげた。

関連研究であげた触覚提示デバイスでは、圧力・振動・温度提示が各々のシステムで構成されている (図 3.1)。また、関連研究の TELESAR V の触覚提示デバイスでは、圧力、振動、温度を提示するために、触覚提示デバイスと制御機器間が接続ケーブルで接続されている [18]。しかし、圧力・振動・温度提示でシステムが別々になっているため、複数の接続ケーブルが必要になっている。触覚提示デバイスを装着して作業をする時に、接続ケーブルが複数あると、作業範囲や動き方が制限されてしまふ。そこで、実用化や装着感の向上のために、触覚提示デ

デバイスとの接続は無線，またはケーブル1本程度で接続できることを要件定義として挙げた．図3.2のような構成にすることで，接続ケーブルを少なくすることができると考えた．

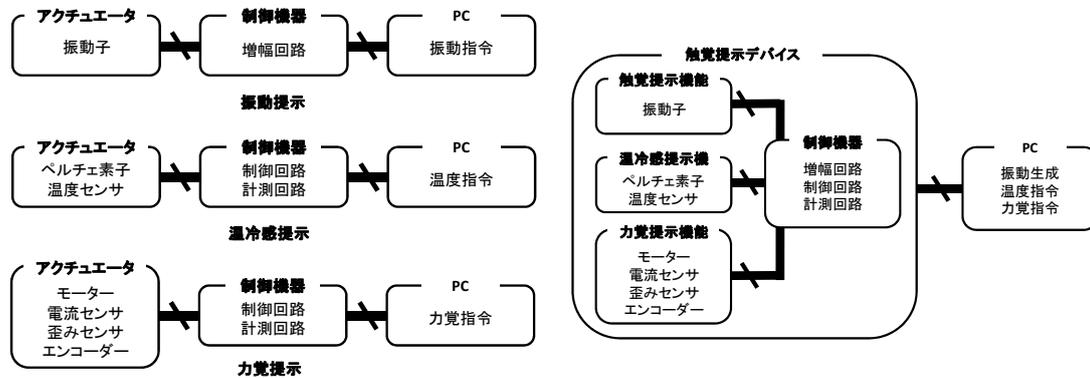


図 3.1: 従来の提示デバイスのブロック図

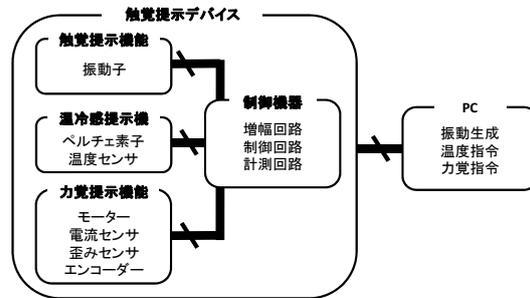


図 3.2: 提案する提示デバイスのブロック図

関連研究の TELESAR V では，手の動きをデータグローブで取得しているが，データグローブは研究用途色が強く，値段も安くはない??．触覚提示デバイスが一般普及を念頭におくと，手の動きをデータグローブだけで取得する事は難しいと考えられ，データグローブ以外のジェスチャー入力への対応を挙げた．

実用化に向けて触覚提示デバイスはさまざまな手のサイズに対応する必要がある．サイズ感が合っていないと，提示されるハプティクスのカオリティの低かや，作業効率，も変わってきてしまうのでさまざまな指のサイズへの対応の必要性を要件定義とした．

1. 触原色（圧力・振動・温度）に基づく触覚の提示
2. 無線またはケーブル1本で接続できるウェアラブルデバイス
3. 安価なジェスチャー入力機器への対応
4. ユニバーサルサイズへの対応

以上の，4つについてを要件定義として設定した．

### 3.3. 触覚提示デバイスの設計

要件定義を満たす、触覚提示デバイスにするために、要件定義で挙げた項について設計をおこなった。

#### 3.3.1 触原色（圧力・振動・温度）に基づく触覚の提示

関連研究で挙げたとおり、ハプティクスを提示するアクチュエータには複数の種類や方法がある。今回設計するウェアラブル触覚提示デバイスでは、触原色でハプティクスを提示する必要がある。関連研究では1つ以上のアクチュエータを使用して、ハプティクスを提示しているが触原色原理では圧力、振動、温度の3種類を最低限出力する必要がある。圧力、振動、温度の3種類を出すことができるアクチュエータを挙げる。

1. 圧力：モーター，エアー，スピーカー
2. 振動：振動子，振動モーター，スピーカー
3. 温度：ペルチェ素子，ヒーター

今回設計するウェアラブル触覚提示デバイスでは、これらの中からアクチュエータを選択して、圧力・振動・温度を提示する。エアーなどのアクチュエータは、制御するための装置が複雑で、大掛かりになってしまうので、ウェアラブルにすることが難しい。そこで、圧力についてはモーターとベルトを選択した。2つのモーターとベルトを用いることで、指先腹部から爪側方向への圧力にくわえ、せん断方向の皮膚変形も提示することができる。

振動は、振動子などを用いて提示していることが多い。TECHTILE toolkitでも、接触マイクをつかって振動を取得し、振動子を使用して振動を提示している。しかし、今回設計するウェアラブル触覚提示デバイスは指先に装着するためできるだけ小さくしなければいけないという制約条件がある。そこで、振動子をモーターで兼用できないか検討し、回路シミュレーションで試作をおこなった(図3.3)。

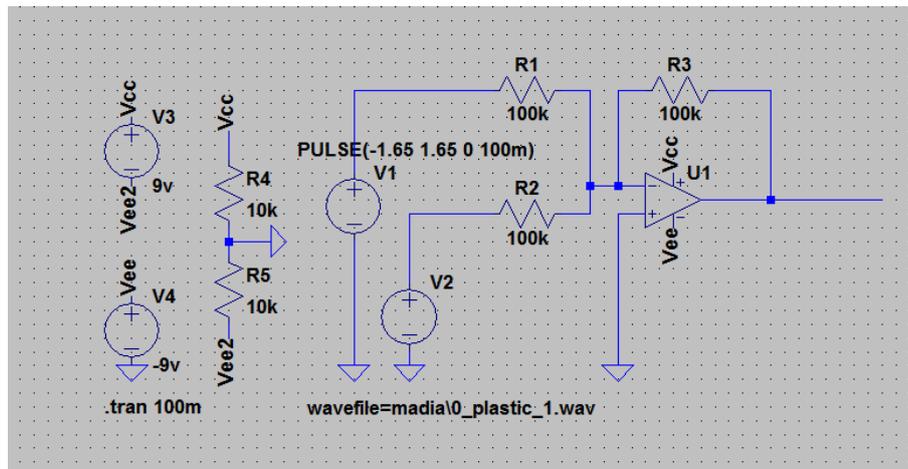


図 3.3: シミュレーションでのモーター制御・振動混合回路図

回路図中の V1 はモーターを正転から逆転させるための電圧源で-1.65 [V] から 1.65 [V] まで出力している電圧源である (図 3.4 の赤線)。V2 は振動波形の電圧源である (図 3.4 の青線)。これらをオペアンプを使用して加算する (図 3.4 の緑線)。このように、モーター制御に振動波形を重畳付加させることができた。この、振動子をモーターと兼用することで、振動子分の体積、重量を軽減する設計をした。

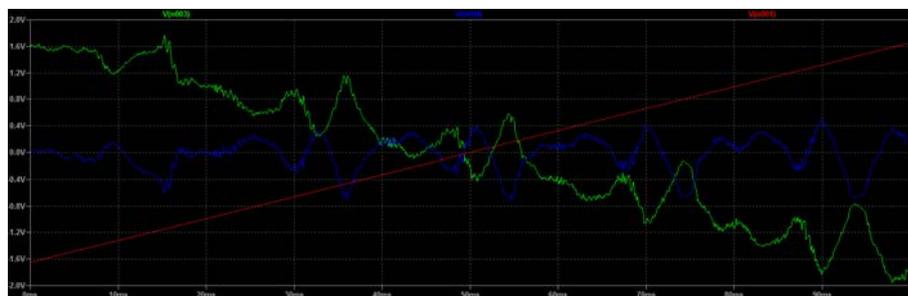


図 3.4: シミュレーション結果波形

また、温度は、ヒーターとペルチェ素子の選択肢がある。ヒーターは暖かさしか提示できないが、ペルチェ素子は素子に流す電流を逆にすることで、暖かさと冷たさの両方が提示できる。今回は、ペルチェ素子を選択した。

### 3.3.2 ケーブル1本での接続

関連研究で述べた TELESAR V の触覚提示デバイスでは、触原色原理で挙げられていた、圧力、振動、温度が提示できている [18]。しかし、触覚提示デバイスと制御機器や接続ケーブルが、圧力、振動、温度で別々になっている。図 3.5 のように、デバイスを制御するために色々な機器を設置し、アクチュエータを制御している。また、研究用のシステム構成であり、比較的大規模なシステムであり、実用化に向けたシステムに変更する必要がある。



図 3.5: TELESAR V の触覚提示で使われている制御機器

TELESAR V の触覚のブロック図を 3.6 に示す。触原色原理の圧力の要素には、関連研究で挙げた Gravitygrabber の機構である、モーターを使ってベルトを指先腹部に当てて、触覚提示を行なっている [12]。振動の要素は、ロボットの指先にある接触マイクで振動を取得して、触覚提示デバイス内に振動子を内蔵して提示している。また、温度は、ロボットの指先についている温度センサで取得した温度を、ベルトと指腹に挿入したペルチェ素子に出力している。

この通り、3つの圧力・振動・温度が別々のシステムで動作している。設計するウェアラブル触覚提示デバイスは無線またはケーブル1本での接続をする必要のため、図 3.7 の様な構成を設計した。

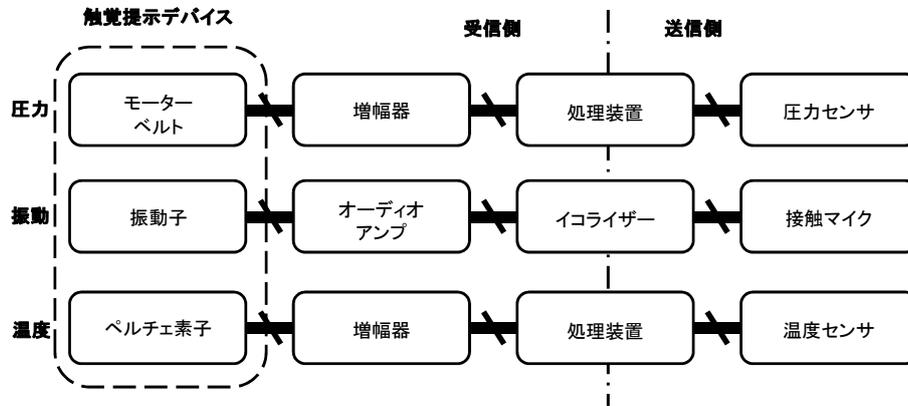


図 3.6: TELESAR V 触覚のブロック図

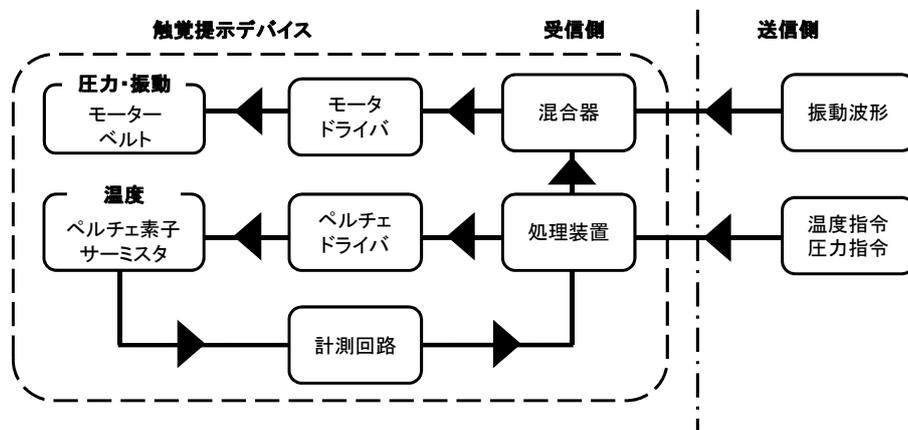


図 3.7: ケーブル 1 本での接続可能なウェアラブル触覚提示デバイスのブロック図

### 3.3.3 制御ソフトウェアの設計

前述したデバイスのブロック図から制御ソフトウェアには、振動波形、温度指令、圧力指令を出力する必要がある。また、出力するタイミングは、指先が対象物に触れ始めたところから、ふれ終わるまで出力する。そのため、指先の位置を取得するソフトウェアも必要となる。そこで次の機能をもソフトウェアを設計した(図 3.8)。

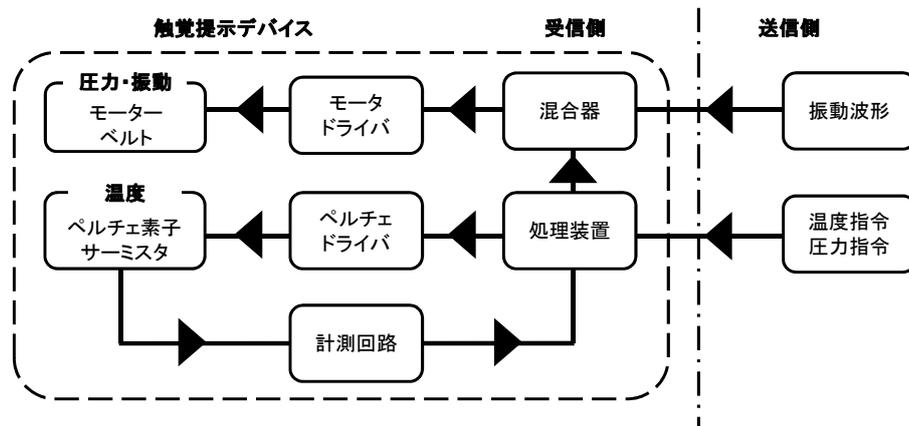


図 3.8: 制御ソフトウェアのブロック図

### 3.3.4 安価なジェスチャー入力機器への対応

指先の触覚提示デバイスで触体験を実現するには、指先の位置を認識する必要がある。位置を計測する方法がいくつかあり TELESAR V では図 3.9 に示すようなデータグローブを用いて手の動きを取得していた。しかし、データグローブは主に研究用に販売されていて、触覚提示デバイスが実用化した際、触覚提示デバイスとデータグローブを組み合わせて使用すると価格が高くなってしまった。

そこで今回、安価に指先の位置を計測ために Leap Motion 社から 2012 年から市販されている LeapMotion で位置を計測したいと考えた(図 3.10)。LeapMotion は 2 基の赤外線カメラと赤外線照射 LED から構成されており、手のジェスチャーによってコンピュータの操作ができる入力機器である。



図 3.9: 5DT Data Glove14 Ultra



図 3.10: LeapMotion

また LeapMotion は安価に入手可能と言うだけでなく一般向けの商品であり，家電量販店で市販されていて入手しやすいというメリットがある．しかし，メリットだけでなく，LeapMotion と触覚提示デバイスを組み合わせて起きる問題もある．それは LeapMotion が手の形以外は認識できないという問題である．そこで指先部に触覚提示デバイスを装着しても手の動きを取得出来るような LeapMotion 向けのデザインが必要だと考えた．

図3.11に示すように，指先部に触覚提示デバイスを想定した部品を装着し，LeapMotion で手の動きの取得に問題が無いような触覚提示デバイスのサイズなことを確かめた．また，LeapMotion にジェスチャー入力機能を最大限引き出す様な設計を検討した．LeapMotion は関節の動きがとれるので，第一関節の動きも取得する事ができる．しかし触覚提示デバイスのサイズと指への固定を第2関節まで広げると，第一関節の動きが取れ無くなってしまふ．そこで，触覚提示デバイスのサイズと指への固定をを第一関節の動きを阻害しないサイズにした．

### 3.3.5 様々な指のサイズへの対応

実用化に向けた触覚提示デバイスは様々な手のサイズに対応する必要がある．サイズフリーな触覚提示デバイス設計も考えられるが，日本人を対象にしても図3.12と図3.13に示すように，指先にはかなりのサイズ幅があることを確認するこ



図 3.11: LeapMotion を使用した使用感テストの様子

とができた [26].



定義：親指の爪のはえぎわから親指先端までの中間の位置における指の幅。



定義：示指の爪のはえぎわから示指先端までの中間の位置における指の幅。

図 3.12: 第1指爪中央指幅サイズ [26] から抜粋

図 3.13: 第2指爪中央指幅 [26] サイズ抜粋

以上の要件を踏まえて、ウェアラブル触覚提示デバイスの設計をした。図 3.23 に CAD 上で設計したウェアラブル触覚提示デバイスを上側からと下側から示す。

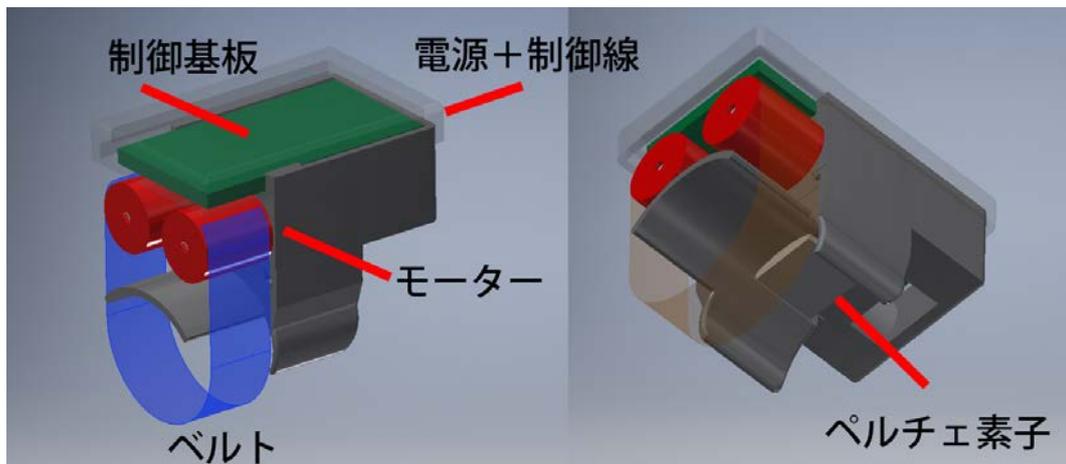


図 3.14: 設計したウェアラブル触覚提示デバイス

## 3.4. 触覚提示デバイスの実装

### 3.4.1 使用部品の選定

設計要件で挙げた、圧力、振動、温度を提示するため、選定した部品を表 3.1 に示す。

### 3.4.2 基板の実装

設計で行なった、モーターに振動を重畳付加する回路を触覚提示デバイスへ拡張し、回路を実装した。圧力増幅・振動混合・温度計測部回路図を図 3.15, 温度指令, 圧力指令を命令を処理する CPU 周辺回路を図 3.16 に示す。

### 3.4.3 制御ソフトウェアの実装

設計で行なった、制御ソフトウェアを processing で実装した。

表 3.1: ウェアラブル触覚提示デバイスの部品

| 部品         | 型番             | コメント                       |
|------------|----------------|----------------------------|
| モーター       | SCL07-1714PG22 | コアレスモーター SCL シリーズ          |
| ベルト        | 両面サテンリボン       | ポリエステル 100% 9mm 幅          |
| モータードライバ   | PAM8302        |                            |
| 混合器        | LMV324         | 低電圧 フルスイング出力汎用オペアンプ        |
| ペルチェ素子     | TEFC1-03112    | ペルチェモジュール 8.3 × 8.3mm 2.5W |
| サーミスタ      | 103JT-025      | 超薄型サーミスタ                   |
| ペルチェドライバ   | DRV8838        |                            |
| マイクロコンピュータ | ATmega32U4     | 8ビット AVR マイクロコントローラ        |

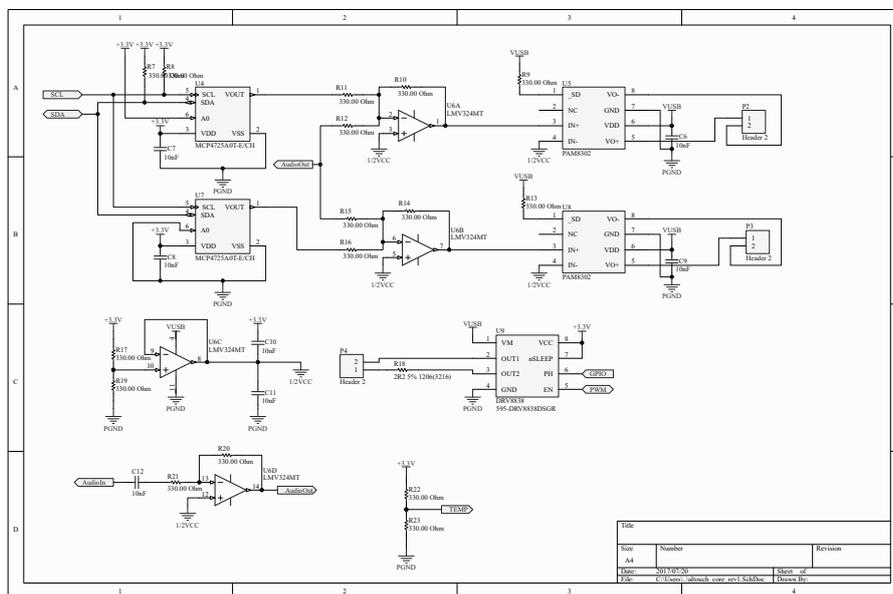


図 3.15: 圧力増幅・振動混合・温度計測部回路図

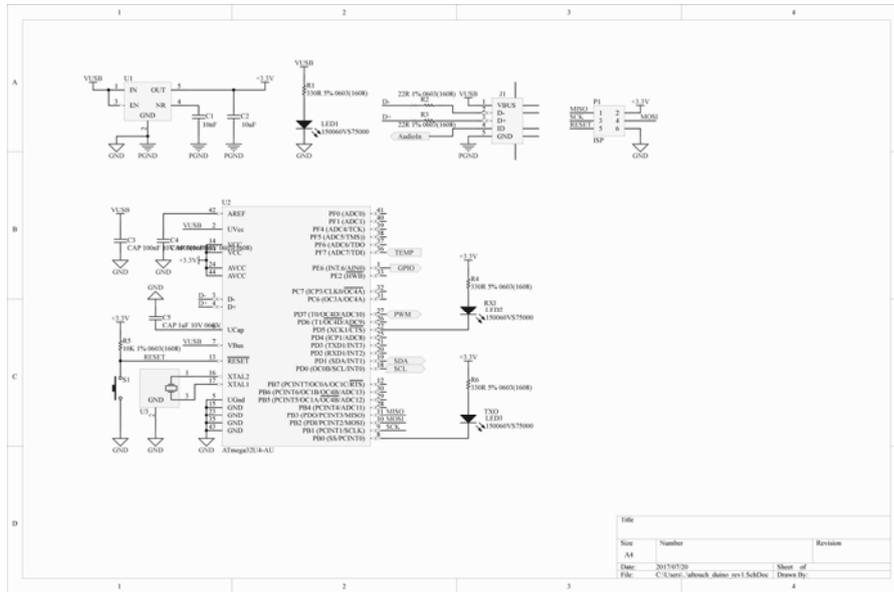


図 3.16: 命令処理装置部回路図

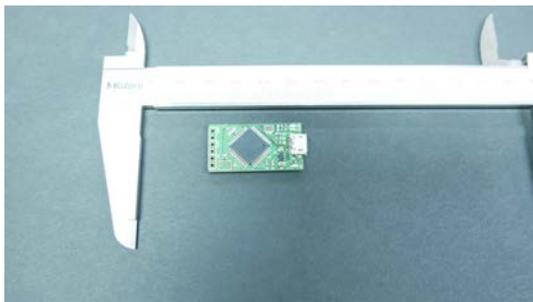


図 3.17: 実装した基板 (表側)



図 3.18: 実装した基板 (裏側)



図 3.19: ウェアラブル触覚提示デバイスの制御ソフト画面

### 3.4.4 外装の実装

詳細設計で LeapMotion で認識することができるサイズが判明したが、デバイスに必要な部品のサイズの問題もある。今回使用したモーターが長さが 33mm あり、従来どおりに接続するとシャフトとベルトを接続するパーツが 15mm で長さ方向で 45mm になる。そこで今回、このモーターとベルトを接続するパーツを新しく CAD で設計し 3D プリンタを使って出力した。その結果 45mm から 33mm への小型化をした。

様々な手のサイズに対応する必要がある触覚提示デバイスを実装するために、ウェアラブル触覚提示デバイスの装着部を指のサイズに対応して交換できるような実装を行なった。基板やアクチュエータが内蔵されている部分と、さまざまな指に対応した装着部にお互いに対応した凸凹を実装し、スライドして交換できるような実装をした (図 3.21, 図 3.22)。

実装した、ウェアラブル触覚提示デバイスを図 3.23 に示す。

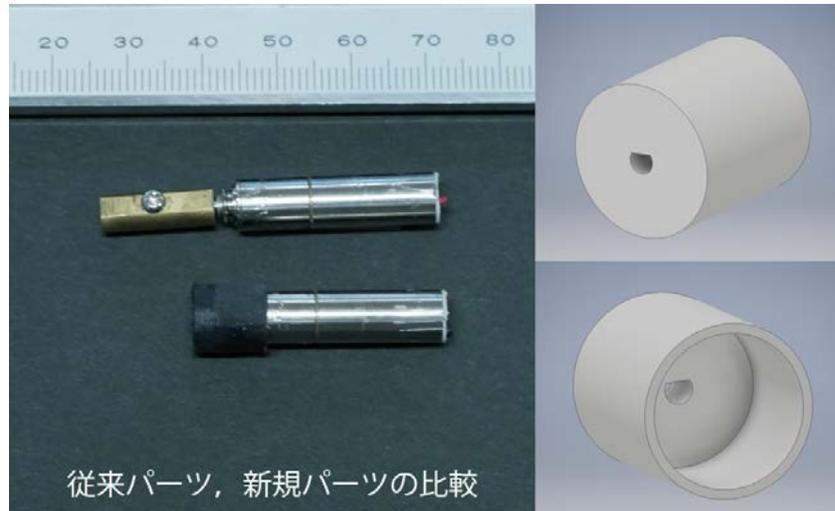


図 3.20: 新しく設計したパーツ



図 3.21: 指サイズ対応機構 (上側)



図 3.22: 指サイズ対応機構 (前側)

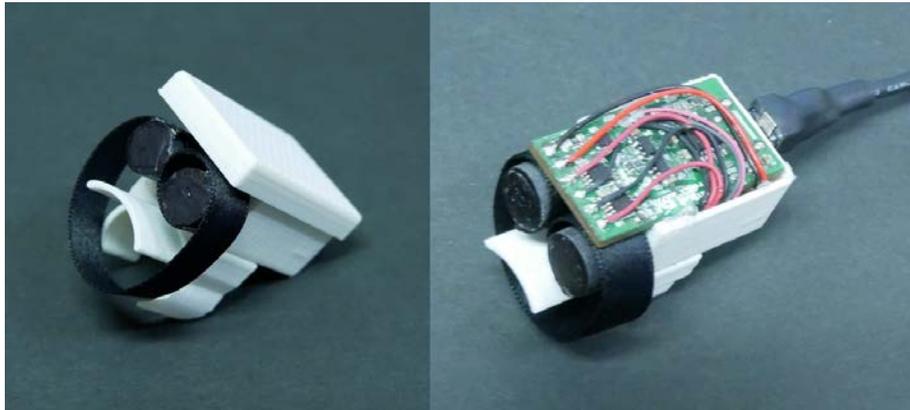


図 3.23: 実装したウェアラブル触覚提示デバイス

また，指に装着した，ウェアラブル触覚提示デバイスを図 3.24 に示す．



図 3.24: 指に装着したウェアラブル触覚提示デバイス

## 第4章

# アプリケーションの実装・展示と 展開

### 4.1. アプリケーションの設計

実装したウェアラブル触覚提示デバイスを使用する，Virtual Haptics，Augmented Haptics に対応したアプリケーションを設計した．VirtualHaptics と Augmented Haptics ではアプリケーションの目的が異なるため，システムの構成が変わる．そこでアプリケーションは分割して設計した．

### 4.2. アプリケーションの実装

#### 4.2.1 Virtual Haptics アプリケーション

Virtual Haptics を体験するために LeapMotion と HMD，ウェアラブル触覚提示デバイスを使用し，バーチャル空間にあるジェンガに対してインタラクションができるアプリケーションを実装した．HMD に装着された LeapMotion によって，ウェアラブル触覚提示デバイスを装着している手の動きを取得し，バーチャル空間にあるオブジェクトに触れた時，Unity から制御アプリケーション，ウェアラブル触覚提示デバイスと制御信号が流れ，バーチャルオブジェクトに触れる，Virtual Haptics を体験出来る (図 4.1)．



図 4.1: VirtualHaptics アプリケーション

### 4.2.2 Augmented Haptics アプリケーション

Augmented Haptics を体験するために視覚情報の重畳付加を体験出来る HoloLens とウェアラブル触覚提示デバイスを用いて、アプリケーションの実装をした [27] (図 4.2). HoloLens を用いることで、リアルにある物体に視覚情報の重畳付加. ウェアラブル触覚提示デバイスを用いることで、リアルにある物体の触感を重畳付加することができる.

ユーザーの前には、透明のアクリルボックスが机の上に設置されている. ユーザーは、ウェアラブル触覚提示デバイスと HoloLens を装着し、アプリケーションを開始すると、透明なアクリルボックスに視覚情報の重畳付加がされる (図 4.3). ウェアラブル触覚提示デバイスを装着した指でアクリルボックスを触ると、アクリルボックスの触覚に、ウェアラブル触覚提示デバイスが提示した触覚が重畳付加されてユーザーに提示した (図 4.4).

視覚情報が異なる、アクリルボックスに触れるとウェアラブル触覚提示デバイスが提示する触覚情報が異なり、先ほど触った触感とは異なった触感をユーザーに提示した (図 4.5, 図 4.6).



図 4.2: Augmented Haptics のための, HoloLens [27], ウェアラブル触覚提示デバイス, アクリルボックス



図 4.3: Augmented Haptics 体験手順 1



図 4.4: Augmented Haptics 体験手順 2



図 4.5: Augmented Haptics 体験手順 3



図 4.6: Augmented Haptics 体験手順 4

### 4.3. Altered Touch

著者らは、前述した VirtualHaptics と Augmented Haptics, それぞれのアプリケーションに使用可能な Altered Touch というものを SIGGRAPH 2017 で提案した. AlteredTouch で 3 つの体験を提供した.

1. Virtual Haptics, Augmented Haptics の体験
2. ウェアラブル触覚提示デバイスの体験
3. 視覚情報の重畳付加と Augmented Haptics の体験

### 4.4. デモンストレーション

実際に Altered Touch を国際会議である SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies に展示した. SIGGRAPH 2017 は 2017 年 7 月 30 日から 8 月 4 日の 5 日間, アメリカの Los Angeles Convention Center で開催された. Emerging Technologies での展示は Primitive Demo と AR Demo の 2 種類のデモを展示した. 体験者は来場者で 20 代から 50 代程度, 人数は約 450 人程度の人に体験して頂いた.

#### 4.4.1 フィールドテスト

Altered Touch の体験をより多くの人に体験してもらうため、より簡略化した体験フローを設計した。

- 三原色原理（圧力，振動，温度）に基づく触覚提示
- 実際に触れたものの触感が変化したか
- 日本人女性から，外国人男性までさまざまな指のサイズに対応
- 2～3分程度の体験

上記4点にスポットを当て，体験フローを設計した。

#### 4.4.2 体験フロー

設計した，体験フローをステップ毎に解説する。

1. 体験者に対応したパーツの選択
2. Augmented Haptics(圧力，振動) 体験
3. VirtualHaptics(圧力，振動) 体験
4. VirtualHaptics（圧力，振動，温度）体験

まず，体験者の指のサイズに合わせたパーツを選んでもらって 触覚ディスプレイを装着してもらいました (図 4.7)。

体験者の机の上にはディスプレイが設置してあり，ディスプレイには3つの画像表示されており (図 4.8)。体験者は画像奥に，手前向きで席に座ってもらった。体験者からみて左の画像には，透明なアクリルボックスがディスプレイに固定されてある。

まず，Augmented Haptics の体験をしてもらいました。体験者に右のアクリルボックスの表面を触ってもらって触覚の変化を感じてもらいました (図 4.9)。



図 4.7: Altered Touch 体験手順 1

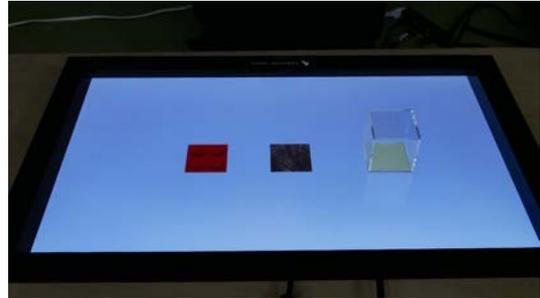


図 4.8: Altered Touch 体験手順 2

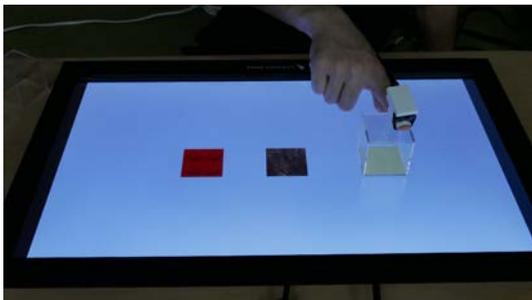


図 4.9: Altered Touch 体験手順 3

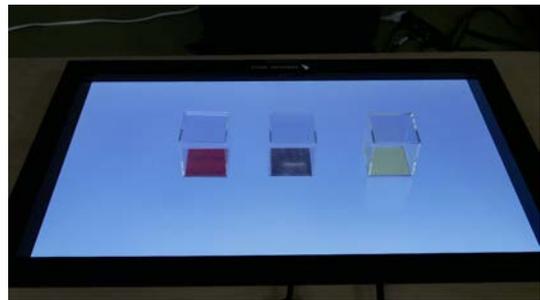


図 4.10: Altered Touch 体験手順 4

左2つは VirtualHaptics を体験出来ます。実際にはアクリルボックスは右側しか設置してないが、バーチャルなアクリルボックスが設置してあります(図4.10)。

右のアクリルボックスに触るように、真ん中の画像を触りに行くとバーチャルなアクリルボックスに触れることができる。表面をなぞるように触ると、右の箱とはまた違った触り心地を感じることができる(図4.11)。

最後に、左のバーチャルなアクリルボックスをさわると、温冷感の体験をすることができる(図4.12)。この例では、赤い画像なので、アクリルボックスに触ると暖かさを感じてさせた。この一連の体験は2～3分であった。

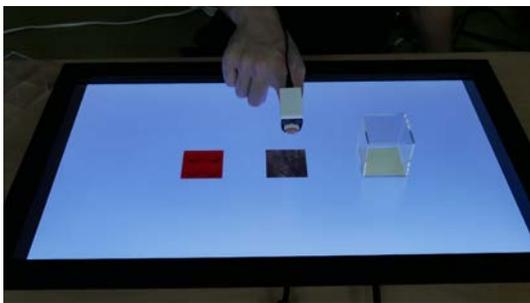


図 4.11: Altered Touch 体験手順 5

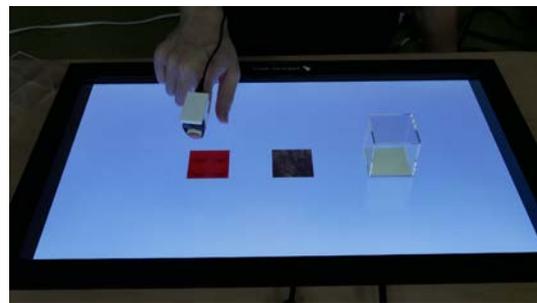


図 4.12: Altered Touch 体験手順 6

実際に体験してもらっている様子を図4.13に示す。また、視覚と触覚を両方とも体験したいという体験者に向けて、MRを採用したデモンストレーションも行った(図4.14)。体験者はHoloLensと触覚提示デバイスを指につけて体験する。HoloLensによって球に視覚的なテクスチャーが貼られ、触覚提示デバイスによって触覚的なテクスチャーが重畳される。

#### 4.4.3 体験のフィードバック

- Demo : 約 400 人
- HoloLens Demo : 約 100 人

Cool! Amazing! など、強い肯定的な反応が得られた。触原色のうち温度を感じた時、体験者の反応が一番良かった。また、(VRのアプリケーション制作者が)



図 4.13: デモンストレーションの様子



図 4.14: デモンストレーションの様子

「自分のアプリケーションで採用したい。」や「売らないのか？」とフィードバックをもらった。

## 4.5. 考察

圧力・振動・温度のうち最も温度の反応が良かった点については、温度の温かさや冷たさは認識しやすい。今まで振動的なフィードバックを受けることに慣れている一方で、温感のフィードバックは稀少だったのではないかと考えられる。

商用の依頼とも取れるフィードバックについては、コントローラを内蔵し、ケーブルを1本に絞るなどのコンパクトな形状が気に入られた。触原色に基づいて触覚を再現したことで、従来の商用コントローラよりも多彩な触覚を楽しめた。

## 4.6. 実製品への展開

今回、Telexistence.inc でインターンシップとして開発に関わったので、実製品への展開としての触覚提示デバイスについて記述する [28].

### 4.6.1 Telexistence.inc

テレイグジスタンス (TELEXISTENCE/遠隔存在) とは, Telexistence inc の創業者の一人で TX 会長でもある東京大学名誉教授 舘が 1980 年に世界で初めて提唱した, 人間が, 自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し, その場所で自在に行動するという人間の存在拡張の概念であり, また, それを可能とするための技術体系である. Telexistence inc ではこの技術の産業化を実現し, 個人, 企業, 社会の生産性を飛躍的に向上させることを目的に, 2017 年 1 月に設立した. テレイグジスタンスロボット, インターネットを介したロボティクスにおける遠隔制御技術, 視聴覚から触覚までの情報を伝送・蓄積・解析する通信モジュール・クラウドシステムの開発を行なっている.

### 4.6.2 Telexistence.inc 向け触覚提示デバイス

Telexistence.inc での触覚提示デバイスは Tele Haptics に該当する触体験である. また, 企業で, 実製品としての触覚提示デバイスと言うことで目的がまた違った触覚提示デバイスとなる. 今回インターンシップでは Tele Haptics で必要な, 触覚センサを主に担当して開発に参加した.

2018 年 5 月 29 日に行なわれた, Telexistence 社のテレイグジスタンス (遠隔存在) 技術を活用したロボットの量産型プロトタイプ「MODEL H」の発表会に参加し, 触覚体験デモの補助をおこなった [29]. ロボットハンドに対応する指先にある触覚センサーから送られてきたデータを触覚提示デバイスで出力することでロボットが感じた, ハプティクスを遠隔地で体験者が感じる事が出来る (図 4.17). 触覚センサーは, 触原色原理に対応した, 振動, 圧力, 温度が計測出来る (図 4.16). 今回は取材記者 6 人ほどに対して体験を実施した. 今回の触覚体験デモではロボットの腕は固定されていて, 固定しているロボットの指先にデモ補助要員が物をあて触感を指先に伝えた.



図 4.15: Telexistence.inc モデル H



図 4.16: ロボットハンド指先部



図 4.17: 指先触覚提示デバイス



図 4.18: 「MODEL H」発表会触覚体験デモ



図 4.19: 体験デモでロボットが把持している様子 [30] から引用

## 第5章

# 結 論

本論文では、一般的になりつつあるハプティクスである振動触覚だけでなく、多彩な触覚提示をするために、複数の触覚要素をしようして触覚を表現する、触原色原理に基づくウェアラブル内蔵触覚提示デバイスを提案した。本概念を確立するために、触原色原理に基づくウェアラブル触覚提示デバイスの要件定義をし、ウェアラブル触覚提示デバイスを実装した。また、Virtual Haptics と Augmented Haptics の体験を目的とした「Altered Touch」を提案し、システムを構築した。

第1章では、VRの普及について紹介し、今後増加していく触覚のコンテンツを述べ、本研究の目的を示した。第2章では、人が触知覚メカニズムと、今までの触覚提示デバイス、触覚の伝送技術、最後に触原色と触原色原理に基づく先行研究を紹介した。第3章では、触原色原理に基づくウェアラブル触覚提示デバイスの要件定義を述べ、システム設計をおこなった。また、基本設計を行い、実装を述べた。第4章では、ARハプティクスとして使用することが出来るシステム「Altered Touch」を構築した。Altered Touchに必要な設計要件を満たすウェアラブル触覚提示デバイスの詳細設計と実装を行なった。そして、Virtual Haptics と Augmented Haptics を組み合わせた Altered Touch を提案し、本研究のデモンストレーションを SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies にて実施した。その結果、Altered Touchを使用した多くの人が触覚が変化しているのを体験し、おどろいた等の意見を頂いた。

本論文では、触原色原理に基づいた触覚提示デバイスを提案し、システムを実装することで振動触覚だけでなく多彩な表現ができるウェアラブル触覚提示デバイスを実現できた。

また、今回実装した触原色原理に基づくウェアラブル触覚提示デバイスは、テ

レイグジスタンスにも使える可能性があり、実際にインターンとして開発に関わった。TELEXISTENCE 株式会社が発表した量産型プロトタイプの遠隔操作ロボット「MODEL H」の触覚提示デバイスとして対外的に発表された。

今後の展望として、触原色原理に基づくウェアラブル触覚提示デバイスが実現したことにより、多彩な触覚提示が普及するきっかけになると考える。その結果、今後振動触覚だけでなく温冷感提示や、力覚提示を備えるゲームコントローラーなどが可能になると考える。やがてハプティクスの伝送データや、伝送方式の標準化が進んでいけば、テレビやラジオの様に、日々の生活に溶け込んだ触体験をすることが出来ると考えられる。

# 謝 辞

本研究の指導教員であり，幅広い知見からの的確な指導と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准教授に心から感謝いたします，本論文の指導をはじめ，デモフローなど沢山の意見を親身にしてくださいました．心から御礼申し上げます．

副査である，Charith Fernando 特任講師には，KMDでの指導をはじめ，TELEX-ISTENCE 株式会社ではインターンにもお声を掛けていただき，大変感謝しています．TELEXISTENCE 株式会社でのインターンでも触覚技術に関わる業務に関わらせて頂き，大変研究の参考にもなりました．

また，研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜り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．

修士1年の時から，Embodied Media の先輩として SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies の「Layered Presence」デモ展示を始め，TELESAR V のデモ展示など，相談や研究の進め方に数多くの助言をいただきました．MHD Yamen Sarajji さんに心より感謝いたします．

SIGGRAPH 2017 でのデモ展示の際は，Tanner Pearson さん，中村開さんに大変お世話になりました．二人の協力がなければデモ展示は成り立たなかったとおもいます．他にもたくさんの人からご尽力を賜り，心から感謝申し上げます．SIGGRAPH に参加できたことは KMD 生活の中でとても刺激をもらった場所でした．

また，修士1年の頃から共に研究を行い，その度に数多くの助言や助けて頂いた同期だった，山本康喜さん，松園敏志さん，村田遥人さんに感謝の意を表します．

研究生活において数多くの苦楽を共に乗り越えてきた，Embodied Media Project のスタッフ，同期，先輩，後輩のみなさまに感謝の意を表します．

最後に、大学院に進学したいという私のわがまを承諾し、あたたかい励ましをいつも送り続けてくれた両親と妹に感謝いたします。みなさま、ありがとうございました。

## 参 考 文 献

- [1] ”N904i サポート情報 — お客様サポート — NTT ドコモ”, <https://www.nttdocomo.co.jp/support/utilization/product/n904i/>, 2018年7月28日アクセス
- [2] ”ニンテンドー ゲームキューブ／スペック - コントローラ”, <https://www.nintendo.co.jp/ngc/control/index.html>, 2018年7月28日アクセス
- [3] ”機能・仕様 — Nintendo Switch | Nintendo”, <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/specs/index.html#3>, 2018年6月16日アクセス
- [4] ”MacBook - Apple (日本) ”, <https://www.apple.com/jp/macbook/>, 2018年6月16日アクセス
- [5] ”VIVE<sup>TM</sup> 日本 — VIVE ハードウェアの購入”, <https://www.vive.com/jp/product/>, 2018年6月16日アクセス
- [6] ”Oculus Rift — Oculus”, <https://www.oculus.com/rift/>, 2018年6月16日アクセス
- [7] ”PlayStation VR — プレイステーション”, <http://www.jp.playstation.com/psvr/>, 2018年6月16日アクセス
- [8] ”VR ZONE SHINJUKU”, <https://vrzone-pic.com/>, 2018年6月16日アクセス
- [9] ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 前野隆司, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000.

- [10] "3D Systems Touch Haptic Device", <https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch>, 2018年6月16日アクセス
- [11] Nojima Takuya, Sekiguchi Dairoku, Inami Masahiko, Tachi, Susumu. The SmartTool : A system for augmented reality of haptics. Proceedings - Virtual Reality Annual International Symposium. 2002. p. 67-72.
- [12] Minamizawa Kouta, Fukamachi Souichiro, Kajimoto Hiroyuki, Kawakami Naoki, Tachi Susumu. Gravity grabber : Wearable haptic display to present virtual mass sensation. ACM SIGGRAPH 2007: Emerging Technologies, SIGGRAPH'07. 2007. 8.
- [13] Minamizawa Kouta, Kakehi Yasuaki, Nakatani Masashi, Mihara Soichiro, Tachi Susumu. TECHTILE toolkit : A prototyping tool for designing haptic media. ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies, SIGGRAPH'12. 2012.
- [14] Mizushina Yusuke, Fernando Charith Lasantha, Minamizawa Kouta, Tachi Susumu. Haptic broadcasting. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 卷 8619 Springer Verlag, 2014. p. 466-468 (Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); 卷数 8619).
- [15] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, Christian Holz. CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality. CHI 2018, April 21–26, 2018, Montreal, QC, Canada
- [16] "CyberGrasp — CyberGlove Systems LLC", <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/>, 2018年7月28日アクセス
- [17] Telexistence, / S. Tachi: World Scientific, ISBN-13 978-981-283-633-5,2009.

- [18] Fernando Charith Lasantha, Furukawa Masahiro, Kurogi Tadatoshi, Kamuro Sho, Sato Katsunari, Minamizawa Kouta, Tachi Susumu. Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in teleexistence. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. p. 5112-5118 6385814.
- [19] 松園 敏志, 中村 開, 加藤 大弥, Peiris Roshan, 南澤 孝太. IP 伝送技術を用いた触覚伝送ノード“HaptI/O”の開発. 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会, 徳島, 2017.9.
- [20] バーチャルリアリティ入門 / Tachi Susumu ちくま新書 ISBN-4-480-05959-5, 2002.
- [21] ”Tachi Lab - 触原色”, <https://tachilab.org/jp/about/hpc.html>, 2018年6月16日アクセス
- [22] 触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ, / 梶本裕之, 博士論文 東京大学大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻
- [23] Yuan-Ling Feng, Charith Lasantha Fernando, Jan Rod, Kouta Minamizawa. Submerged haptics: a 3-DOF fingertip haptic display using miniature 3D printed airbags. ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, 2017
- [24] 山口 瞬, 塩野 入央空, 中村 拓人, 梶本 裕之. 指先の触覚を前腕に提示するウェアラブルデバイスの開発第2報:温度提示の付与. インタラクシオン2018 予稿集, インタラクシオン2018
- [25] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, Kouta Minamizawa. ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems(pp. 5452-5456). ACM.
- [26] ”AIST 人体寸法・形状データベース 手の寸法データベース 日本人男女530名について計測された、手の寸法72項目の統計量”, 国立研究開発法人 産業

技術総合研究所 人間情報研究部門 デジタルヒューマン研究グループ

- [27] ”複合現実テクノロジーの先導者 — HoloLens”, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>, 2018年6月16日アクセス
- [28] ”TELEXISTENCE inc.”, <https://tx-inc.com/ja/>, 2018年7月24日アクセス
- [29] ”遠隔操作技術を用いたロボット MODEL H の量産型プロトタイプを開発 — TELEXISTENCE inc.”, <https://tx-inc.com/ja/press/modelh/>, 2018年7月24日アクセス
- [30] ”au 出資の「アバター」ロボ。自在に動き、知覚を伝送 2020年に量産 - Engadget 日本版”, <https://japanese.engadget.com/2018/05/29/au-2020/>, 2018年7月24日アクセス