

|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | Synesthesia Wear : 感覚を拡張する全身触覚インターフェイス  |
| Sub Title        | Synesthesia Wear : full-body haptic interface for sensory expansion   |
| Author           | 古川, 泰地(Furukawa, Taichi)<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 | 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776号   |
| Genre            | Thesis or Dissertation  |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002019-0776">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002019-0776</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 2019年度

Synesthesia Wear :  
感覚を拡張する全身触覚インターフェイス



慶應義塾大学  
大学院メディアデザイン研究科

古川 泰地

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。

古川 泰地

研究指導コミッティ:

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

水口 哲也 特任教授 (副指導教員)

論文審査委員会:

南澤 孝太 教授 (主査)

水口 哲也 特任教授 (副査)

中村 伊知哉 教授 (副査)

修士論文 2019年度

Synesthesia Wear :

## 感覚を拡張する全身触覚インターフェイス

カテゴリ：デザイン

### 論文要旨

近年、スマートフォンやIoT機器、xR機器の普及により、我々の生活や情報への接し方は大きく変化しようとしている。特に、生活空間や都市空間そのものと相互作用する空間コンピューティングが今後拡大してゆき、現実空間と複合空間が当たり前のように混ざり合う五感を通じたインタラクションが可能になることが期待される。一方で現在の空間コンピューティングはインタラクション表現が非常に狭く、自然な身体動作を伴った空間とのインタラクションが実現できない。本研究は空間コンピューティングにおけるインタラクション表現を拡張するために、2次元通信技術に基づいた全身触覚ウェア、Synesthesia Wear の設計と開発を行う、さらに、Magic Leap One を用いた新たな空間コンピューティング体験を設計、開発することで、複数の空間に感覚が拡張される感覚拡張のコンセプトを提案する。本論文は、帝人株式会社と Enhance Experience, Inc. と共同で立案した Synesthesia Wear プロジェクトとして、筆者が行なったコンセプトデザイン、機能要件定義、ハプティックインターフェイスデザイン、空間コンピューティング体験、そして SIGGRAPH Asia 2019 をはじめとする展示を通じたコンセプトの実証について述べる。

キーワード：

空間コンピューティング, ハプティック, ウェアラブル, 複合現実, VR, MR, xR

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

古川 泰地

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2019

Synesthesia Wear :  
Full-body Haptic Interface for Sensory Expansion

Category: Design

Summary

In recent years, our way of life and contact with information is about to change drastically by the spread of smartphones, IoT devices, and xR devices. Especially, the spatial computing that interacts with the living space and the urban space itself will expand in the future. On the other hand, the current spatial computing has a Limited interaction representation, and it's not allow the interaction using freely body movement with a space. This study designed and developed Synesthesia Wear, a full body haptic interface based on the 2-dimensional signal transmission technology. Also designed and developed a new spatial computing experience using Magic Leap One, in order to extend the interaction representation in spatial computing. We propose a concept of sensory expansion in which the sensation is extended to multiple spaces. This paper describes the concept design, functional requirement definition, haptic interface design, spatial computing experience design, demonstration at SIGGRAPH Asia 2019, The proof of concept through this exhibition. This Synesthesia Wear project jointly launched by Teijin Limited and Enhance Experience, Inc.

Keywords:

Spatial Computing, Haptics, Wearable, Mixed Reality, Virtual Reality, xR

Keio University Graduate School of Media Design

Taichi Furukawa

# 目 次

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 序論</b>                     | <b>1</b>  |
| 1.1. 空間コンピューティング                    | 1         |
| 1.2. 本研究の目的                         | 4         |
| 1.3. 本論文の構成                         | 4         |
| <b>第 2 章 関連事例</b>                   | <b>5</b>  |
| 2.1. xR                             | 5         |
| 2.2. 触覚提示                           | 7         |
| 2.3. 本章のまとめ                         | 11        |
| <b>第 3 章 コンセプトデザイン</b>              | <b>13</b> |
| 3.1. 感覚拡張                           | 13        |
| 3.2. 全身を用いた空間インタラクション表現             | 15        |
| 3.3. 全身触覚インターフェイスの必要要件              | 15        |
| 3.4. 本章のまとめ                         | 16        |
| <b>第 4 章 Synesthesia Wear 開発</b>    | <b>20</b> |
| 4.1. 触感提示の配置案                       | 20        |
| 4.2. 2次元通信                          | 23        |
| 4.3. 2次元通信に基づいた Synesthesia Wear 設計 | 26        |
| 4.3.1 システム構成                        | 26        |
| 4.3.2 2次元通信ウェア                      | 27        |
| 4.3.3 2次元通信ハプティックモジュール              | 28        |
| 4.3.4 通信仕様                          | 30        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4. 本章のまとめ . . . . .                                    | 32        |
| <b>第5章 Proof of Concept</b>                              | <b>39</b> |
| 5.1. 感覚を拡張する空間コンピューティング体験 . . . . .                      | 39        |
| 5.2. アプリケーション設計 . . . . .                                | 40        |
| 5.2.1 システム . . . . .                                     | 40        |
| 5.2.2 複合空間デザイン . . . . .                                 | 41        |
| 5.3. デモンストレーション . . . . .                                | 47        |
| 5.3.1 SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies . . . . . | 47        |
| 5.3.2 JST ACCEL Embodied Media Project 最終報告会 . . . . .   | 51        |
| 5.4. デモから確認できたインタラクション表現 . . . . .                       | 53        |
| 5.5. 本章のまとめ . . . . .                                    | 55        |
| <b>第6章 結論</b>  | <b>56</b> |
| 6.1. 総括 . . . . .  | 56        |
| 6.2. 展望 . . . . .  | 58        |
| <b>謝辞</b>  | <b>60</b> |
| <b>参考文献</b>  | <b>62</b> |
| <b>関連発表</b>  | <b>66</b> |
| A. 国際学会・国内学会 . . . . .                                   | 66        |
| B. 展示 . . . . .  | 67        |
| C. メディア掲載 . . . . .                                      | 67        |
| C.1 TeleSight . . . . .                                  | 67        |
| C.2 Synesthesia Wear . . . . .                           | 68        |

# 目 次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Ingress <sup>1</sup> . . . . .                          | 2  |
| 1.2  | Magic Leap One を用いた空間コンピューティングの例 <sup>2</sup> . . . . . | 3  |
| 2.1  | xR 概観 . . . . .   | 5  |
| 2.2  | The ultimate display <sup>3</sup> . . . . .             | 5  |
| 2.3  | The Cave <sup>4</sup> . . . . .                         | 5  |
| 2.4  | Google Glass <sup>5</sup> . . . . .                     | 6  |
| 2.5  | Microsoft Hololens <sup>6</sup> . . . . .               | 6  |
| 2.6  | Nreal Light <sup>7</sup> . . . . .                      | 7  |
| 2.7  | Varjo XR-1 <sup>8</sup> . . . . .                       | 7  |
| 2.8  | Synesthesia Suit <sup>9</sup> . . . . .                 | 8  |
| 2.9  | Cyber Touch <sup>10</sup> . . . . .                     | 9  |
| 2.10 | TECHTIE Toolkit <sup>11</sup> . . . . .                 | 9  |
| 2.11 | Tesla Suit <sup>12</sup> . . . . .                      | 10 |
| 2.12 | ForceJacket <sup>13</sup> . . . . .                     | 10 |
| 2.13 | LIVE JACKET <sup>14</sup> . . . . .                     | 11 |
| 2.14 | SMA を用いたハプティックベスト <sup>15</sup> . . . . .               | 11 |
| 2.15 | Synesthesia X1-2.44 <sup>16</sup> . . . . .             | 12 |
| 2.16 | Embodisuit <sup>17</sup> . . . . .                      | 12 |
| 3.1  | (a) 触感を提示する皮膚, (b) 複合現実空間の触感を提示する新たな受容体 . . . . .       | 13 |
| 3.2  | 全身に分布する複合現実触覚受容体 . . . . .                              | 14 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.3  | 手・腕を用いた空間インタラクション表現 (a) 現実・複合現実で可能なインタラクション, (b) 複合現実で可能なインタラクション              | 18 |
| 3.4  | 全身を用いた空間インタラクション表現 (a) 現実・複合現実で可能なインタラクション, (b) 複合現実で可能なインタラクション               | 19 |
| 4.1  | 触感提示の配置パターン検討  | 21 |
| 4.2  | Foster 製バイブレーションアクチュエータ 602760   | 22 |
| 4.3  | 配置案を体感中の様子   | 23 |
| 4.4  | 実験構成   | 24 |
| 4.5  | Max スクリプト  | 25 |
| 4.6  | Synesthesia Wear 触感提示配置案   | 26 |
| 4.7  | 導電テキスタイル   | 27 |
| 4.8  | テキスタイルの両面で行う接触導通 ([1] より抜粋)  | 28 |
| 4.9  | Synesthesia Wear システム構成  | 29 |
| 4.10 | (a) 導電テキスタイルウェア, (b) インナー, (c) アウター  | 30 |
| 4.11 | ハプティックモジュール外観  | 31 |
| 4.12 | ハプティックモジュール：取り付けの様子  | 32 |
| 4.13 | ハプティックモジュール：パーツ構成  | 33 |
| 4.14 | ハプティックモジュール：外装設計図（提供：帝人株式会社）   | 34 |
| 4.15 | ハプティックモジュール：データ格納方式（提供：帝人株式会社）   | 35 |
| 4.16 | BLE 接続コマンド基板   | 36 |
| 4.17 | OSC インターフェイスを用いた際の制御構成   | 37 |
| 4.18 | Synesthesia wear (Magic Leap One を装着)  | 37 |
| 4.19 | Synesthesia wear (アウターなし)  | 38 |
| 5.1  | 人魂, 鳥山石燕 今昔画図続百鬼 (1779) より   | 41 |
| 5.2  | ウィルオブザウイスプ, The Will o' the Wisp and the Snake by Hermann Hendrich (1854–1931) | 41 |
| 5.3  | 空間コンピューティング体験フロー   | 42 |
| 5.4  | 空間コンピューティング体験：システム構成   | 43 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.5  | Optitrack Prime 13W モーションキャプチャカメラ ([2] より抜粋)        | 44 |
| 5.6  | 反射マーカを取り付けた Synesthesia Wear, Motive によるモーショントラッキング | 45 |
| 5.7  | Magic Leap One 用反射マーカ器具                             | 46 |
| 5.8  | Soul ビジュアル: Unreal Engine 上の表示                      | 47 |
| 5.9  | Soul ビジュアル: Magic Leap One 上の表示                     | 48 |
| 5.10 | Soul: 触感データの波形                                      | 48 |
| 5.11 | Plasma ビジュアル: Unreal Engine 上の表示                    | 49 |
| 5.12 | Plasma ビジュアル: Magic Leap One 上の表示                   | 50 |
| 5.13 | Plasma: 触感データの波形                                    | 50 |
| 5.14 | Energy Vortex ビジュアル: Unreal Engine 上の表示             | 51 |
| 5.15 | Energy Vortex ビジュアル: Magic Leap One 上の表示            | 52 |
| 5.16 | Energy Vortex: 触感データの波形                             | 52 |
| 5.17 | SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies デモの様子      | 53 |
| 5.18 | JST ACCEL Demonstration デモの様子                       | 54 |

# 目 次

|     |                                 |    |
|-----|---------------------------------|----|
| 4.1 | 各配置における最短 SOA, 最長 SOA . . . . . | 24 |
| 4.2 | 各配置における最速・最遅触感流れ感 . . . . .     | 26 |
| 4.3 | $I^2C$ 通信フォーマット . . . . .       | 34 |
| 4.4 | シリアル通信制御フォーマット . . . . .        | 35 |

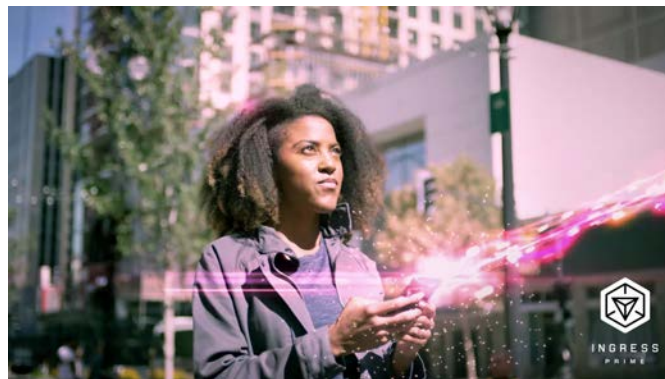
# 第 1 章

## 序

## 論

### 1.1. 空間コンピューティング

近年、スマートフォンや IoT 機器、VR や MR といった xR 機器の普及により、我々の生活や情報への接し方は大きく変化しようとしている。特に、我々の生活空間や都市空間そのものと相互作用することが可能になりつつある。その代表的な例として、2013 年に Niantech からリリースされたスマートフォンアプリ、Ingress(図 1.1) がある、これは現実の都市空間に存在する「ポータル」をスマートフォンを通じて探し出していくものだ。アプリ内において、現実世界とデジタル世界は重なっており、プレイヤーはポータルを求めて現実の町を探索していく。まさに都市をデジタル空間を用いて拡張している例といえる。これに対して生活空間を利用したものも提案されており、特に 2016 年に Microsoft 社は視界と AR 像を重ねて表示するヘッドセット”Hololens”を発売している。これは生活空間とヴァーチャル空間が混じり合う体験 Mixed Reality(複合現実)を可能にしている。これらの事例は、現実空間と、そこに重なる空間が境目なく存在し、スマートフォンや MR ヘッドセットを通じてそれらの空間と相互作用している。このようなコンセプトは、”空間コンピューティング (Spatial Computing)”とよばれる。空間コンピューティングとは、コンピュータがもたらす様々な概念、情報、コンテンツを、人を取り巻く生活空間や都市空間を通じて利用できるようになるものである。現実の空間に対して、コンピューターによって表現された新たな現実を、適切な大きさ、適切な場所に現実と同じように重ね映すことができ、スマートフォンや MR ヘッドセットを通じてその”複合現実空間”を見て回ったり、インタラクションをすることができる。現在、スマートフォンや前述したすでに発売されている

図 1.1 Ingress <sup>1</sup>

MR ヘッドセットを用いれば、誰もが空間コンピューティングを体験することができる。2016年にNiantechよりリリースされたPokemon Goは、Ingressと同様に都市空間に基づいてポケモンジムなどを提示するのに加え、AR技術を用いることで、あたかも現実世界にポケモンたちが潜んでいるような世界観を表現した。Magic Leap社は2018年にMRヘッドセットMagic Leap Oneを開発し、米国で一般に販売した。これはMRヘッドセットを一般販売した最初期の例になった。

今後、空間コンピューティングのコンセプトは拡大・普及していき、技術の進化とともに人々の生活環境で用いられていくだろう。様々な情報、コンテンツ、テレプレゼンスされた人や動物、それらで形作られる環境が当たり前のように生活空間、都市空間に複合された時、それらとのインタラクションはより多様になり、現実と複合現実が五感を通じて混ざり合う体験となるはずである。しかし、このような体験は、MRヘッドセットを用いるだけで実現可能なのだろうか。図1.2はMagic Leap Oneを用いた空間コンピューティングの例を示している。ここでは視聴覚的に複合現実空間を見つめているが、手はコントローラーを握ったままだ。インタラクション表現は非常に狭いと言える。このように、現状の複合現実空間に対するインタラクションは、モーションコントローラーやスマートフォンの画面、ハンドジェスチャーを用いたものに限定されているという現状がある。また、

---

1 <https://www.ingress.com>



図 1.2 Magic Leap One を用いた空間コンピューティングの例<sup>2</sup>

現状の空間コンピューティング体験は主に視覚及び聴覚を利用したものが主流であり，触覚に対するアプローチはコントローラなど，手元に対する提示にとどまる．結果として，その空間を視聴しコントローラ等を通じて操作することはできても，直接触れることはできない．一方研究及びエンターテインメント分野では，ヴァーチャルリアリティ(=VR)体験の普及を背景に，視覚，聴覚に加え触覚を用いて異なる現実感への没入感を向上する取り組みが数多くなされている．その多くは，身体に触覚提示インターフェイスを装着することで，ヴァーチャル空間の環境を「触る」あるいは「触られる」，といった動作を可能にしている．結果として，バーチャル空間におけるインタラクションを，モーションコントローラから身体全体へと拡張している．このような触覚提示に基づいたアプローチは，空間コンピューティングへも適応可能だと考えることができる．”複合現実空間”の環境を，その触感がわかることでよりリアルに感じられ，自然な身体動作に基づいたインタラクションが可能になる．

---

2 <https://www.magicleap.com>

## 1.2. 本研究の目的

本プロジェクトのゴールは、空間コンピューティングにおける身体感覚を触覚提示を用いて拡張する全身インターフェイス Synesthesia Wear を開発し、デモンストレーションを通じて、複合現実空間で可能になる新たな身体インタラクションを提案することである。本プロジェクトは、繊維や複合材料を取り扱う株式会社帝人、およびメディアアートやゲームを手がけるクリエイティブカンパニー Enhance Experience, inc. との共同プロジェクトである。筆者は本プロジェクトのうち、Synesthesia Wear のデザイン、要求仕様定義、MR アプリケーション設計及び開発を担当した。

## 1.3. 本論文の構成

本論文では、第2章で xR 技術と、触覚提示に関する関連事例をあげ、そこから今後の xR 技術と触覚提示技術の向かう先を論じる。第3章では、はじめに Synesthesia Wear のコンセプトとして感覚拡張の概念について述べ、それから Synesthesia Wear で可能になる新たな空間インタラクション表現と、それを実現するためのハプティックインターフェイスに求められる機能要件について述べる。第4章では第3章で述べた機能要件に基づいた Synesthesia Wear のデザインと実装について具体的に述べる。第5章では、第3章で述べた空間インタラクション表現を実際に体験可能になる MR アプリケーションのデザインとシステム設計について述べ、これまで行ってきた展示の様子から、アプリケーション体験の中で実際に引き起こされたインタラクション表現と、その考察を述べることで、Synesthesia Wear プロジェクト全体のコンセプト実証を述べる。第6章では本研究の結論として総括と展望を述べる。

## 第 2 章 関 連 事 例

### 2.1. xR



図 2.1 xR 概観



図 2.2 The ultimate display<sup>1</sup>

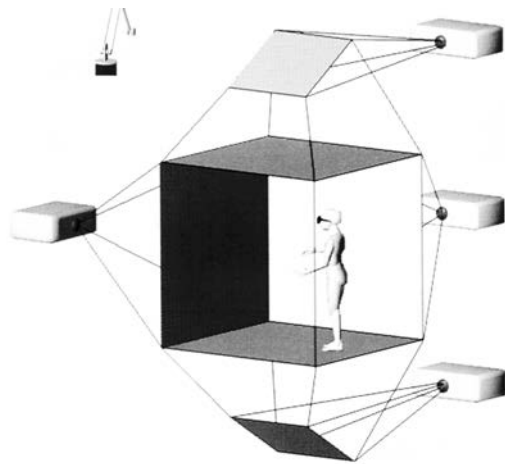


図 2.3 The Cave<sup>2</sup>

---

1 <https://www.roadtovr.com/fred-brooks-ivan-sutherlands-1965-ultimate-display-speech/>

2 [3] より抜粋



図 2.4 Google Glass<sup>3</sup>図 2.5 Microsoft HoloLens<sup>4</sup>

近年では VR や MR など，コンピュータが表現するヴァーチャルな空間を CG 像として視界に統合する技術を総称し，xR(X Reality, Extended Reality) と呼称することが一般的になりつつある．図 2.1 に xR の概観図を示す．xR においては，異なる現実空間と，我々が暮らす物理現実空間が存在し，異なる現実空間に完全に没入するものを VR : Virtual Reality, そのふたつが混ざり合った，複合現実を用いるものを MR : Mixed Reality とみなすことができる．Ivan ら [4] は初期の VR ヘッドマウントディスプレイとして The ultimate display(図 2.2) を提案しており，これは CG 像と視界が重なって表示されていた．つまり，現在で言うところの Mixed Reality のそれに近いものであった．Cruz-Neira ら [3] は空間 VR 体験装置として The Cave を提案 (図 2.3) しており，これは右目用と左目用の画像が高速に切り替わる立体視画像を立方体の空間内に投影することでデバイスを装着しない VR 体験を可能にしていた．位置センサーによって体験者の位置に基づいた映像を投影することで，体験者は空間内を自由に動き回ることさえできた．Google は [5] 頭部に装着するウェアラブルコンピューター Google Glass(図 2.4) を 2012 年に発表した．これはインターネットがもたらす様々な情報を視界に統合しハンズフリーで利用できるようにすることで，視界を通じた情報処理を拡張するもので

---

3 <https://www.google.com/glass/start/>

4 <https://news.microsoft.com/ja-jp/2016/11/29/161129-microsoft-hololens/>

あった。Microsoft は [6]2015 年、Hololens(図 2.5) を発売した際に、Mixed Reality という用語を初めて用いた。Hololens はヘッドセットの眉間中央に配置されたマイクロ液晶ディスプレイの映像をミラーとホログラフィック映像素子を駆使して左右の眼前に導き、ハーフミラーに投影することで CG 像を視界に重ねている。同時にヘッドセットに搭載された 4 台のカメラを用いてヘッドセットの位置を 6 自由度で把握することができる。これらを組み合わせ着用者の動きに応じて CG 像を動かすことで複合現実を実現していた。同様の手法で複合現実を実現するデバイスは、Hololens 以降複数発売されており、2018 年に Magic Leap [7] が発売した Magic Leap One は、より高い解像度と視野角を備え、空間コンピューティングという用語を初めて用いるとともに、このような MR グラスを初めて一般に販売した。Nreal は [8] スマートフォンと接続することで、軽量で快適に装着できる MR グラス、Nreal Light(図 2.6) を発表した、また、高繊細ディスプレイと 2 眼カメラを備えた VR ヘッドセットを用いて MR を実現する Varjo XR-1(図 2.7) などがある。

図 2.6 Nreal Light<sup>5</sup>図 2.7 Varjo XR-1<sup>6</sup>

## 2.2. 触覚提示

---

5 <https://www.nreal.ai>

6 <https://varjo.com/products/xr-1/>

7 <https://synesthesia-suit.com>

図 2.8 Synesthesia Suit<sup>7</sup>

触覚提示の研究は古くからなされており，Thomas ら [9] は指先に対して力触覚提示を行う The PHANTOM Haptic Interface を提案している．Sato は [10] 力覚提示ディスプレイ SPIDAR を提案し，バーチャルな物体を押し込む触感の提示を 3D モデリングに応用した．Iwata ら [11] は卓上で用いる力覚提示ディスプレイを提案し，バーチャルな物体の重さや硬さの提示を可能にした．振動子を用いて触覚提示を行う例としては，CyberGlove Systems 社 [12] による指先と手のひらに振動子を取り付けて触覚提示を行なうグローブ型デバイス CyberTouch(図 2.9) がある．同社は同様のグローブ型デバイスとして力覚提示を行う CyberGrasp [13] も提案している．振動触覚を用いた研究としては，Minamizawa ら [14] によってボイスコイルアクチュエータとアンプの組み合わせからなる触感の記録，再生を行う TECHTILE Toolkit(図 2.10) が提案されている．これらの振動触覚提示技術においては，触感を音声信号として扱うことで波形の時間パターンの変化をデザインすることができる，このようにデザインされた触感は，従来のモーターによる単純な振動やその強弱だけの提示にはない，ざらざらやボコボコなど，リアルな

図 2.9 Cyber Touch<sup>8</sup>図 2.10 TECHTIE Toolkit<sup>9</sup>

質感を再現可能にしている。また、触覚提示の研究は複数点の刺激による空間パターンデザインの議論も数多くなされている。Ali ら [15] は Surround Haptics にてボイスコイルアクチュエータを複数ならべ、連続して振動させることで触感の移動感を提示する Apparent tactile motion [16] や、2つの振動子から同時に刺激を行うことで、その間にバーチャルな振動を感じる Phantom tactile sensation といった、触覚の錯覚を用いた提示手法 [17] によって、空間における触感の移動感を提示している。さらに、複数の振動子をグリッド状に配置した椅子で背中へストローク提示を行い、提示される触覚イベントから想起される表現を触感の辞書として定義している [18]。

全身に触覚を提示する研究としては、Konishi ら [20] はゲーム会社 Enhance, Inc. との共同研究の中で全身触覚スーツ Synesthesia Suit を提案している。(図 2.8) これは、スーツに封入された 26 個の触覚振動子が同社が開発する VR ゲーム Rez Infinite の映像、音楽体験を全身に振動触覚として提示することで、視覚、聴覚、触覚に跨る共感性と没入体験を実現していた。ゲームと連動する全身触覚インター

---

8 <http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch/>

9 <http://www.techtile.org/techtiletoolkit/>

10 <https://teslasuit.io>

11 [19] より抜粋

図 2.11 Tesla Suit<sup>10</sup>図 2.12 ForceJacket<sup>11</sup>

フェイスの例として、振動と温度提示、およびモーションキャプチャの機能を備えた TeslaSuit(図 2.11) [21] は、すでにクラウドファンディングを通じて出荷を行っている。同様の、全身に触覚提示を行う提案は近年増加しており、Delazio ら [19] はジャケットに封入した複数のエアバッグを用いて、圧迫による力覚提示と振動触覚提示を行う Force Jacket(図 2.12) を提案している。この研究では、このような触覚デバイスを様々なコンテンツに適用する上で、デザイナーが容易に触覚提示をデザイン可能になる Haptic Effect Editor も提案し、これらを用いることで VR 空間における没入感が向上したことを報告している。Hashizume ら [22] は音楽視聴体験の拡張を目的としたウェアラブルインターフェイス LIVE JACKET(図 2.13) を提案しており、ジャケットに搭載された複数のスピーカーを用いて音楽をライブ会場で楽しむような体験を実現している。Mizuguchi ら [23] は、Synesthesia Lab の取り組みのなかで、44 個の触覚振動子からなる椅子を通じて全身に音楽と連動した全身触覚提示を行う Synesthesia X1-2.44 を提案(図 2.15)している。ANREALAGE, Rizomatiks, ダイアログ・イン・ザ・ダークのコラボレーションによるエコーウェア [24] は、服に搭載したセンサーがモノとの距離を受信して振動を提示することで、暗闇でも振動からモノとの距離を理解する体験を提案している。Foo ら [25] は SMA(Shape memory alloy : 形状記憶合金) を用いることで締め付け感を提示できるハプティックベスト(図 2.14) を提案しており、触覚提示を通じてまるで抱きしめられたような暖かさ、安心感が想起できることを確認している。都市空間とのインタラクションを目的とした全身触覚インターフェイスとしては Brueckner



ら [26] の EmbodiSuit(図 2.16) がある。場所，人，都市，天候などのデータが IoT システムと紐づき，EmbodiSuit は振動モジュールを通じてその情報を着用者に伝えることができる。



図 2.13 LIVE JACKET<sup>12</sup>



図 2.14 SMA を用いたハプティックベスト<sup>14</sup>

## 2.3. 本章のまとめ

ここまで述べたように，VR，MRをはじめとする xR 技術はより高繊細，高密度に異なる現実空間を提示することで，高い没入感を実現する技術が提案されてきた，また，複合現実を用いた MR の技術は近年急速に発展しており，特にハンズフリーで利用可能なものや，空間を自由に利用できるものなど，日常生活に溶け込み身体動作を妨げないことを目的としたデバイス設計が多くみられる。触感

12 [22] より抜粋

13 [25] より抜粋

14 <https://enhance-experience.com/synesthesia-lab>

15 [26] より抜粋

図 2.15 Synesthesia X1-2.44<sup>15</sup>図 2.16 Embodisuit<sup>16</sup>

提示の研究は指先など，一部分への力覚や振動提示によるものからはじまり，手への提示，そして全身へと，触覚提示の位置を拡大することでその体験を拡張してきた。また，触感提示の時間パターンをデザインして質感提示を実現する研究や，提示部位を複数点にして触覚の空間パターンをデザインする研究がなされてきた。今後，xR 技術と触覚提示技術が統合されることで，複数の現実空間をリアルに感られ，様々なインタラクションを可能にする体験が作られていくと考えられる。

# 第 3 章

## コンセプトデザイン

### 3.1. 感覚拡張

我々は現実空間で身体全体を使って様々なインタラクションを行なっている。手を使ってハンドルを回す、足で椅子を引く、棚を引き出し、かがんで物をとる。このような、我々が常日頃行なっている身体全体を用いたインタラクション表現を可能にしているのは、五感を活用しているからに他ならない。特に視聴覚、そして触覚を用いて空間を認識することが非常に重要となる。これと同様に、空間コンピューティングにおけるインタラクション表現を、身体全体を用いたものに拡張するためには、複合空間を視聴覚、そして触覚を用いて認識することが求められる。図 3.1(a) に、人間の皮膚周辺を拡大した図を示す。皮膚内の触覚受容体は、

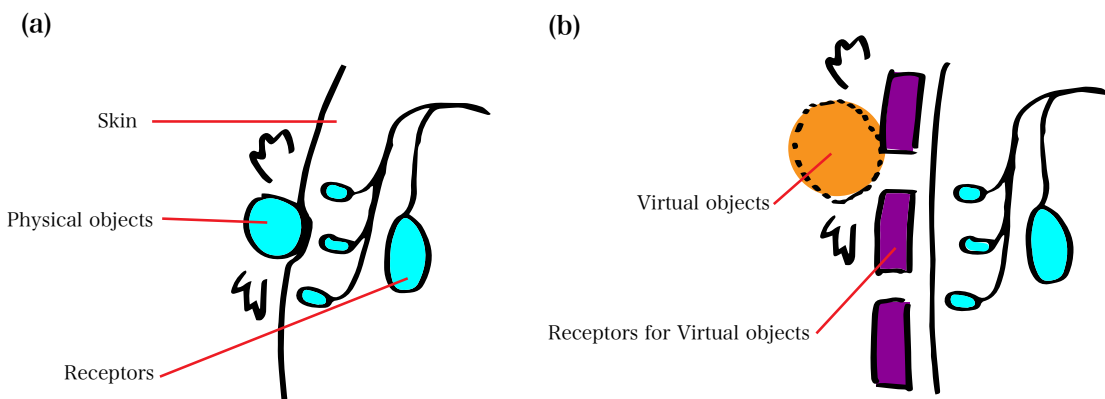


図 3.1 (a) 触感を提示する皮膚, (b) 複合現実空間の触感を提示する新たな受容体  
現実空間の物体が皮膚に触れたり風が触れたりすると、その触感を身体そして脳に伝える。このとき、身体と現実空間との触覚的界面は皮膚である。これに加え



て、複合空間を触覚的に認識するために、身体と複合空間との触覚的界面を定義する。図 3.1(b) は皮膚の上に、新たな触覚受容体が重なっている。これらの受容体は複合現実空間の物体が触れたりすることで、その触感を皮膚内の触覚受容体に伝える。これを身体全体に拡張すると図 3.2 のようになる。空間に配置された複合現実空間のための受容体が、身体の上に分布していれば、皮膚を通じて現実空間を認識するのと同様にこれらの受容体を通じて複合空間を身体的に認識することができる。このとき、身体と現実空間との触覚的界面が皮膚であるとしたら、

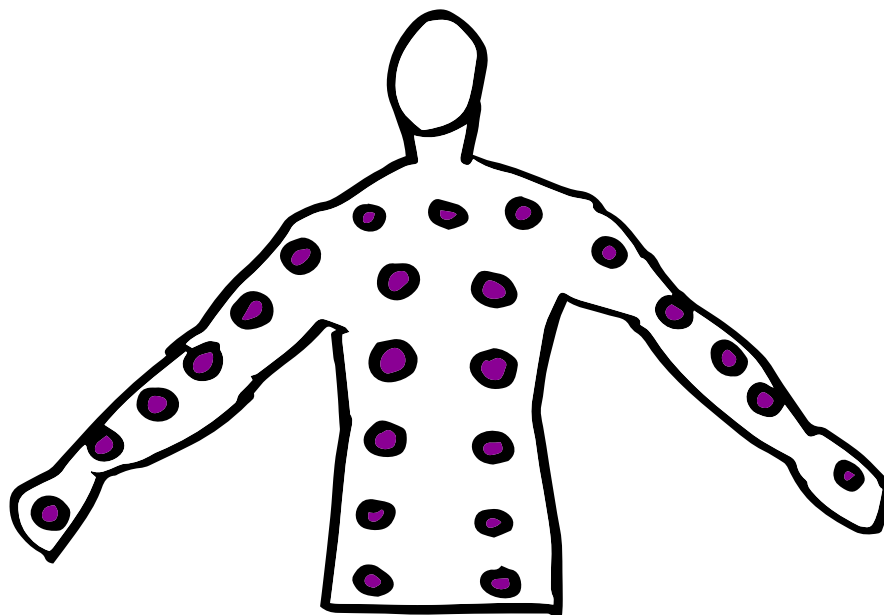


図 3.2 全身に分布する複合現実触覚受容体

身体と複合現実空間との界面は服ではないだろうか。皮膚上にある触覚受容器が現実空間の触感を伝えるならば、複合空間と統合された衣服が新たな受容器として振る舞えば、我々は触覚を用いてどちらの空間も理解し、身体全体でインタラクションを行うことができる。これが本研究 Synesthesia Wear のコンセプトである。本研究における感覚拡張とは、Synesthesia Wear を用いて 使用者の触覚を現実空間と複合空間にまたがって拡張し、空間におけるインタラクション表現を拡張することである。複合空間はコンピューターによって 3次元の CG として表現されるため、現実空間に存在する物理的な制約が存在しない。結果として、複合空間

に存在する様々なオブジェクト、環境、コンテンツは必ずしも現実空間の模倣ではなく、より多様なデザインの幅を持つことができる。よって Synesthesia Wear の着用者は、現実空間では本来不可能なはずの、空間との多彩なインタラクション表現が可能になる。

## 3.2. 全身を用いた空間インタラクション表現

ここでは、複合空間に存在する様々なオブジェクト、環境、コンテンツを触覚を伴って感じられるようになったとき、どのような空間インタラクション表現が可能になるか挙げる。まず、図 3.3 に手や腕を用いたインタラクション表現を示す。図中のオレンジの物体は複合空間におけるオブジェクトを表す。ここでは、図 3.3(a) に現実空間で通常行うようなつかむ、押すといったインタラクションを示しており、同様のインタラクションを複合空間に対しても行うことができる。それに対して、図 3.3(b) は物体の内部に腕を突っ込んだり、物体をまるで風船のように抱き寄せたりといった、複合空間特有の表現を示している。次に、全身を用いたインタラクション表現を図 3.4 に示す。同様に、図 3.4(a) に示したインタラクションは抱く、背負うといった現実空間、複合空間の両方で可能である。それに加え、触感を伴った領域・境界が複合空間に存在していると、全身を用いた空間インタラクション表現を大きく拡張することができる。図 3.4(b) に示す通り、その領域に歩いていたり、あるいはより小さな領域に、上半身だけを屈んで入れたりすることができる。体の一部分をあてれば、そのオブジェクトの振る舞いによって押すことができたり、体の一部分を浸す(=つける)こともできる。手や腕を用いたインタラクション表現から発展して、オブジェクトを体内に取り込んだり、体を貫通させることも可能になる。

## 3.3. 全身触覚インターフェイスの必要要件

感覚拡張を実現する全身触覚インターフェイスを実装するために、備えるべき機能として以下のようなものが考えられる。

### 触覚提示の空間解像度

前述した空間インタラクション表現を行うためには、複合空間オブジェクトが身体に接触したときに、身体のどこに接触したかを理解する必要がある。そのために、インターフェイスは触覚提示を複数の位置に、それも身体全体を覆う十分な数提示することが求められる。

### 触覚提示の触感バリエーション

現実空間に存在するオブジェクトが非常に多様な触感をもつように、複合空間のオブジェクトも多様な触感を持ち、それを区別できることが重要である。そのため、複数種類の触感を遅延なく提示できることが求められる。

### 空間移動への制約

全身を用いた空間インタラクション表現の中には、歩いたり、身体を大きく動かしたりといった動作が含まれる。電源や通信経路の確保といった技術的制約によってケーブルがインターフェイスにつながることはこれらのインタラクションを行う上で大きな制約になる。そのため、ワイヤレスで動作し、空間内の歩行や身体動作を妨げないことが求められる。

### 身体動作への制約

前述した通り、本研究で開発を目指す全身触覚インターフェイスは、触覚受容器として振る舞う服である。多くの触覚インターフェイスのような、複雑なベルトや重たい機器を通じて着用するデバイスは”服”にはなり得ない。そのため、見た目、装着方法、着心地は従来の衣類のそれに近いことが求められる。

## 3.4. 本章のまとめ

本章では、本研究における Synesthesia Wear を用いて触覚を現実空間と複合空間にまたがって統合し、空間におけるインタラクション表現を拡張する感覚拡張のコンセプトを説明した。このコンセプトを、皮膚に連なる触覚的界面としての服として実装することで、新たな空間インタラクション表現が可能になる。また、

この手，腕，身体全体で可能な空間インタラクション表現について論じ，現実空間と複合空間の両方で可能なものと，複合空間でのみ可能なものに分類した．さいごに，これらのインタラクションを実現するうえで，Synesthesia Wear に服型触覚インターフェイスとして要求される技術的要件についてもまとめた．次章では，この要件に基づき，Synesthesia Wear のデザインと，実装について具体的に述べる．

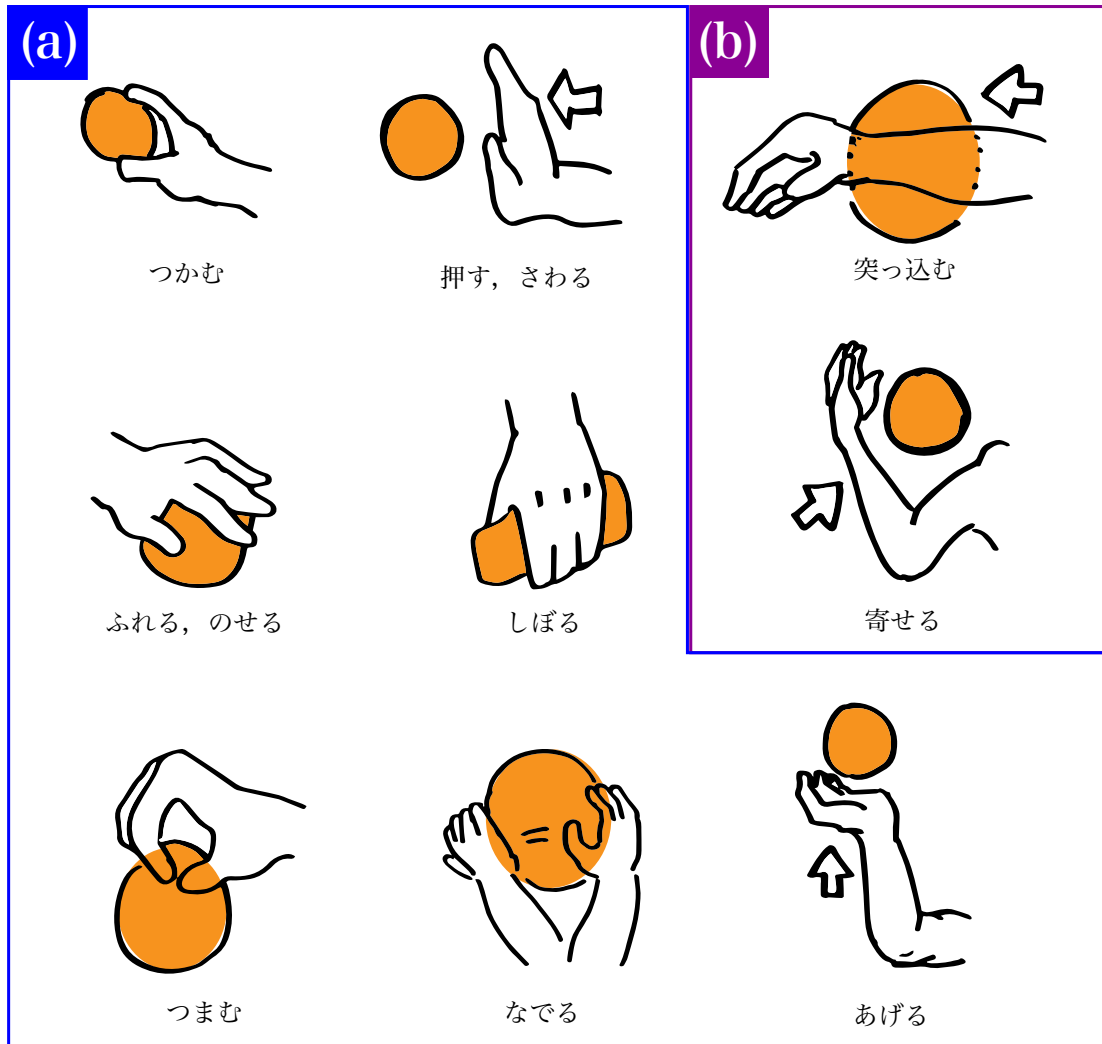


図 3.3 手・腕を用いた空間インタラクション表現 (a) 現実・複合現実で可能なインタラクション, (b) 複合現実で可能なインタラクション

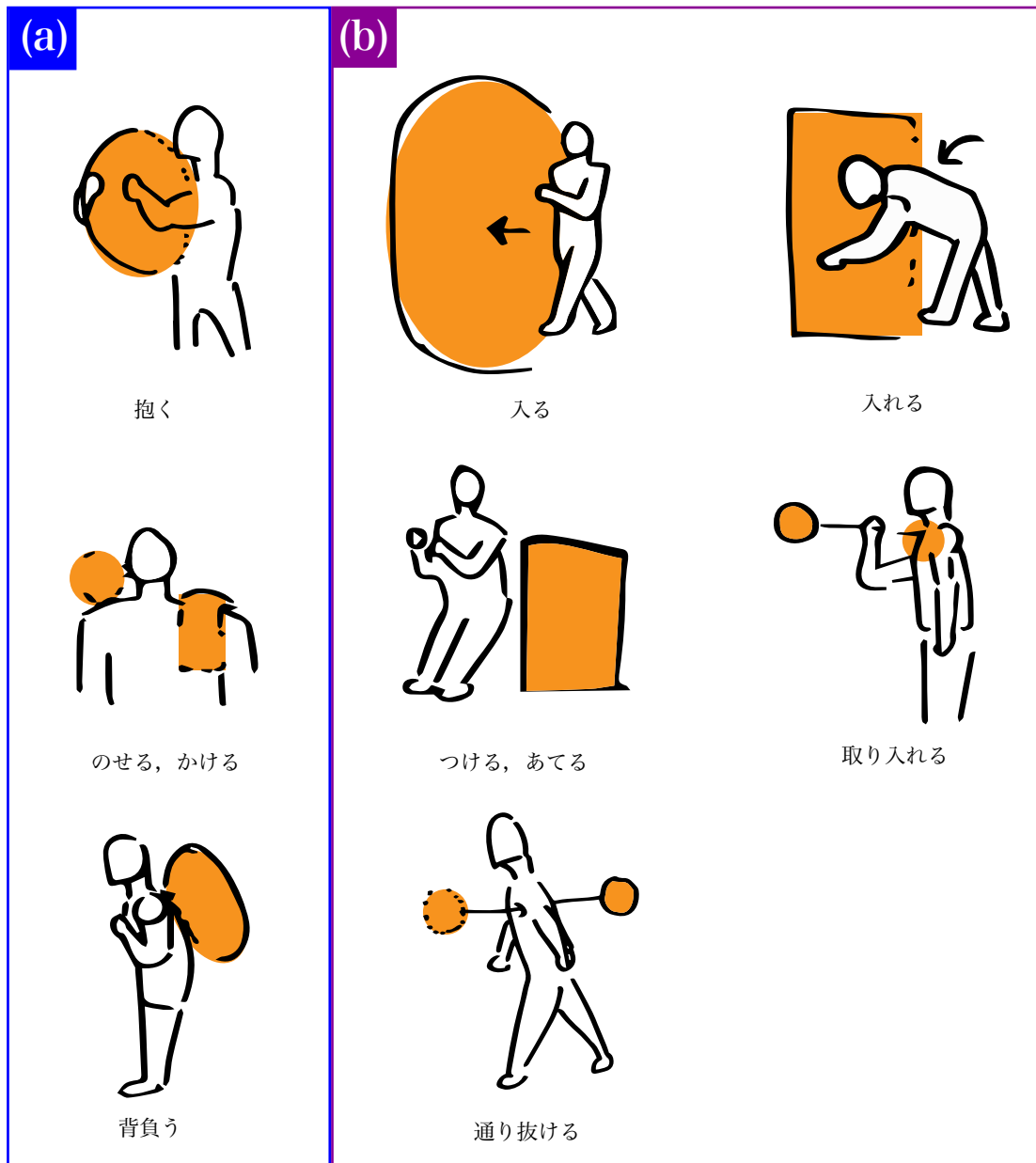


図 3.4 全身を用いた空間インタラクション表現 (a) 現実・複合現実で可能なインタラクション, (b) 複合現実で可能なインタラクション

## 第 4 章

# Synesthesia Wear 開発

### 4.1. 触感提示の配置案

第 3 章において, Synesthesia Wear に求められる機能要件として触感提示の空間解像度が重要であると述べた. 一方で, 人間が触感の位置を分別できる空間分解能は背中ですら 12.5mm [27] ほどであり, これに従うと, 膨大な数の触感提示が必要となる. 触感の提示を行うにはハプティックモジュールが必要となり, 膨大な数のモジュールは身体動作を妨げたり, 技術的な制約になりかねない. そこで, Synesthesia Wear をデザインするにあたり, 身体全体で複合空間を認識する上で十分な空間解像度をもちながら, 触感提示の数を最小化する数および配置について検討する.

この配置案を, 図 3.3 で示した空間インタラクション表現に基づいて設計する. 例えば, ”突っ込む”の動作では触感を伴った複合空間オブジェクトに腕を突っ込んでいく, このとき触感は手から腕へと, 腕を動かす速さに比例し触感の流れとして感じるはずである. 同様の触感移動感を図 3.4 で示したインタラクションでも感じられるはずであり, 例えば”入る”の場合, 身体前面から背面へ触感が流れてゆく. すなわち, 身体全体で様々な触感移動感を提示できる最小の触感提示の数及び配置について検討することで, Synesthesia Wear のハプティックインターフェイスとしての要求仕様を定義できると考えることができる. Ali らは複数のボイスコイルアクチュエータを背中や腕に配置し, 刺激を Stimuli onset asynchrony(SOA) という, 刺激を行う時間差パラメータに従って提示することで, 触感の移動感(=Apparent tactile motion)を生成できる [16] としている. Synesthesia Wear における触感移動感 は身体を動かす速さに比例した速さで提示されるため, SOA は非常に早くも

遅くもなりうる。そこで、Aliらの手法を参考に、触感移動が最も遅く(SOAが長い)、かつ触感移動が最も早い(SOAが短い)、すなわち触感移動感のスピードが最も幅広い配置案について検討を行った。

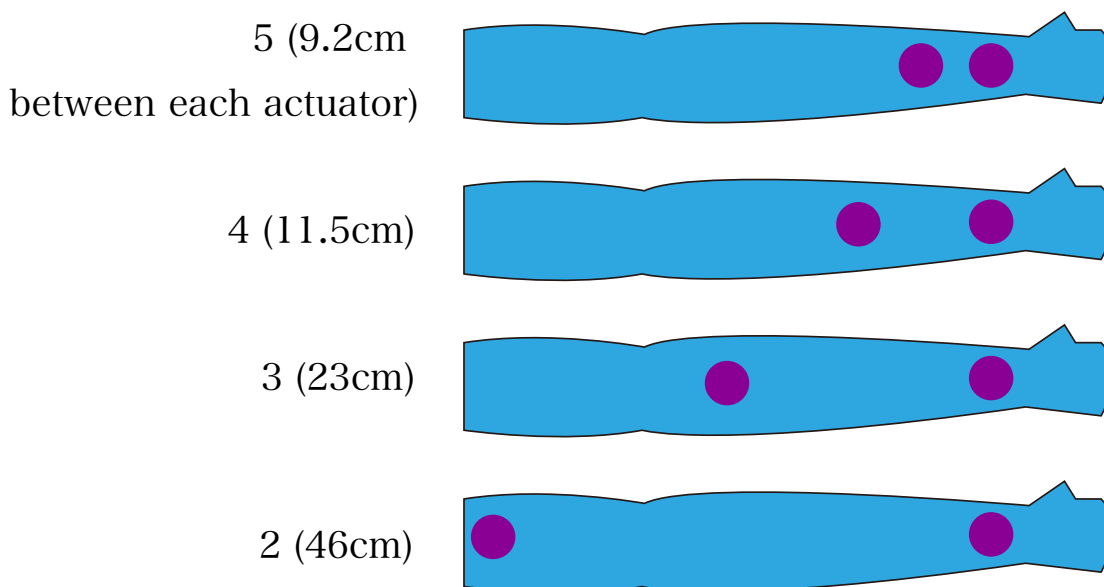


図 4.1 触感提示の配置パターン検討

図 4.1 に検討した触感提示の配置案を示す。今回、代表的な身体部位として腕を選び、腕に等間隔に 2 個から 5 個配置することを想定して、2 つの振動子の間隔を変化させながら配置した。これら 5 つの配置パターンで、触感流れ感を感じることができる最速の SOA と最遅の SOA を、筆者自身の体感で求めた。体感中の様子を図 4.3 に示す。触感の提示には振動触覚を用い、触覚振動子として Foster 製バイブレーションアクチュエータ 602760(図 4.2) を用いた。提示する振動は、アクチュエータの最大共振周波数が 100Hz 前後であったことから、100Hz の Sin 波を 120[ms] をアクチュエーターに提示した。実験構成図を図 4.4 に、実験に用いた Max スクリプトを図 4.5 に示す。各配置案について、SOA を徐々に長くしながら流れ感を確認し、触感の流れを感じなくなった時点での SOA を記録した。同様の操作を、SOA を徐々に短くする方向についても実施し、記録を行なった。この記録を表 4.1 に示す。SOA は振動子間の刺激提示の時間差として理解することがで





図 4.2 Foster 製バイブレーションアクチュエータ 602760

きるため、触感の流れ感速度を表すために (振動子感の距離 [cm]/計測 SOA[ms]) して触感流れ感速度 [mm/ms] になおす。これを表 4.2 に示す。表 4.2 をみると、早い触感流れについては 2 個配置を想定した 46cm 間隔が最も早く、ゆっくりとした遅い触感流れ感には 5 個配置を想定した 9.2cm 間隔が最も遅かった。しかし、ここで考慮すべきは本実験では各配置を想定して 2 個の振動子を配置しており、実際の 5 個配置には 2 個配置など、より少ない配置数が内包される。従って全ての配置案について、2 個配置の触感流れ感を提示できると考えることができる。遅い触感流れ間について検討すると、5 個配置と 4 個配置は速度の差が 0.015[cm/ms] 程度と非常に小さいのに対し、4 個配置に対する 3 個配置は倍近く加速してしまっており、表現の幅が狭い。このことから、これらの配置案のうち、4 個想定 11cm 前後の密度が、触覚提示の数を最も少なくしながら多彩な触感流れ感を表現できると考えることができる。

この体感結果に基づいて、触覚提示を衣服を通じて行う際の提示位置案を作成した。図 4.6 に示す。腕に対しては 10cm 程度の間隔で配置し、身体前面、背中部分には 10cm 四方に並べた 4 つを面のように配置した。触感提示個数は 32 個であり、この案が、Synesthesia Wear がハプティックインターフェイスとして最低限満たすべき触覚提示の空間解像度となる。次項では、この配置案に基づいた触感



図 4.3 配置案を体感中の様子

提示を行うハプティックインターフェイスについて、具体的な実装方法とその技術について述べる。

## 4.2. 2次元通信

ウェアラブルインターフェイスを実装するうえで、様々な設計手法が存在する。既存の全身触覚インターフェイスは振動子を衣服の中に封入し、それに接続するケーブルを衣服内側に這わせることで、振動子を身に纏うことができる。また、衣服の布地の上に電子回路をプリントする試みも多くの事例を見ることができるが [28]，そのほとんどが衣服の上に多数の個別の信号線を形成するアプローチである。一方で，Noda らは二次元通信と呼ばれる技術をウェアラブルインターフェイスの実装に適応した [1]。二次元通信は導電テキスタイル，すなわち導電する布，を伝送路としてセンサやアクチュエータなどの素子に給電し通信する手法である。布地の上に電子回路をプリントする手法は，衣服に固定された素子間を接続する個別の導電パターンが布の上に構成されており，通常のプリント回路基板の構造

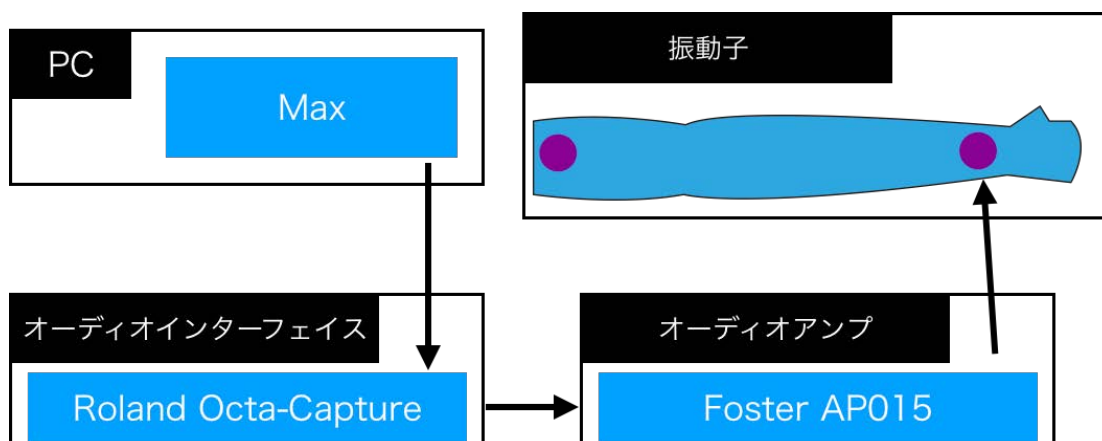


図 4.4 実験構成

表 4.1 各配置における最短 SOA, 最長 SOA

|               | 流れを感じる最短 SOA[ms] | 流れを感じる最長 SOA[ms] |
|---------------|------------------|------------------|
| 9.2[cm](5 個)  | 43               | 323              |
| 11.5[cm](4 個) | 70               | 256              |
| 23[cm](3 個)   | 84               | 263              |
| 46[cm](2 個)   | 118              | 240              |

と本質的に同じと言える。また、布の皺・折れ曲がりや導電性の毛羽立ちの発生により、近接した導体パターン間で短絡を生じやすいといったリスク要因が存在する。一方で2次元通信は回路基板というよりは1本のケーブルに相当する役割を果たし、短絡、断線の危険性が大きく低減され、インターフェイス設計において衣服、そこに取り付けるモジュールを個別に設計可能になるといった恩恵がある。2次元通信に基づいてインターフェイスを設計する場合、小規模な電子回路をピンバッジのように衣服上の任意の位置に取り付けるだけで接続が完了し、個別の配線なく給電と通信が可能になる。電源は導電テキスタイル全体に給電し、各素子はバッテリーレスで伝送路からの給電を受けて動作できる。またデータの伝送もこの伝送路を介して行うことができる。このように、典型的な有線あるいは無線接続方式にはない特徴を有しており、この導電テキスタイルを用いて衣服を仕

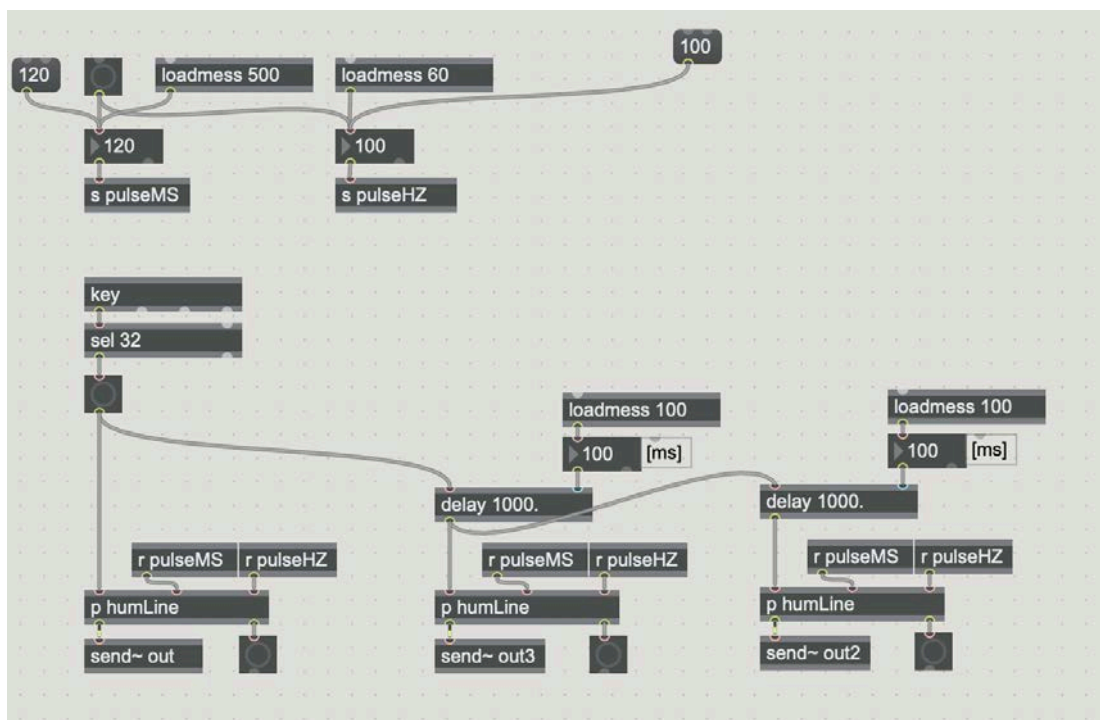


図 4.5 Max スクリプト

立てることで、見た目や装着方法、着心地を従来の衣服に近いウェアラブルインターフェイスを実装できる。図 4.7 に、導電テキスタイルの写真を示す。テキスタイルは絶縁体である中間層に対して、表と裏それぞれ全面にわたり一様な導電性のパターンを形成し、互いに絶縁されているこれら 2 面の間に電圧を印加して電力およびデータを伝送する。図 4.8 に示すように、導電パターンはすべて同電位にあり、導電テキスタイルに取り付ける回路モジュールは 2 面に対しそれぞれ接触導通するように、刺して固定され、任意の位置で同一の信号を受信できる。本プロジェクトでは、第 3 章で述べた必要要件、特に空間移動への制約と身体動作への制約への要求を満たすためにこの 2 次元通信技術を用いた。専用設計したハプティックモジュールを導電テキスタイルに取り付けることで、様々な位置に触感を提示し、多彩な触感のバリエーションを実現することができる。

本プロジェクトでは電力供給とデータ伝送を同じ伝送路を用いて行うために、周波数分割多重化 (FDM) 方式によって連続的な直流給電とデータ通信を同時に行

表 4.2 各配置における最速・最遅触感流れ感

|              | 触感流れ感の最高速度 [cm/ms] | 触感流れ感の最低速度 [cm/ms] |
|--------------|--------------------|--------------------|
| 9.2[cm](5個)  | 0.214              | 0.028              |
| 11.5[cm](4個) | 0.164              | 0.045              |
| 23[cm](3個)   | 0.274              | 0.087              |
| 46[cm](2個)   | 0.390              | 0.192              |

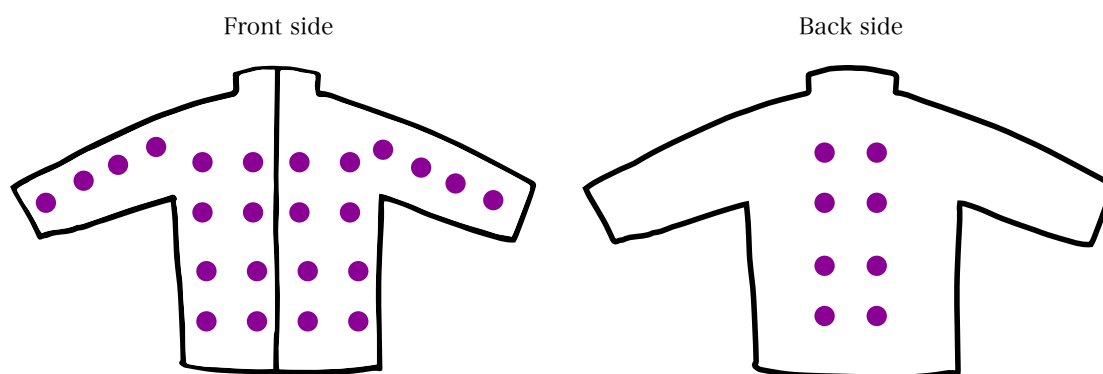


図 4.6 Synesthesia Wear 触感提示配置案

う。また、通信用のシリアル伝送方式として、Philips 社が開発したマイクロコントローラと周辺 IC との接続に広く使用されている Inter-Integrated Circuit( $I^2C$ ) 通信方式 [29] を採用した。次項では、2次元通信技術と導電テキスタイルを用いた衣服部分の設計、ハプティックモジュール設計、 $I^2C$  通信を用いた通信仕様設計について述べる。

### 4.3. 2次元通信に基づいた Synesthesia Wear 設計

#### 4.3.1 システム構成

ここでは、2次元通信に基づいて設計した Synesthesia Wear のシステムについて述べる。図 4.9 にシステム構成図を示す。Synesthesia Wear を空間コンピューティングを実施する様々な機器、すなわち MR ヘッドセットや VR ヘッドセット、



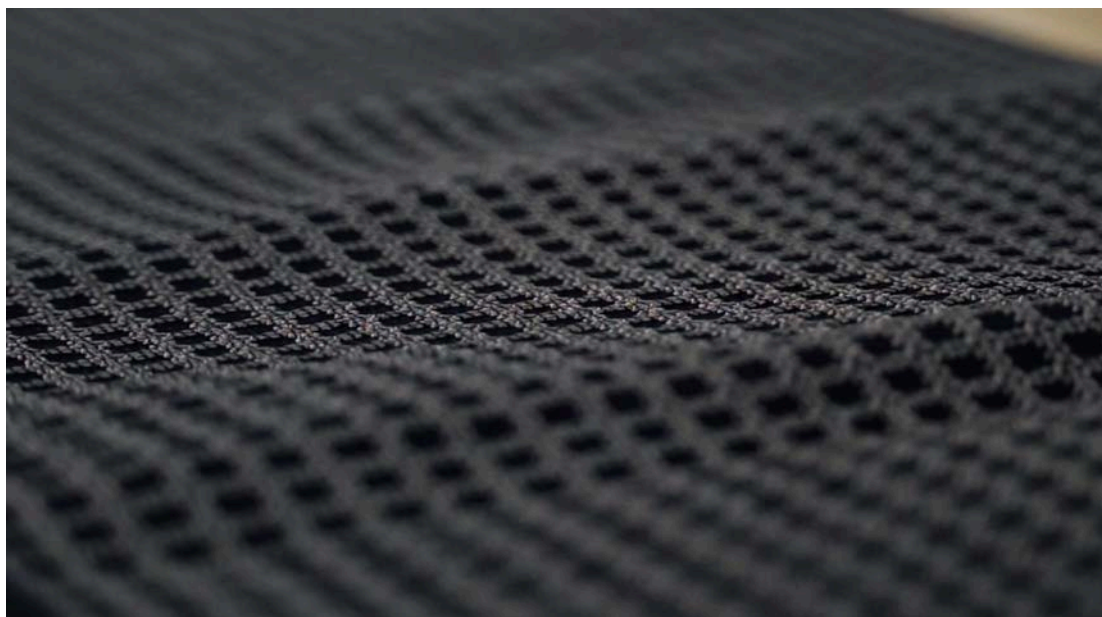


図 4.7 導電テキスタイル

スマートフォン等からコントロール可能にするため、Bluetooth通信によってコンピュータやスマートフォン等の制御器から通信が行われる。2次元通信ウェアの背中部分に取り付けられた Master モジュールが Bluetooth 制御信号を受け取り、2次元通信ウェアを伝送路とした I<sup>2</sup>C 通信を用いて各ハプティックモジュールにコマンドを送信する。すなわち、ウェア上に取り付けられた複数のハプティックモジュールは全て同様のコマンドを Master モジュールから受け取ることになる。ハプティックモジュールはコマンドに基づいて LED の点灯処理とアクチュエータの振動処理を行う。

### 4.3.2 2次元通信ウェア

ここでは、導電テキスタイルを用いて制作したウェアについて述べる。図 4.10 に、作成した2次元通信ウェアの外観を示す。Synesthesia Wear の2次元通信ウェアは3層構造になっており、導電テキスタイルで構成された通信層、着やすさの向上と汗による短絡防止を目的としたインナー層、外部の水分からモジュールを

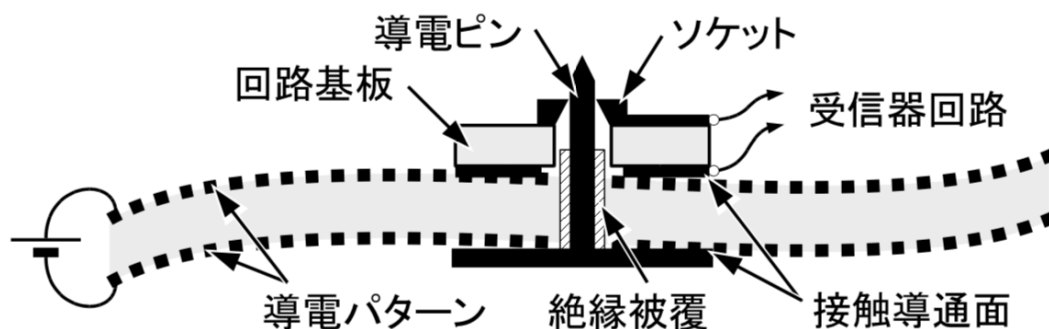


図 4.8 テキスタイルの両面で行う接触導通 ( [1] より抜粋)

保護することを目的としたアウター層からなる。通信層には様々なモジュールが取り付けられるため、脱ぎ着する際には引っかかりが生まれてしまう。そのためインナー層はすべりのよいナイロン系テキスタイルで構成し、汗などの水分を遮断すると同時に脱ぎ着しやすさを確保している。アウターには防水性を確保するとともに、ハプティックモジュールに搭載されたLED点灯による光を遮断しないよう、半透明なフィルム生地で構成し、フィット感の向上のため裾にドロコードを備えた。また、ハプティックモジュールが着用者の身体に密着することで触感の提示を明確に行うことができ、そのために2次元通信ウェアを複数サイズ(M, L, LLサイズの3種類)制作し、着用者の身長や体系に応じて最適なサイズを選択可能とした。

### 4.3.3 2次元通信ハプティックモジュール

ここでは、2次元通信に基づいて制作したハプティックモジュールについて述べる。図4.11に、作成したハプティックモジュールの外観を示す。ハプティックモジュールは2つのパーツで構成されており、LEDと接続用のピンを備えた上部パーツ、制御用CPU、ROM、アクチュエーター用アンプが搭載された回路基板と実際に振動触覚を提示するハプティックアクチュエーターからなる下部パーツで構成される。それぞれのパーツには導電面があり、この面が導電テキスタイルに

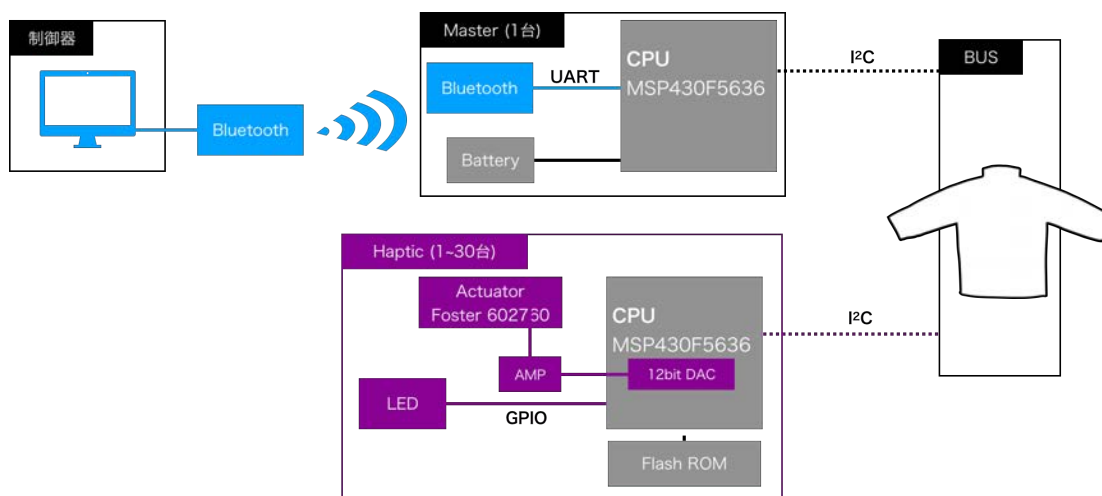


図 4.9 Synesthesia Wear システム構成

密着することで配線が完了する。結果として、図 4.12 に示すようにピンバッジのように導電テキスタイルに取り付けることが可能になる。パーツ構成を図 4.13 に示す。ハプティックアクチュエーターは Foster 製バイブレーションアクチュエーター 602760 を用いた。また、重量は約 50[g] である。寸法を含めたモジュールの外装設計図を図 4.14 に示す。

ハプティックモジュールにはマスターからコマンドを受信し、そのコマンドを処理して振動による触感の提示、LED の点灯を行う。ここでの触感データは音声信号であり、Flash ROM にはこの音声信号データと LED の点灯パターンデータが格納されており、コマンドが指示するデータを再生する。Flash ROM は 16Mbyte の容量があり、64Kbyte 分割された 256 のセクタに分けられて管理されている。各データの格納方法を図 4.15 に示す。データ領域の最初のセクタには管理領域が設定されており、ここには通信においてハプティックモジュールを固有に識別可能にするユニークなグループ ID とノード ID からなる  $I^2C$  アドレス、格納されている触感データと LED 点灯パターンデータの個数、各触感データ長などが格納されている。触感データは 8kbps, 16bit, モノラルの音声信号データを作成し、保存する。





図 4.10 (a) 導電テキスタイルウェア, (b) インナー, (c) アウター

#### 4.3.4 通信仕様

ここでは、各ハプティックモジュールを制御するための通信仕様について述べる。

##### $I^2C$

各モジュールへの個別のコマンドは、 $I^2C$ によって各モジュールに送信され、制御される。表4.3に $I^2C$ 通信フォーマットを示す。ここでは、前述したFlash ROMに保存されている触感データとLED点灯パターンデータに割り当てられたセクター番号に対応して触感IDとLEDパターンIDを設定する。1byteの $I^2C$ アドレスは、上位4bitをグループID、下位4bitをノードIDとして割り当てる。Masterモジュールからこのコマンドが導電テキスタイルを通じてハプティックモジュールに送信され、各ハプティックモジュールは自身の $I^2C$ アドレスに基づいて指定された触感データとLED点灯パターンの再生を行う。

##### PC制御フォーマット

前述した通り、実際の制御はPC等の制御器からBluetoothを通じて行う。今回、Bluetoothアンテナを持たないPC等からの制御を簡便に行うために、シリアル通信をインターフェイスとしたBLE接続コマンド基板を実装した。その外観を

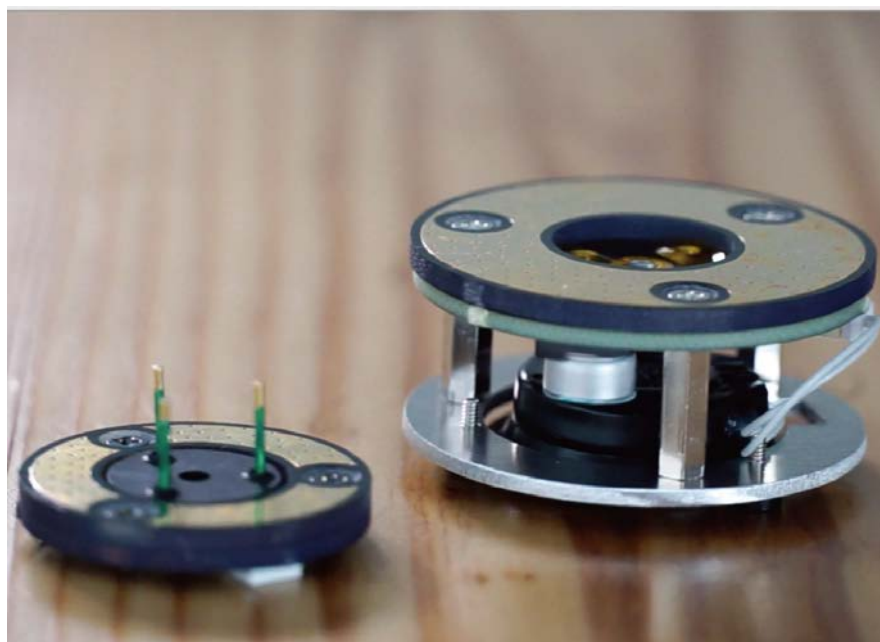


図 4.11 ハプティックモジュール外観

図 4.16 に示す。この基板は USB 接続により PC と接続され、シリアル通信を介して受け取ったコマンド情報を Master モジュールに無線送信する。表 4.4 にシリアル通信制御フォーマットを示す。複数台のモジュールをグループ化して管理するグループ ID、各モジュールにユニークに割り当てられるノード ID を用いて通信を行う。この制御フォーマットに従い、各値をカンマ区切り文字列で送信する。

一方で、本プロジェクトで用いる MR ヘッドセット Magic Leap One は USB インターフェイスを備えておらず、コマンド基板と直接接続することができない。従って、ローカルエリアネットワーク (LAN) 越しにこのシリアル通信を送信可能にする必要がある。そこで、新たに OSC 入力インターフェイスを備えたミドルウェアを実装した。この OSC インターフェイスを用いた際の PC 制御構成図を図 4.17 に示す。ミドルウェアは OSC 受信サーバーを起動し、受信した OSC メッセージをシリアル通信制御フォーマットに読み替えて接続されたコマンド基板に送信を行う。Magic Leap One のみならず、LAN 内の機器から簡便に各ハプティックモジュールが制御可能になった。



図 4.12 ハプティックモジュール：取り付けの様子

#### 4.4. 本章のまとめ

本章では Synesthesia Wear のコンセプトを実現する上で必要な、触感提示を行う位置、および個数を体感実験を通じて検討し、要求仕様を定義した。2次元通信技術に基づいたウェアラブルインターフェイスの設計と実装を行い、ハプティックモジュール設計、および通信方式の策定について述べた。また、ハプティックモジュールを Magic Leap One といった MR ヘッドセットからコントロールするためのミドルウェア実装について述べた。

図 4.18 に 26 個のハプティックモジュールを装着した Synesthesia Wear を示す。また、アウター層を取り外した場合を図 4.19 に示す。Synesthesia Wear は導電テキスタイルと、位置と数をカスタマイズ可能なハプティックモジュールを用いて実装したことで、完全にワイヤレスに動作し、着用者は空間を自由に歩き回ることができる。また導電テキスタイルは非常に柔軟で通常のようなインターフェイス設計を可能にし、見た目、装着方法、着心地は通常の服のそれに近く、身体動作への制約を最小限に留めることができた。また、前述した触覚提示の空間解像度についても、最大で全身に 32 個のハプティックモジュールを装着して動作

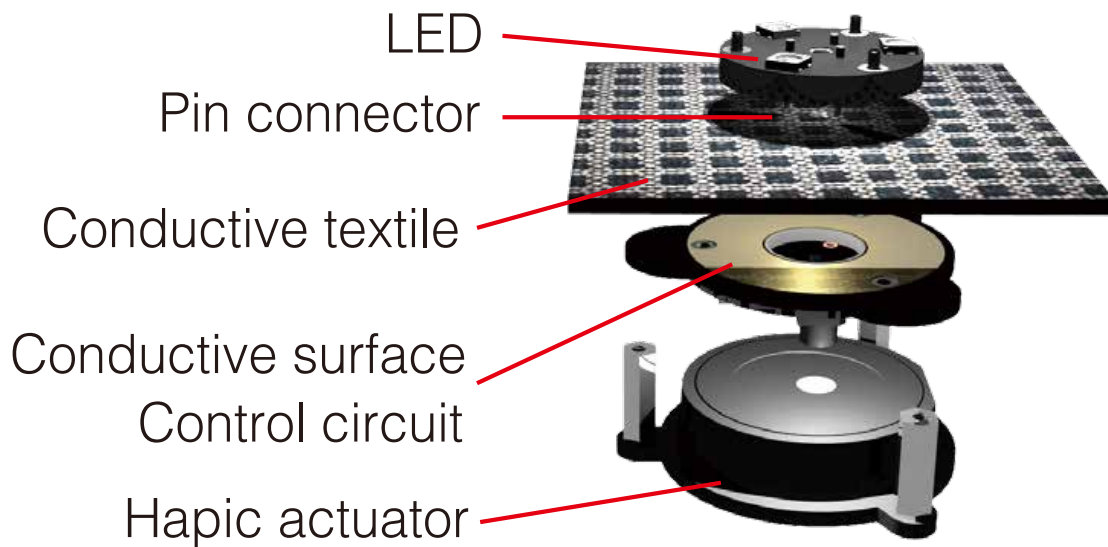


図 4.13 ハプティックモジュール：パーツ構成

を確認し，要求仕様を満たすことができた．各ハプティックモジュールには任意の音声データを最大 254 パターン保存することができ，任意のタイミングで再生できることから，空間コンピューティングにおける複合空間オブジェクトを触感を伴って区別するだけの十分な触感バリエーションを提示することができる．これらすべてを実装したことにより，アプリケーションとして空間コンピューティング体験をデザインし，デモンストレーションを行える状態となった．

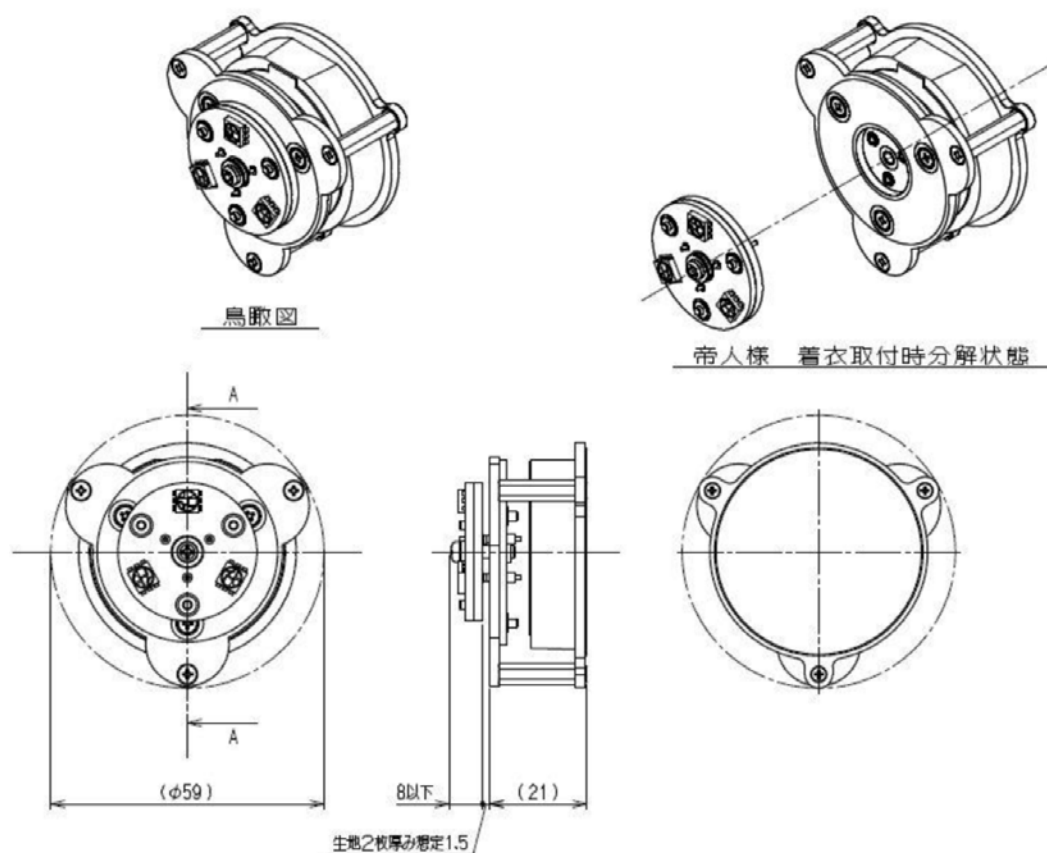


図 4.14 ハプティックモジュール：外装設計図（提供：帝人株式会社）

表 4.3  $I^2C$  通信フォーマット

| offset[byte] | コマンド        | 用途                                    |
|--------------|-------------|---------------------------------------|
| 0            | Start BYTE  | 0xF2 固定, 通信復帰確認用固定データ                 |
| 1            | $I^2C$ アドレス | 制御を行う $I^2C$ アドレス                     |
| 2            | 触感 ID       | 再生する触感データの番号, 0~0xFE(254), FF は再生停止   |
| 3            | 振動強度        | 振動強度                                  |
| 5            | LED パターン ID | 再生する LED パターンの番号, 0~0xFE(254), FF は消灯 |

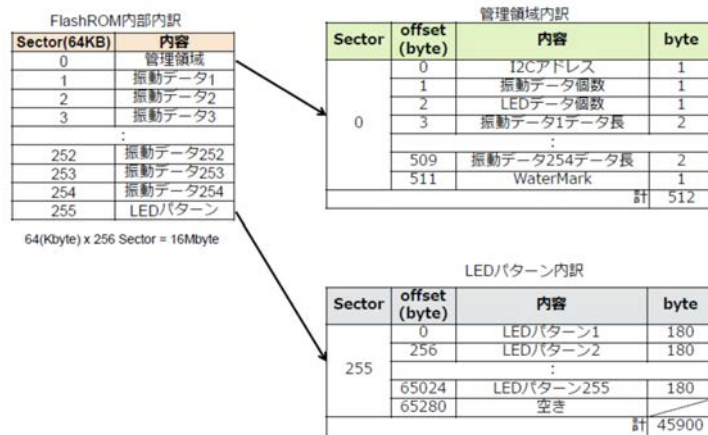


図 4.15 ハプティックモジュール：データ格納方式（提供：帝人株式会社）

表 4.4 シリアル通信制御フォーマット

|           |                            |
|-----------|----------------------------|
| GroupID   | グループ ID, 0~14,15(マルチキャスト)  |
| NodeID    | ノード ID, 0~14,15(マルチキャスト)   |
| SoundID   | 触感 ID, 再生する触感データの番号, 0~255 |
| Intensity | 振動強度, 0~7(8段階)             |
| LEDID     | LED パターン ID, 0~255         |

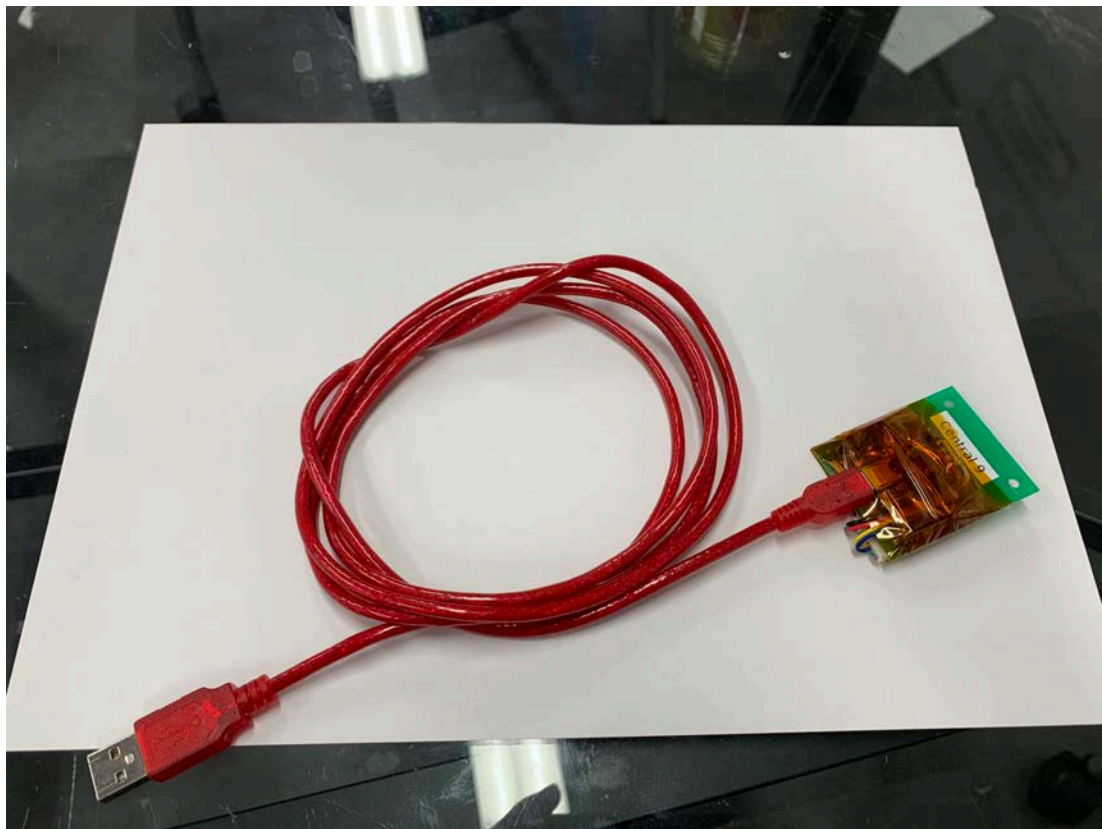


図 4.16 BLE 接続コマンド基板





図 4.17 OSC インターフェイスを用いた際の制御構成



図 4.18 Synesthesia wear (Magic Leap One を装着)





図 4.19 Synesthesia wear (アウターなし)

## 第 5 章

# Proof of Concept

### 5.1. 感覚を拡張する空間コンピューティング体験

本章では、Synesthesia Wear のコンセプト実証を行うために、第 3 章で述べた多彩な空間インタラクション表現を誘発する空間コンピューティング体験のデザインと開発について述べる。

空間コンピューティングは、本来見えないはずの複合現実を現実空間に重ね、また Synesthesia Wear は身にまとう触覚受容器を通じて複合現実の触感を感じ取ることができる。この体験は多くのユーザーにとって初めての体験になるため、多彩な空間インタラクションを自然に行うためには、インタラクション表現をビジュアルイメージ、環境イメージから想起できることが求められる。

一方で、様々な文化、生活様式、民謡の中で、幽霊や魂、純粋なエネルギー体といった形のない（インタンジブルな）ものが周囲に存在しているとされてきた。日本では古来より人魂といった死んだ人間の魂が炎のように空中に揺めき、死んだ周辺の土地に彷徨うといった伝承がある (図 5.1) ほか、ヨーロッパなどでも死後の国へ向かわずに現世を彷徨い続ける魂が、火の玉として漂うウィルオブザウィズプという伝承 (図 5.2) が浸透している。これらの存在はあくまで伝承や民謡の一部であり、そこから受ける印象は人によってまちまちであるが、第 3 章で述べた多彩な空間インタラクション表現の中でも、“通り抜ける”や、“突っ込む”など、触感を伴いつつも押したり引いたりすることができない存在に対するインタラクションは、幽霊や魂を触れようとした際に想像できるインタラクション表現と非常に近いのではないだろうか。あたかも幽霊や魂のような存在を実際に触れることができ、その存在との様々なインタラクションが可能になれば、現実空間と複

合空間が混じり合った体験を通じて感覚を拡張できるのではないか。そこで、本プロジェクトでは空間コンピューティング体験における空間デザインに、魂やエネルギー体といったビジュアルイメージを用いる。想定する体験の様子を図5.3に示す。体験フローとして、ユーザーは現実空間に立つ。その空間に、複合空間によってもたらされた複数の魂たちが現れる。ユーザーが魂に触れる、腕を突っ込むといったインタラクションを行うと、魂たちは空間を動き回り、ユーザーの身体にぶつかる。時にはユーザーの体内を通り抜けるなど、触感を伴った存在が身体を突き抜けてゆく。しばらくすると魂たちからエネルギーが放出され、大きな渦となってゆく。ユーザーはこの渦にも触れることができ、身体全体を用いた空間インタラクションを誘発する。最終的に全ての存在達が同じ空間に登場し、ユーザーはそれぞれの存在が持つ固有の触感を確かめることができる。次項で、この空間コンピューティング体験を実装する具体的な空間デザインと手法について述べる。

## 5.2. アプリケーション設計

### 5.2.1 システム

図5.4に全体のシステム構成図を示す。体験者の身体動作を複合空間のオブジェクトと相互作用させるため、Optitrack社製のモーションキャプチャシステム [2] を用いた。ここではOptitrack Prime 13W モーションキャプチャカメラ (図5.5) を8台用い、第4章で実装したSynesthesia Wearのハプティックインターフェイスに複数の再帰性反射マーカを取り付けることで体験者のフルボディモーショントラッキングを実現した。複合現実空間の提示にはMagic Leap Oneを用い、CG空間のレンダリングのためにゲームエンジンとしてUnreal Engine 4.22 [30] を用いた。図5.6に再帰性反射マーカを取り付けたSynesthesia Wearと、OptitrackモーションキャプチャソフトウェアMotiveを用いてモーショントラッキングを行う様子を示す。モーショントラッキングを正確に行うために、頭部にも反射マーカを取り付ける必要がある。通常、専用の帽子を着用してマーカを取り付けるが、本プロジェクトではMagic Leap Oneを着用するため帽子をかぶることが



図 5.1 人魂，鳥山石燕 今昔画図続百鬼 (1779) より



図 5.2 ウィルオブザウィspb, The Will o' the Wisp and the Snake by Hermann Hendrich (1854–1931)

できない。そこで、図 5.7 に示すような専用治具を 3D プリンターで制作した。これを Magic Leap One のステー部に取り付けることで、専用の帽子と同等位置に反射マーカールを取り付けることができる。

### 5.2.2 複合空間デザイン

前述した体験デザインに基づいて、複合空間に登場する様々なオブジェクトをデザインする。また、これらのオブジェクトに触れたときに、体験者の身体には Synesthesia Wear を通じてそれらの触感が感じられ、区別できる必要がある。そのため、それぞれ固有の触感をデザインし、各オブジェクトの触感として定義する。オブジェクトのデザイン要素には、ビジュアルデザイン、触れた際の触感、体験者とのインタラクションを定義するビヘイビアがある。以下に、デザインした

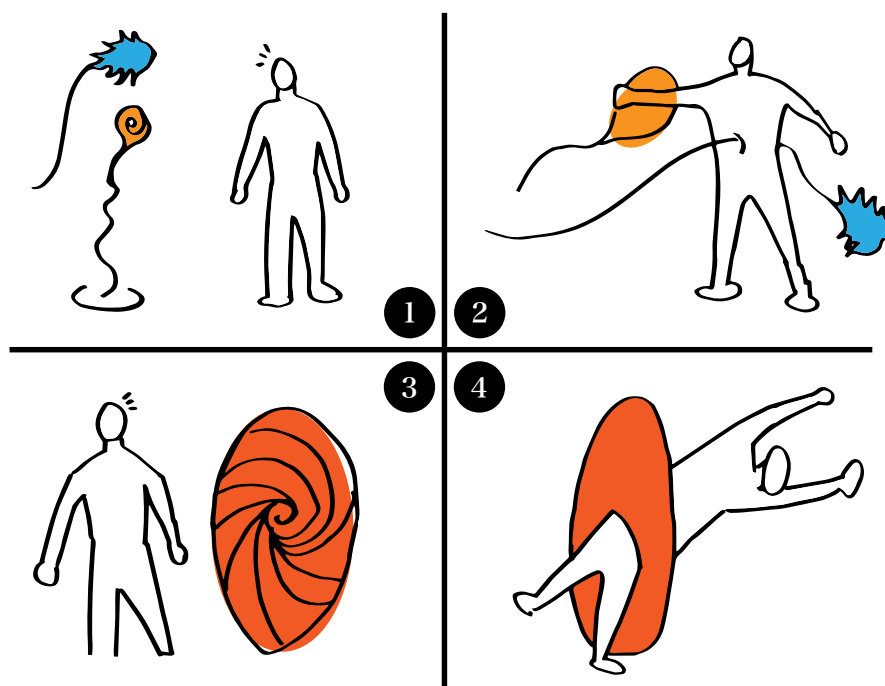


図 5.3 空間コンピューティング体験フロー

オブジェクトについてその詳しいデザインについて述べる。これらは全て Unreal Engine 上での実装を行った。

## Soul

### ビジュアルデザイン

まず、体験者が最初に遭遇するオブジェクトとして最も基本的となるオブジェクトをとして Soul をデザインした。漂う人間の魂をイメージし、パーティクル (粒子) が渦巻く集合体になったパーティクルソウルとしてビジュアルを構成した。Unreal Engine 上でのビジュアルを図 5.8 に、Magic Leap One に表示し、視界に統合した際の表示を図 5.9 に示す。Magic Leap One に表示された Soul は、直径約 20cm 程度の大きさに見える。Soul が空間を移動するとしばらく尾が引かれ、体験者は Soul を空間内で見失ってもこの尾を追うことで Soul を見つけれるようになっている。球の形に集合したパー

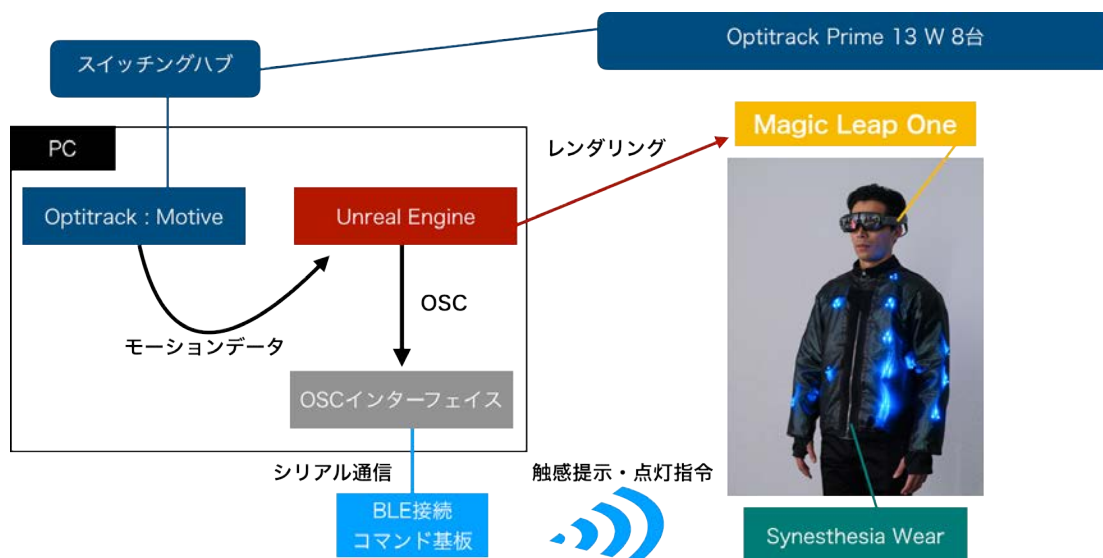


図 5.4 空間コンピューティング体験：システム構成

ティクルは常に渦を巻いており、体験者の身体に触れるとあたかも分子が沸騰するようにいくつかのパーティクルがはじける。

### 触感

波形を図 5.10 に示す。体験者の身体に Soul が触れると、Synesthesia Wear のハプティックモジュールから振動が提示される。ここでは重たく、強く響くような触感を用いた。立ち上がりで音量が最大になり、そのタイミングが、触った瞬間 Soul が渦巻きパーティクルが放出されるタイミングと一致し、ビジュアル変化と触感の提示が同期するようにデザインした。

### ビヘイビア

はじめに Soul は地面から浮かび上がり、体験者の目の前の空間に停滞する。体験者が何度か Soul を触れていくと、Soul は動き出だし、自由に空間内を浮遊していく。そこで体験者が触れると体験者の手に向かって移動し、手の付近で停滞する。このとき、体験者が右手で触れると左手に、左手で触れると右手へと移動する。しばらく手元への移動を繰り返すと、Soul は体験者の体内に侵入し、腕の中を經由して体験者の眼前に戻る。その後、Soul は



図 5.5 Optitrack Prime 13W モーションキャプチャカメラ ([2] より抜粋)

再び自由に移動し始め、体験者が触れるたびに体内への侵入か手元への移動のどちらかを行う。

## Plasma

### ビジュアルデザイン

体験者が Soul の次に遭遇するオブジェクトとして Plasma をデザインした。ビジュアルイメージはエネルギー、もしくはプラズマであり、エネルギーが迸っているようなビジュアルを構成した。Unreal Engine 上でのビジュアルを図 5.11 に、Magic Leap One に表示し、視界に統合した際の表示を図 5.12 に示す。Magic Leap One に表示された Plasma は、直径約 20cm 程度の大きさに見える。Plasma は発生しているエネルギーが電撃のように空間に残り、空間を移動するとしばらく尾のようにエネルギーが残る。これは Soul と同様に、空間内で見失っても位置を追いやすくなっている。常にエネルギーを模したビジュアルエフェクトがうごめいており、体験者の身体に触れると「バチッ」という静電気のような音とともに大きくはじける。



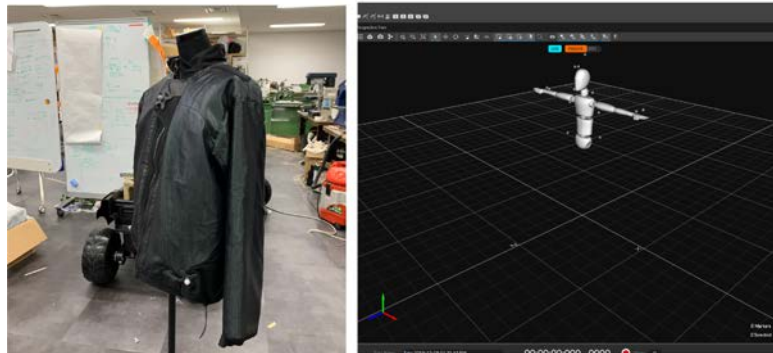


図 5.6 反射マーカを取り付けた Synesthesia Wear, Motive によるモーショントラッキング

### 触感

波形を図 5.13 に示す。ここでは Soul より強く、ギザギザとした波形を用い、エネルギーが弾けるような触感を用いた。

### ビヘイビア

Plasma は Soul と同様のビヘイビアを持つ。Soul とのインタラクションを通じて体験者がインタラクションに慣れていることを想定して、空間を移動するスピードを 1.2 倍ほどに設定している。

## Energy Vortex

### ビジュアルデザイン

Energy Vortex は渦巻くエネルギーのようなビジュアルで構成した。Unreal Engine 上でのビジュアルを図 5.16 に、Magic Leap One に表示し、視界に統合した際の表示を図 5.15 に示す。、Magic Leap One に表示された Energy Vortex は、体験者の身体がすっぽり通り抜けるほどの大きさに見える。Magic Leap One の視野角は水平 40 度、垂直 30 度程度であり、複合空間の表示は視界の中央部分に限られる。そのため大きなオブジェクトを表示すると見切れてしまい、遠近感を失うといった問題がある。これを回避するために



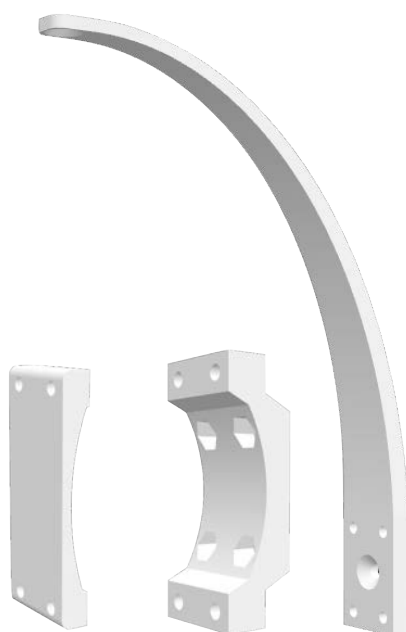


図 5.7 Magic Leap One 用反射マーカータ具

Energy Vortex のビジュアルは中心からパーティクルが放出され、渦のように外側に向かって拡散するようにデザインした。結果として体験者はパーティクルが放出される中心部分へと注目し、遠近感を認識しやすくなった。体験者の身体がパーティクルに触れるとパーティクルは実際に体験者の身体に衝突し、はじけて消えてゆく。

#### 触感

波形を図 5.16 に示す。ここでは Soul, Plasma と比べて弱く、立ち上がりが少ない波形を用い、まるでバブルが弾けるような触感を提示した。

#### ビヘイビア

はじめに Soul は地面から浮かび上がり、体験者の目の前の空間に停滞する。しばらくすると、ゆっくりと体験者の方に前進し、体験者にぶつかる。そのまま体験者を通り抜けて、反対側へと到達する。

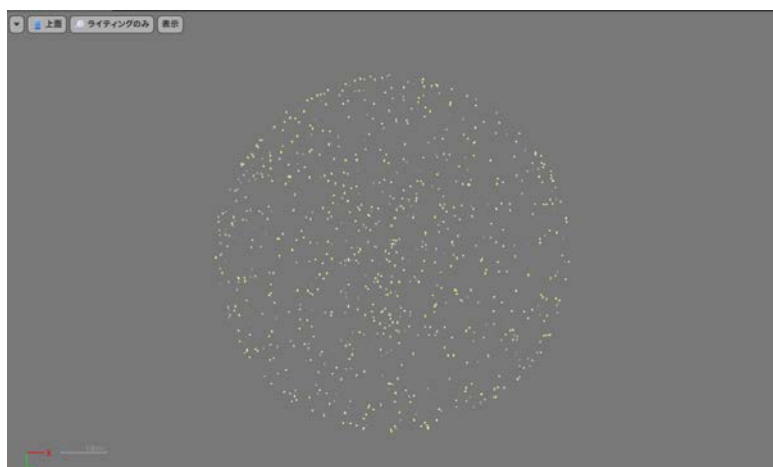


図 5.8 Soul ビジュアル : Unreal Engine 上の表示

### 5.3. デモンストレーション

本項では、Synesthesia Wear を実際に体験可能なデモンストレーションとして展示した際の様子を述べ、体験者がデモンストレーションの中で行っていた行動、インタラクション、そして体験後のコメントについて述べる。

#### 5.3.1 SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies

期間 2019年11月18日～20日

場所 オーストラリア ブリスベン ブリスベンコンベンションセンター

体験人数 約120人

Synesthesia Wear の初披露コンピュータグラフィクスの国際学会、ACM SIGGRAPH ASIA 2019における先端技術のデモンストレーション展示である Emerging Technologies の中であつた。デモンストレーションの様子を図 5.17 に示す。

体験が始まると、多くの体験者が Soul に手を伸ばし、Soul に触れ、触感が感じられると驚くような反応を見せた。Soul の丸い形に腕を突っ込んでいたり、手

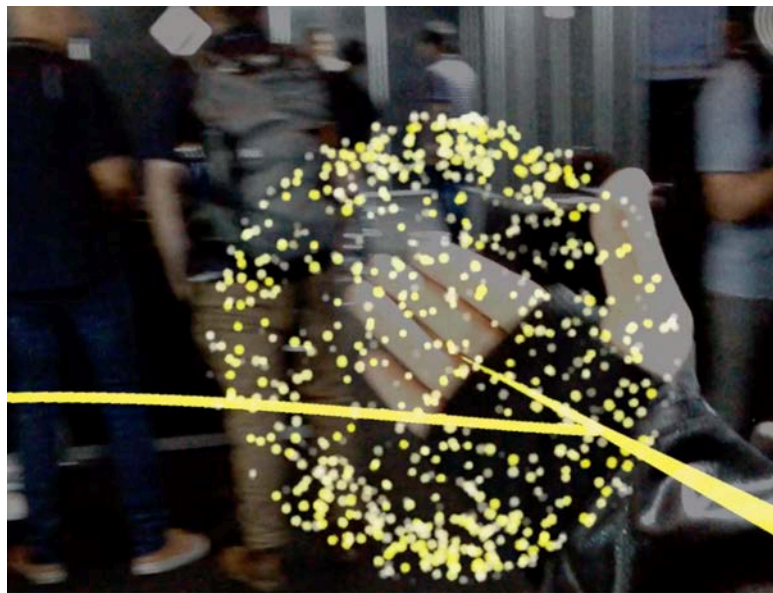


図 5.9 Soul ビジュアル : Magic Leap One 上の表示



図 5.10 Soul : 触感データの波形

を大きく広げて胸の部分にぶついたり、Soul に対して抱きつくような動作をしてみせる体験者もいた。Soul が自由に動き、手元への移動を行うと、体験者は Soul を一瞬見失うが、Soul が身体に触れると触感が提示されるためほとんどの体験者がすぐに Soul を発見することができた。次に、Plasma が登場すると体験者は Soul と同じように手や腕を伸ばし触れたり腕を突っ込んだりする様子が見られた。Plasma に触れた際には「さっきとは違う感じだ」と、触感の違いを確認するようなコメントを聞くことができた。Energy Vortex が現れると、Soul などのように手や腕を使ったインタラクションを最初に行うが、その後、上半身だけを渦の中に入れたり、Vortex に歩いていく動作を行う体験者を多く確認できた。また、渦の中に腕を手先から肩、そして胴体へとゆっくりと浸していき、触感が提示される

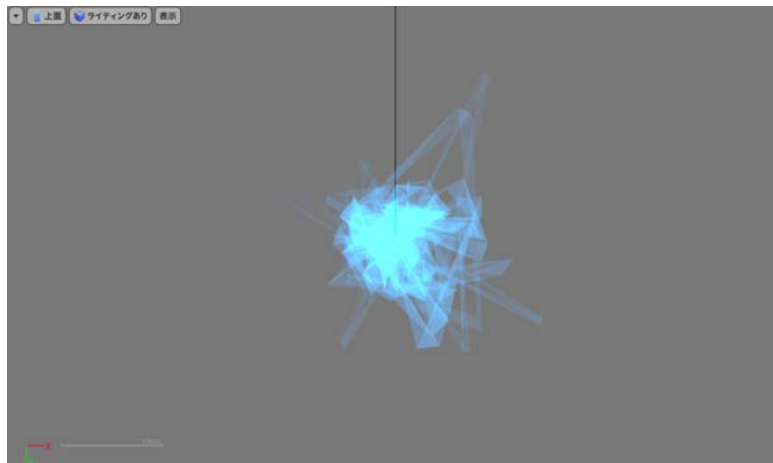


図 5.11 Plasma ビジュアル : Unreal Engine 上の表示

境界面を確認しようとする動作も見られた，ここでは「境い目がわかるよ！」といったコメントを聞くことができた．その後，Soul，Plasma，Vortex が一同に介すると，体験者は目についた存在に能動的に触りにいき，体験を楽しんでいる様子が多く見られた，3つの存在が浮遊している際には，例えばSoulに触れている際に背中にPlasmaが触れると，体験者はすぐに振り向いてPlasmaの存在を確認し，それぞれの触感の違いによってどのオブジェクトが身体に触れているか理解できているようだった．その他，体験者の感想をいかに抜粋する．

- 本当にそこに存在してるみたいに感じた．
- それぞれの触感の違いがよくわかった．
- 身体のどこにオブジェクトが触れてるかよくわかる．
- オブジェクトが離れていきそうになって，止めようとして触ったら近寄ってきたので，生きているように感じた
- 渦のやつは面が身体の中を貫通しているようで，面白かった
- 衣服としてシンプルにクール

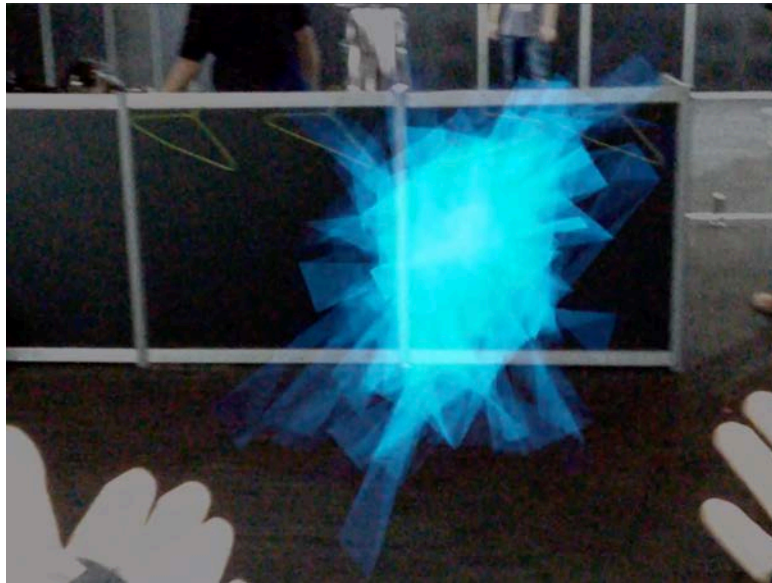


図 5.12 Plasma ビジュアル：Magic Leap One 上の表示

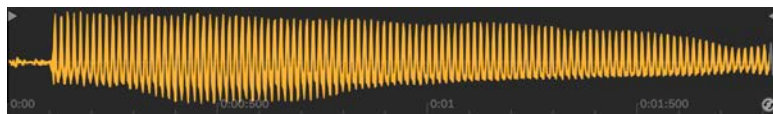


図 5.13 Plasma：触感データの波形

といったように、複合空間の存在たちをリアルに感じたり、本来さわれないはずの存在たちを自然に触りにいたり、魂をモチーフにしてデザインした存在たちを、まるで生きているように感じることできたりと、従来の空間コンピューティング体験にはない身体を用いた様々な体験を多くの体験者に楽しんでいただけたことがわかる。また、

- 視野角が狭くて、オブジェクトが見切れちゃって見失いやすい、
- 近くに寄りすぎると Magic Leap に描画されないから戸惑う

といった、Magic Leap One の技術的制約にまつわる意見も多かった。一方で、触感が提示されることによってオブジェクトの位置がわかりやすくなり、結果とし

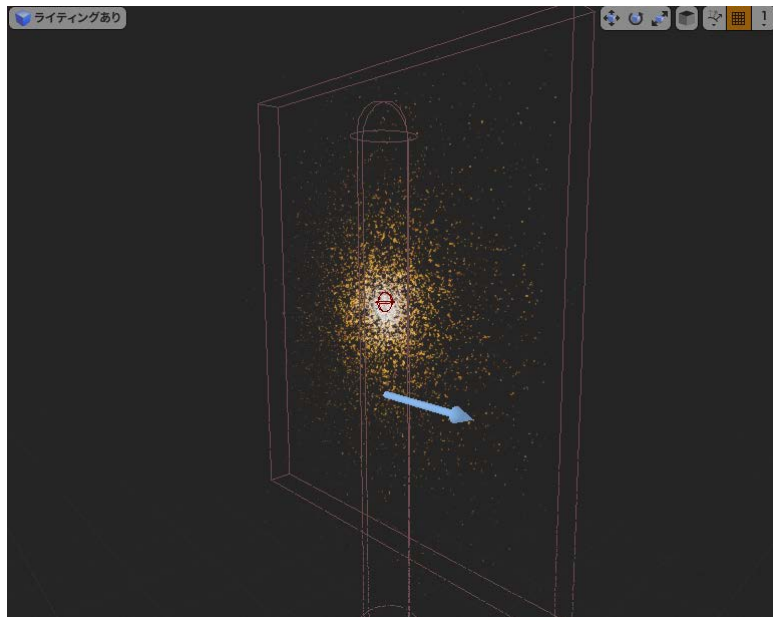


図 5.14 Energy Vortex ビジュアル : Unreal Engine 上の表示

で見失いやすさやごく近くのオブジェクトが描画されないといった制約を補完する役割と果たすことができた。

### 5.3.2 JST ACCEL Embodied Media Project 最終報告会

期間 2019年11月26

場所 本郷 東京大学 伊藤謝恩ホール

体験人数 約50人

本デモンストレーションは国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) が推進する戦略的創造研究推進事業のうち、ACCEL 採択プロジェクトである「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」、通称 Embodied Media Project の最終報告会の一部として展示を行ったものである。デモンストレーションの様子を図 5.18 に示す。多くの体験者が SIGGRAPH Asia での展示と同様のリアクシヨ





図 5.15 Energy Vortex ビジュアル : Magic Leap One 上の表示

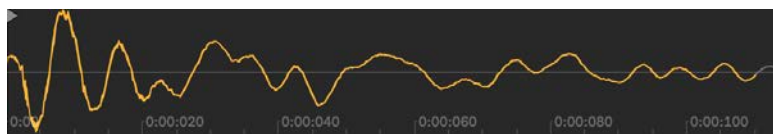


図 5.16 Energy Vortex : 触感データの波形

ンが見られ、新たな空間コンピューティング体験を提示することができた。体験者の意見を以下に抜粋する。

- 見た目は単なる普通のジャケットみたいなのに、こんなにパワーのあるアクチュエータが大量に仕込んであるのはすごい
- ファンタジーの世界に来たかのようなかった。
- 渦に入った時はまるでシャワーのようで気持ちがいい。
- 身体の中にオブジェクトが入っていったのがわかる。
- 3体が集まって身体にぶつかってくると、いじめられているようだった。



図 5.17 SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies デモの様子

といったように、空間コンピューティングで新たにできるようになったインタラクション表現を自然に行なっていたり、オブジェクトの存在が触感を通じて理解できていたり、結果としてその環境がきちんと生きているように感じてもらえるなど、多くの体験者に楽しんでもらえたことがわかる。

#### 5.4. デモから確認できたインタラクション表現

前述した2つのデモンストレーションでは、体験者は空間の中で身体を動かし、様々なインタラクションを複合空間で行なっていた。このアプリケーションの目的として、Synesthesia Wear のコンセプトに基づき、Synesthesia Wear で可能になる多彩な空間インタラクション表現を誘発させることにあった。第3章にて様々な空間インタラクション表現を示したが、2つのデモンストレーションを通じて、以下の空間インタラクション表現を確認することができた。

- つかむ
- 押す, さわる
- 突っ込む





図 5.18 JST ACCEL Demonstration デモの様子

- なでる
- 入る
- 入れる
- 抱く
- つける, あてる
- 通り抜ける

特に, つかむ, 押す, なでる, 抱くなどのインタラクションは Soul と Plasma と, 比較的小さな, 自由に行動するオブジェクトに対して行われ, 入る, 入れる, は Energy Vortex に対して行われた. また, 突っ込む, 通り抜ける, つける, などほどのオブジェクトに対しても行なっていた. このことから, 感覚拡張によって可能になる空間インタラクション表現の多くを Synesthesia Wear と Magic Leap One を用いた空間コンピューティング体験で実現できたといえる.

## 5.5. 本章のまとめ

本章では、Synesthesia Wear のコンセプト実証を行う上で、Magic Leap One を用いた空間コンピューティング体験を新たにデザインした。特に新たな空間インタラクション表現を誘発する上で多くの人に慣れ親しんでいる幽霊や人魂といった伝承を環境、オブジェクトデザインに落とし込み、体験フローを設計した。また、体験者の身体動作と Magic Leap One に描画される複合空間との相互作用を実現するための Optitrack モーションキャプチャシステムを用いたシステムを構築し、複合空間において様々な身体動作を誘発するオブジェクトをデザインし、そのビジュアル、触感、ビヘイビアを定義した。また、SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, JST ACCEL Embodied Media Project と2つ展示を行い、多くのユーザーに体験を行なってもらうことで、Synesthesia Wear の空間コンピューティング体験の新たな可能性を感じてもらうとともに、体験者の反応を観察することで、様々な空間での身体を用いたインタラクションを行う様子を確認することができた。これらのことから、Synesthesia Wear が着用者の感覚を現実空間と複合空間にまたがって拡張し、空間インタラクション表現が拡張する感覚拡張のコンセプトを実現できることを確認することができた。

## 第 6 章

# 結 論

### 6.1. 総括

本論文では、帝人株式会社と Enhance Experience, inc. と共同で行った Synesthesia Wear プロジェクトについて述べ、現実空間と複合空間における触覚を拡張し、空間インタラクション表現を拡張する感覚拡張のコンセプトについて述べた。このコンセプトを実現するための全身ハプティックウェア、Synesthesia Wear の機能要件、2次元通信に基づいたインターフェイス設計とハプティックモジュール設計について述べ、Synesthesia Wear の実装を行なった。また、Synesthesia Wear を用いてコンセプト実証を行うための空間コンピューティング体験として Magic Leap One と Optitrack モーションキャプチャシステムを用いたアプリケーションについて、システム設計、デザインプロセスについて述べ、デモンストレーションを通じたコンセプト実証について述べた。結果として、Synesthesia Wear によって感覚拡張のコンセプトを実現することができた。各章の結論は以下の通りとなる。

第 1 章では、近年我々の情報の接し方が生活空間、都市空間へと拡張されており、特に様々な情報やコンテンツと空間的にインタラクションを行うことを空間コンピューティングとして説明した。その上で、現状空間コンピューティングが利用されているスマートフォンや MR ヘッドセットはインタラクションの幅が非常に狭く、現実空間と複合空間が混ざり合う体験が実現できない問題点について指摘し、特に触覚を用いて異なる空間を感じることでインタラクション拡張を行う手法を空間コンピューティング適応する可能性について論じ、本研究の目的として空間コンピューティングにおける身体感覚を触覚提示を用いて拡張する全身インターフェイス Synesthesia Wear を開発し、デモンストレーションを通じて、

複合現実空間で可能になる新たな身体インタラクションを提案することであると述べた。

第2章では、Ivanらによる The ultimate Display から始まり発展を続けてきた xR の歴史と進化について概説し、近年発展を続ける MR ヘッドセットについて詳細に述べた。xR 技術はより高繊細、高密度に異なる現実空間を提示することで、高い没入感を実現する技術が提案されており、特にハンズフリーで利用可能なものや、空間を自由に利用できるものなど、日常生活に溶け込み身体動作を妨げないことを目的としたデバイス設計が多くみられる。また、触覚提示技術について、その提示方法が指先から手元、そして全身へと行う研究について概説した。全身に対する触覚提示の研究は、提示位置や、提示方法の広がりによってその体験を拡張してきており、また、触感提示の時間パターンをデザインして質感提示を実現する研究や、提示部位を複数点にして触覚の空間パターンをデザインする研究を紹介した。そのうえで、今後、xR 技術と触覚提示技術が統合されることで、複数の現実空間をリアルに感られ、様々なインタラクションを可能にする体験が実現していく未来について述べた。

第3章では、Synesthesia Wear のコンセプトである感覚拡張について述べた。これは、現実の物体を触覚的に認識するために触覚受容体があるように、複合空間を認識する新たな受容体を定義することで、複合空間を身体的に認識のようにすることであり、結果として触覚を用いてどちらの空間も理解し、身体全体で行う空間インタラクション表現を拡張する。Synesthesia Wear プロジェクトはこれを皮膚に連なる外界との海面である衣服として定義し、衣服として身にまとうことで新たな受容体を身にまとうアイデアについて述べた。また、感覚拡張を通じて可能になる、新たな空間インタラクション表現について分類し、その可能性を述べ、これらのインタラクション表現を可能にする上で Synesthesia Wear の触覚インターフェイスが備えるべき必要要件について論じた。

第4章では、Synesthesia Wear を実際に実装するプロセスを述べた。まず、触感提示を行う位置、および個数を体感実験を通じて検討し、要求仕様を定義した。2次元通信技術に基づいたウェアラブルインターフェイスの設計と実装を行い、ハプティックモジュール設計、および通信方式の策定について述べた。また、ハプ

ティックモジュールを Magic Leap One といった MR ヘッドセットからコントロールするためのミドルウェア実装について述べた。

第5章では、感覚拡張のコンセプトを実際に体験できる空間コンピューティング体験として、Magic Leap One を用いたアプリケーション設計、システム設計、デモンストレーションを通じたコンセプト実証について述べた。特に新たな空間インタラクション表現を誘発する上で多くの人に慣れ親しんでいる幽霊や人魂といった伝承を環境、オブジェクトデザインに落とし込んだ体験フロー設計について述べ、体験者の身体動作と Magic Leap One に描画される複合空間との相互作用を実現するための Optitrack モーションキャプチャシステムを用いたシステム構築について説明した。また、SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, JST ACCEL Embodied Media Project と2つ展示をについて詳細に報告し、多くのユーザーに体験を行なってもらうことで、Synesthesia Wear の空間コンピューティング体験の新たな可能性を感じてもらうとともに、ユーザーが空間での身体を用いたインタラクションを行う様子について述べた。これらのことから、Synesthesia Wear が着用者の感覚を現実空間と複合空間にまたがって拡張し、空間インタラクション表現が拡張する感覚拡張のコンセプトを実現することができた。

## 6.2. 展望

今後の展望として、まず感覚拡張のコンセプトをさらに広く押し広げ、実装した空間コンピューティング体験では誘発できなかった空間インタラクション表現を実現することが挙げられる。第3章で示した空間インタラクション表現のうち、“つまむ”や“寄せる”、“かける”や“背負う”、“手に持って取り入れる”などは誘発することはできなかった。これらのインタラクションをどのように実現するか、アプリケーションデザインの観点から再検討する必要があると考える。また、本研究では Synesthesia Wear のコンセプトである感覚拡張について、体験者の観察を通じた実証を行なったものの、より詳細に Synesthesia Wear を着用、非着用した場合を検討する余地があると考えられる。また、異なる展望として、Synesthesia Wear の汎用化が挙げられる。2次元通信に基づいてハプティッ

クインターフェイスを実装したことによって、完全にカスタマイズ可能で、ワイヤレスに動作する全身触覚ウェアが完成した。これはVR, MRのみならず、様々な分野への応用が可能であると考えることができ、エンターテインメントへの応用や、触覚を用いて身体の位置を示すことによる運動支援などが考えられる。また、Synesthesia Wearはサイズ展開可能な衣服部分と、そこに装着するモジュール形式のデバイスからなり、製造、販売の面でこのような構成は有利に働く。したがって、市販化についても一考の余地があると考えられる。

# 謝 辞

指導教員の南澤孝太教授には、熱心なご指導とご支援を賜り、研究を円滑に行うことができました。南澤教授のご指導のおかげで、2年間のうちに多くの成果を作ることができました。

副指導教員の水口哲也特任教授には、教員として、そしてリアルプロジェクトのコラボレーション相手として、ディスカッションを重ね、多くのご意見やご指導をいただきました。また、筆者が来年度よりゲームデザイナーの道へと進むことについて、ゲームデザイナーとしての貴重な意見をいただきました。このプロジェクトを主導する機会をいただけたことを非常に光榮に思います。

博士課程であり Enhance Experience, Inc. の研究者としてコラボレーションさせていただいた花光宣尚氏には、日頃の研究や開発について、学会への論文執筆や研究発表について、また配置検討を行う際の実験デザインなど、あらゆる場面で面倒を見ていただきました。

帝人株式会社、山田順子様、北村啓一様、丹羽大介様、平野義明様には、リアルプロジェクトのコラボレーションとして、Synesthesia Wear の開発において多くのディスカッションを重ね、ウェア、モジュールの設計と製造、その他細かな修正に至るまで大変お世話になりました。

KMD Embodied Media Project の研究員でもあるシードルインタラクション株式会社の神山洋一氏には、ハプティックモジュール設計をお手伝いいただき、結果として非常に高性能なハプティックモジュールを実現することができました。また、Magic Leap One 用の治具設計を依頼した際にも迅速に対応いただきました。

Embodied Media 松田健斗氏、Harry Krekoukiotis 氏には日常のディスカッション、デモンストレーション時の補助、学会用動画の撮影と編集など、多くの面で助けていただきました。

また、ここに挙げることはできませんが、多くのアドバイスをいただいた先輩方、切磋琢磨し日常的にディスカッションを行い、励ましながら修士課程を過ごした同期達、学生生活をサポートしてくれた家族、関わっていただいた全ての方に、この場を借りて御礼申し上げ、謝辞にかえさせていただきます。



## 参 考 文 献

- [1] Yuki Tajima, Akihito Noda, and Hiroyuki Shinoda. Signal and power transfer to actuators distributed on conductive fabric sheet for wearable tactile display. In *International AsiaHaptics conference*, pp. 163–169. Springer, 2016.
- [2] Optitrack. Optitrack モーションキャプチャシステム, アクセス日 : 2019 年 12 月. <https://www.optitrack.jp>.
- [3] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin, Thomas A DeFanti, Robert V Kenyon, and John C Hart. The cave: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, Vol. 35, No. 6, pp. 64–73, 1992.
- [4] Ivan E Sutherland. The ultimate display. *Multimedia: From Wagner to virtual reality*, pp. 506–508, 1965.
- [5] inc. Google. Google glass, アクセス日 : 2019 年 12 月. <https://www.google.com/glass/start/>.
- [6] Henry Chen, Austin S Lee, Mark Swift, and John C Tang. 3d collaboration method over hololens<sup>TM</sup> and skype<sup>TM</sup> end points. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Immersive Media Experiences*, pp. 27–30. ACM, 2015.
- [7] Gary R Bradski, Samuel A Miller, and Rony Abovitz. Methods and systems for creating virtual and augmented reality, January 28 2016. US Patent App. 14/738,877.
- [8] Nreal. Nreal light, アクセス日 : 2019 年 12 月, 2019. <https://www.nreal.ai>.

- [9] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Citeseer, 1994.
- [10] Makoto Sato. Virtual work space for 3-dimensional modeling. *ICAT, 1991*, pp. 110–113, 1991.
- [11] 浅野. フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発. 日本バーチャルリアリティ学会第1回大会論文集, 1996, pp. 95–98, 1996.
- [12] CyberGlobeSystems. Cybertouch, アクセス日 : 2019年12月. <http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch/>.
- [13] CyberGlobeSystems. Cybergrasp, アクセス日 : 2019年12月. <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp>.
- [14] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, p. 26. ACM, 2012.
- [15] Ali Israr, Seung-Chan Kim, Jan Stec, and Ivan Poupyrev. Surround haptics: tactile feedback for immersive gaming experiences. In *CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1087–1090. ACM, 2012.
- [16] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Control space of apparent haptic motion. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, pp. 457–462. IEEE, 2011.
- [17] Ali Israr and Ivan Poupyrev. Tactile brush: drawing on skin with a tactile grid display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2019–2028. ACM, 2011.

- [18] Ali Israr, Siyan Zhao, Kaitlyn Schwalje, Roberta Klatzky, and Jill Lehman. Feel effects: enriching storytelling with haptic feedback. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, Vol. 11, No. 3, p. 11, 2014.
- [19] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L Klatzky, Scott E Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P Sample. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 320. ACM, 2018.
- [20] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Benjamin Outram, Kouta Minamizawa, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, p. 20. ACM, 2016.
- [21] Teslasuit. Teslasuit, アクセス日 : 2019 年 12 月, 2017. <https://teslasuit.io>.
- [22] Satoshi Hashizume, Shinji Sakamoto, Kenta Suzuki, and Yoichi Ochiai. Live-jacket: Wearable music experience device with multiple speakers. In *International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*, pp. 359–371. Springer, 2018.
- [23] Synesthesia Lab. Synesthesia x1-2.44, アクセス日 : 2019 年 12 月. <http://mediaambitiontokyo.jp/synesthesialab/>.
- [24] project 実行委員会. echo, アクセス日 : 2019 年 12 月. <https://research.rhizomatiks.com/s/works/echo/member>.
- [25] Esther W Foo, J. Walter Lee, Crystal Compton, Simon Ozbek, and Brad Holschuh. User experiences of garment-based dynamic compression for novel haptic applications. In *Proceedings of the 23rd International Symposium on Wearable Computers, ISWC '19*, pp. 54–59, New York, NY,

- USA, 2019. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3341163.3347732>, doi:10.1145/3341163.3347732.
- [26] Sophia Brueckner and Rachel Freire. Embodisuit: a wearable platform for embodied knowledge. In *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 242–247. ACM, 2018.
- [27] 岩村吉晃. ヒト触覚受容器の構造と特性. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 438–444, 1984.
- [28] Séverine de Mulatier, Mohamed Nasreldin, Roger Delattre, Marc Ramuz, and Thierry Djenizian. Electronic circuits integration in textiles for data processing in wearable technologies. *Advanced Materials Technologies*, Vol. 3, No. 10, p. 1700320, 2018.
- [29] NXP Semiconductors. Um10204: I2c-bus specification and user manual, rev. 6, 2014, アクセス日 : 2019 年 12 月. <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [30] inc. Epic Games. Unreal engine 4, アクセス日 : 2019 年 12 月. <https://www.unrealengine.com/ja/>.

# 関 連 発 表

## A. 国際学会・国内学会

Taichi Furukawa, Daisuke Yamamoto, Moe Sugawa, Roshan Peiris, and Kouta Minamizawa. 2019. TeleSight: enabling asymmetric collaboration in VR between HMD user and Non-HMD users. In ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies (SIGGRAPH '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 26, 1–2. DOI:<https://doi.org/10.1145/3305367.3335040>

Taichi Furukawa, Nobuhisa Hanamitsu, Yoichi Kamiyama, Hideaki Nii, Charalampos Krekoukiotis, Kouta Minamizawa, Akihito Noda, Junko Yamada, Keiichi Kitamura, Daisuke Niwa, and Yoshiaki Hirano. 2019. Designing a full-body customizable haptic interface using two-dimensional signal transmission. In ACM SIGGRAPH 2019 Posters (SIGGRAPH '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 54, 1–2. DOI:<https://doi.org/10.1145/3306214.3338569>

Taichi Furukawa, Nobuhisa Hanamitsu, Yoichi Kamiyama, Hideaki Nii, Charalampos Krekoukiotis, Kouta Minamizawa, Akihito Noda, Junko Yamada, Keiichi Kitamura, Daisuke Niwa, Yoshiaki Hirano, and Tetsuya Mizuguchi. 2019. Synesthesia Wear : Full-body haptic clothing interface based on two-dimensional signal transmission. In SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies (SA '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 48–50. DOI:<https://doi.org/10.1145/3355049.3360524>

## B. 展示

TeleSight : IVRC 2018 予選大会, 東北大学青葉山キャンパス, 日本バーチャルリアリティ学会, 2018年9月20日-21日

TeleSight : IVRC 2018 決勝大会, 幕張メッセ, Digital Content Expo, 2018年11月14日-16日

TeleSight : VRsionUP! No.2, GREE, Roppongi Hills, 2019年3月1日

TeleSight : Laval Virtual ReVolution #Research, Laval, France, 2019年3月20日-24日

TeleSight : ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, Los Angeles Convention Center, 2019年7月28日-8月1日

Synesthesia Wear : IEEE World Haptics Demo, Tokyo, 2019年7月28日-8月1日

Synesthesia Wear : ACM SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, Brisbane Convention Center, 2019年11月18日-11月20日

Synesthesia Wear : JST Embodied Media Project 最終報告会, Tokyo University, 2019年11月26日

Synesthesia Wear : Docomo Open House 2020, Tokyo Bigsight, 2020年1月22日-24日

## C. メディア掲載

### C.1 TeleSight

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科「身体性メディア」プロジェクト『EMBODIED MEDIA』へ行って、世界を肌で感じた若者たちの情熱を感じてきました!, VRonWEBMEDIA, 2019年6月18日, <https://vron.jp/2019/06/18/embodied-media/>

## C.2 Synesthesia Wear

【トレたま】触角を感じられるジャケット, テレビ東京 WBS, 2019年12月6日,  
[https://www.tv-tokyo.co.jp/mv/wbs/trend\\_tamago/post\\_192002/?yclid=YJAD.1580373172.aGHPA.edcq33NQ7cJjiQ6lvZ4CNyooB0VkfHU.0FPTTCjlfirtU3Vk519WT820rN\\_n2.hCiV59n3qrz0-](https://www.tv-tokyo.co.jp/mv/wbs/trend_tamago/post_192002/?yclid=YJAD.1580373172.aGHPA.edcq33NQ7cJjiQ6lvZ4CNyooB0VkfHU.0FPTTCjlfirtU3Vk519WT820rN_n2.hCiV59n3qrz0-)

国内の AR トренд最前線、Docomo Open House が一大展示会になっていた (一部紹介), MoguraVR, 2020年1月13日, <https://www.moguravr.com/docomo-open-house-2020/>