

Title	FEEL TECH Wear : 複合空間内での身体性インタラクションに向けたリアルタイム力触覚フィードバックシステム
Sub Title	FEEL TECH Wear : haptic feedback system for embodied interaction in mixed spaces
Author	梅原, 路旦(Umehara, Rodan) 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	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度メディアデザイン学 第1138号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002024-1138

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 2024 年度

FEEL TECH Wear：複合空間内での
身体性インタラクションに向けた
リアルタイム力触覚フィードバックシステム



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

梅原 路旦

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。

梅原 路旦

研究指導コミッティ：

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

加藤 朗 教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

南澤 孝太 教授 (主査)

加藤 朗 教授 (副査)

石戸 奈々子 教授 (副査)

修士論文 2024 年度

FEEL TECH Wear：複合空間内での 身体性インタラクションに向けた リアルタイム力触覚フィードバックシステム

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

通信技術の発展により遠隔コミュニケーションが容易になり、デジタル技術によって遠隔地との空間的コミュニケーションが可能になってきているが、既存のツールは視覚や聴覚による情報のやり取りのみが行われ、触覚情報が欠如している。また、身体感覚を伴うインタラクションを行うには、提示される触覚情報には自身の動作が反映されていなければならない。そこで、本研究では、遠隔コミュニケーションをはじめとする複合空間での身体性インタラクションに向けたリアルタイム力触覚レンダリングシステムを構築することを目的とし、触覚提示デバイスと触覚レンダリングシステム「FEEL TECH Wear」を提案する。FEEL TECH Wear の手部装着部には手首に 4ch の回転皮膚せん断素子と、親指と人差指にそれぞれ振動素子が搭載されている。提案システムが多自由度な力覚提示や触覚リマッピングによる刺激提示位置の違和感低減に有効かを明らかにするため、皮膚せん断素子の回転の制御則や手首と指先の刺激強度バランスの評価を行った。本技術は企業とのコラボレーションとして展開し、複数のビジネス向け・コンシューマー向け展示会にて Mixed Reality コンテンツと連動した体験展示を行った。

キーワード：

触覚，身体性メディア，コミュニケーション，複合現実，ウェアラブル

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

梅原 路旦

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2024

FEEL TECH Wear : Haptic Feedback System for Embodied Interaction in Mixed Spaces

Category: Science / Engineering

Summary

The development of technology has made remote communication easier, and possible to communicate spatially with remote locations. However, current tools only allow the exchange of visual and auditory information, and haptic information is lacking. In addition, in order to perform interactions that involve physical sensations, haptic stimulus must reflect user's own movements. Therefore, we propose a haptic rendering system for embodied interaction in mixed spaces, including remote communication, and construct a haptic rendering system called "FEEL TECH Wear" with a haptic device. Hardware has a 4-channel rotational tactor on the wrist and a vibrator on the thumb and index. In order to clarify whether the proposed system is effective for multi-degree-of-freedom force presentation and for reducing the discomfort associated with haptic remapping, we evaluated the control rules of rotational skin-stretch tactors and the balance of stimulus intensity between the wrist and fingertips. This technology was developed in collaboration with a company, and we held an experience exhibition linked to Mixed Reality content at multiple business and consumer exhibitions.

Keywords:

haptics, embodied media, communication, mixed reality, wearable

Keio University Graduate School of Media Design

Rodan Umehara

目次

第1章 Introduction	1
1.1. 遠隔コミュニケーションの歴史	1
1.2. デジタル技術とコミュニケーション	2
1.3. 触覚がつくる日常	4
1.4. FEEL TECH Project	7
1.5. 本研究の目的	9
1.6. 本論文の構成	10
第2章 Literature Review	11
2.1. 触覚による存在感の知覚	11
2.1.1 皮膚構造	11
2.1.2 触覚受容器	12
2.1.3 能動触と触運動知覚	13
2.2. 触覚提示技術	13
2.2.1 擬似触覚	13
2.2.2 皮膚せん断変形による擬似力覚提示	17
2.2.3 触覚リマッピングとリターゲティング	19
2.2.4 触覚における錯覚	20
2.3. 触覚を通じたコミュニケーション	21
2.3.1 実世界での事例	21
2.3.2 遠隔触覚コミュニケーション	22
2.4. 本章のまとめ	23

第3章 Proposed Method	26
3.1. 触覚提示手法の設計	26
3.2. 開発体制	27
3.3. 提案手法：FEEL TECH Wear	29
3.3.1 ハードウェア	29
3.3.2 触覚レンダリング手法	30
3.3.3 触覚コンテンツの設計	32
3.4. 本章のまとめ	36
第4章 Verification	37
4.1. 手首回転素子の回転角制御による刺激強度提示	37
4.1.1 実験環境	37
4.1.2 実験手順	38
4.1.3 結果	40
4.1.4 考察	42
4.2. 方向性を持つ力覚提示に向けた手首回転素子の制御則	42
4.2.1 実験環境	42
4.2.2 実験手順	45
4.2.3 結果	45
4.2.4 考察	45
4.3. タスク実行時の触覚強度バランス	47
4.3.1 実験環境	48
4.3.2 実験手順	49
4.3.3 結果	50
4.3.4 考察	50
4.4. 本章のまとめ	51
第5章 Validation	53
5.1. MR.Dog : Mixed Reality Haptic Interaction with Virtual Dog	53
5.1.1 コンテンツ概要	53

5.1.2	実装	53
5.1.3	MWC24 でのデモンストレーション	55
5.1.4	考察	56
5.2.	リアルオブジェクトを介した触覚の Mixed Reality の設計	57
5.2.1	コンテンツ概要	58
5.2.2	SIGGRAPH2024 でのデモンストレーション	58
5.2.3	考察	60
5.3.	ゲートを介した遠隔空間とのハンドインタラクション	61
5.4.	全体の考察	61
第 6 章 Conclusion		63
謝辞		66
参考文献		68
付録		74
A.	手首せん断刺激分布レンダリング	74
B.	指先振動レンダリング	78

目 次

1.1	空間 Persona 使用例	3
1.2	FEEL TECH® 未来図	7
1.3	「人間拡張基盤®」システム構成図	8
1.4	空間を超えた感覚の共有例	9
2.1	無毛皮膚の組織および触覚受容体	11
2.2	触知動作の分類	14
2.3	4 種類の視覚刺激	15
2.4	3 種類のユーザの動作	15
2.5	指先装着型皮膚せん断刺激提示デバイス例	18
2.6	固有受容感覚提示デバイス例	18
2.7	触覚代替を用いた触覚提示デバイス例	19
2.8	皮膚兎	21
2.9	メディアとしての触覚	22
2.10	Physical Telepresence	23
2.11	マルチチャンネル触覚の記録, 編集, 再生プラットフォーム	23
3.1	本研究での触覚提示手法	27
3.2	研究開発体制図	28
3.3	システム構成図	29
3.4	FEEL TECH Wear ハードウェア	30
3.5	手における 3 次元基底ベクトル	31
3.6	直交分解後の各基底に対応する回転の制御則	31
3.7	DecompositionMatrix スクリプト	34

3.8	FingerVibrationAudio	35
4.1	実験装置	38
4.2	実験環境	39
4.3	回転素子の時間的プロファイル	39
4.4	各位置における回転角度が 20 °を超える場合の知覚強度	41
4.5	回転皮膚せん断刺激分布提示のための回転素子の 2 つの制御則	44
4.6	各皮膚せん断刺激分布における反応率 (%) を示す混合行列	46
4.7	評価対象のハンドインタラクション	47
4.8	実験環境	48
4.9	衝突力と摩擦提示の振動波形	49
5.1	インタラクションの様子	54
5.2	コンテンツ内での実装クラス図	55
5.3	MWC24 での体験の様子	56
5.4	各インタラクションの様子 (主観図)	57
5.5	触覚の Mixed Reality を含めたコンテンツの流れ	59
5.6	SIGGRAPH 2024 での体験の様子	60

表 目 次

2.1	各触覚受容器の知覚特性	12
2.2	擬似触覚での触覚特性提示のための視覚刺激とユーザ動作の組み合わせ	16
4.1	実験参加者への質問の回答	50

第 1 章

Introduction

1.1. 遠隔コミュニケーションの歴史

遠隔コミュニケーションの始まりは、手紙や文通といった手段に遡ることができる。文通は、空間的な制約を超えて人々をつなぐ初期の手段として、長い間親しまれてきた。特に 19 世紀の郵便制度の整備は、個人間のコミュニケーションを大きく促進した。手紙は、感情や情報を文字に託し、相手に届ける手段として、時間を越えた繋がりを可能にした。

19 世紀後半になると、電話の発明により遠隔地との音声によるコミュニケーションが可能になった。その後、電話は商業化され、20 世紀初頭には国際通話も可能となった。通話は、文字に頼らず音声で直接的に感情や意図を伝えられる点で、文通とは異なるコミュニケーション手段として社会に定着していった。

20 世紀後半になると、テクノロジーの進歩により、遠隔コミュニケーションは急速に進化した。まず登場したのが電子メールである。電子メールは、手紙と同様の構造を持ちながらも、即時性と効率性を大幅に向上させた。また、1990 年代後半には携帯電話の普及とともに、ショートメッセージサービス (SMS) が新たな選択肢として登場した。SMS は、手軽さと迅速さを特徴とし、特に個人間の短いメッセージのやりとりに適していた。

その後、インターネットの普及とスマートフォンの登場により、LINE¹や X (旧: Twitter)²といった SNS が発展した。これらのプラットフォームは、文字に加えて画像、動画、スタンプといった多様な形式の情報を共有できるようにし、コミュ

1 LINE 公式サイト <https://www.line.me/ja/>

2 X について <https://about.x.com/ja>

ニケーションの幅を広げた。LINE は特に、日本において家族や友人との日常的なやりとりに欠かせないツールとなり、Twitter はリアルタイムでの情報発信や意見交換を可能にした。

これら SNS の台頭に続いて登場したのが、Zoom³や Google Meet⁴などのオンラインコミュニケーションツールである。これらのツールは、視覚と聴覚を通じて対面に近い形式でのやりとりを可能にし、特に 2020 年のパンデミック時代においてその重要性が急速に高まった。オンライン会議や授業の普及により、地理的な制約を超えた繋がりがさらに深化した。しかし、触覚的な繋がりの欠如や画面越しの疲労感といった課題も同時に浮き彫りになっている。

このように、遠隔コミュニケーションは文通から始まり、通話、電子メール、SMS、SNS、そしてオンライン会議ツールへと進化してきた。それぞれの技術は空間的な制約を超えるための新たな手段を提供してきたが、一方で、対面コミュニケーションにおける感情や存在感の共有という側面が失われる課題も抱えている。

1.2. デジタル技術とコミュニケーション

近年、VR Chat⁵や Apple Vision Pro⁶をはじめとするデジタル技術が、コミュニケーションの在り方を大きく変えつつある。VR Chat は、ユーザーがバーチャル空間でアバターを操作し、他者と対話や共同作業を行うプラットフォームである。この技術は、物理的な距離を超えた没入型のコミュニケーションを実現し、教育、娯楽、ビジネスといった幅広い分野で活用されている。

一方、Apple Vision Pro の空間 Persona 機能⁷は、ユーザーの表情や動きをリアルタイムでキャプチャし、デジタルアバターとしてオンライン環境に投影する技

3 Zoom 公式サイト <https://www.zoom.com/ja/products/virtual-meetings/>

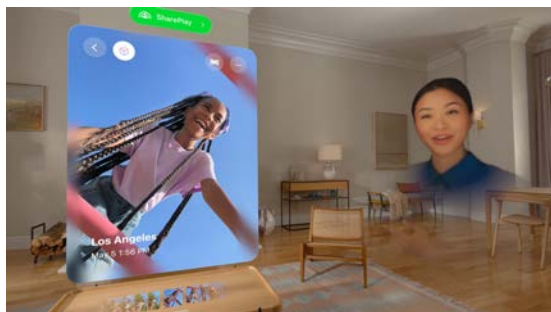
4 Google Meet <https://workspace.google.com/intl/ja/products/meet/>

5 VR Chat 公式サイト <https://hello.vrchat.com/>

6 Apple 公式サイト <https://www.apple.com/jp/apple-vision-pro/>

7 空間 Persona について <https://support.apple.com/ja-jp/guide/apple-vision-pro/tana1ea03f18/visionos>

術である。これにより、オンライン会議において視覚的な臨場感や対面に近い感覚を提供することを目指している。



(Apple Newsroom⁸より引用)

図 1.1 空間 Persona 使用例

これらに加えて、近年注目されているのがメタバースとデジタルツイン技術である。メタバースは、バーチャル空間内での活動が物理的な制約を超えた新たな社会的、経済的な活動の場を提供する。例えば、バーチャルオフィスでの会議や、世界中の参加者を集めたイベントの開催が現実となりつつある。

さらに、デジタルツインは、現実空間の物理的な環境をバーチャル空間にリアルタイムで再現する技術である。この技術を用いることで、製造業や建設業などでは効率的な作業計画が可能になるだけでなく、現実空間に即したコミュニケーション環境を提供することもできる。例えば、ある地域の環境をデジタル空間上で共有し、遠隔地の人々がその場にいるかのように議論を進めることが可能となる。

しかし、これらの技術が提供するのは視覚や聴覚を中心とした情報伝達であり、触覚を伴うコミュニケーションは依然として欠如している。例えば、バーチャル空間での握手や物体の受け渡しは視覚的には表現可能であるが、実際の触感や力加減を再現することは難しい。この触覚情報の欠如により、他者や環境との「繋がり」を実感することが困難になる場合がある。

また、提示される視聴覚情報がより空間的になってきていることから、デジタ

12 Apple Newsroom <https://www.apple.com/jp/newsroom/2024/06/visionos-2-brings-new-spatial-computing-experiences-to-apple-vision-pro/>

ルコミュニケーションにおいて、ユーザのインタラクションに応じた触覚レンダリングが不可欠である。例えば、共有される空間でユーザーがヒトやモノに触れる際、その表面の質感や抵抗感、力の方向と大きさを再現するような触覚提示が求められる。この触覚レンダリングは、視覚や聴覚情報と統合することで、より没入感の高いコミュニケーション体験を提供する。

これらの技術を考察すると、デジタル技術を活用したコミュニケーションは視覚や聴覚情報を効果的に活用し、物理的な制約を超えた新たな繋がりを提供していることがわかる。一方で、触覚情報の欠如が、他者の存在感や「繋がり」の実感を弱めるという課題も明らかである。アニメ「電脳コイル」⁹では、電脳世界を視認することができるメガネ型デバイス「電脳メガネ」が登場する。作中では、「触れられるものだけが本物だ」という台詞も存在し [1]、存在の有無を触覚を通して確認している。この課題を克服するためには、触覚を統合したデジタルコミュニケーションツールが欠かせない。また、デジタルコミュニケーションにおける視聴覚情報が空間化されている現状から、ユーザのインタラクションに応じた触覚レンダリング技術が必要であると考えられる。このような触覚を含む多感覚的なコミュニケーションは、未来のデジタルコミュニケーションの基盤を形成する重要な要素となるだろう。

1.3. 触覚がつくる日常

触覚は、日常生活においてあらゆる場面で活用されており、物理世界とのやり取りを行う。石器を扱う際の手応えや、火を扱う際の熱さ、狩猟で獲物を掴む際感覚など、古くから多くの場面で物理世界と触覚を介した情報のやり取りを行ってきた。また、ペンを持って文字を書く際の力加減の調整や、鍵の開け閉めにおける感触を確かめる行為は、触覚を通して精緻に行われている。これらの行為において触覚を介した情報のやり取りは、特別意識されることはないが、触覚がなければ成り立たない行為である。また、触覚は物理的な操作だけでなく、感覚としての快適さや安全性を提供する場面でも重要な役割を担っている。例えば、

9 電脳コイル 公式サイト <https://www.tokuma.jp/coil/>

靴を履いた時における遺物が侵入していた際の違和感，着ている衣服の素材感や着心地は，快適さや素材の選好に大きな影響を与える．また，触覚は危険を回避するための警告感覚としても機能している．熱い鍋に触れた際の反射的な動作は，生存において触覚がとても重要な役割を担っていることを示している．このように，我々の生活において触覚は欠かせないものであり，身体の動作や環境の知覚といった様々な役割を担っている．

さらに，触覚は，物体や環境との接触だけでなく，自己像を形成する重要な要素でもある．歯の治療をする際に麻酔を打たれ，自身の唇を触ると，唇が大きくなったように感じたことはないだろうか．この現象は，口でなく拇指の場合でも起こるという [2]．麻酔によって触れる感覚が鈍くなることで，自身の身体の一部に形状が知覚されづらくなっている．つまり，自身の身体の形状は触れることで形成されているのである．

また，触覚は，自己像だけでなく，モノの存在を認識する役割も担っている．「盲人が見えるようになった際，テーブルに置かれた立方体と球を，それに触る前に視覚で区別し，どちらが球体でどちらが立方体なのかを言えるか」というモリヌークス問題がある [3]．この問題は哲学上の未解決問題であるが，ジョン・ロック [3] は，「視覚と触覚は全く異なる感覚であるため，先天盲者は開眼して“最初に見た時”は，視覚的に球体と立方体を弁別することはできないだろう」と答えている．また，メルロ＝ポンティ [4] は，「触覚を含む身体的経験が物の存在を知覚する上で重要である」と述べている．これらのことから，モノの存在を知覚する機能は先天的に備わっているのではなく，モノを触るという経験に基づいて形成されると考える．つまり，モノの存在感は触覚を通して認識できるようになるのである．

また，触覚は他者とのコミュニケーションにおいて「存在感」を構築する重要な役割を担っている．例えば，握手やハイタッチなど，人と人とのコミュニケーションの中で相手と触れ合う行為は，相手の存在を認知し，力加減や温度を通じて無意識に多くの情報を交換する手段である．このような身体的接触を通じた相互作用は，間身体性の観点からも理解される．間身体性とは，自己の身体と他者の身体との間に潜在する相互的・循環的な関係性を指し，非言語的コミュニケーションの同期と同調を通じて表出する．さらに，Ishigaki ら [5] は，軽い身体接触

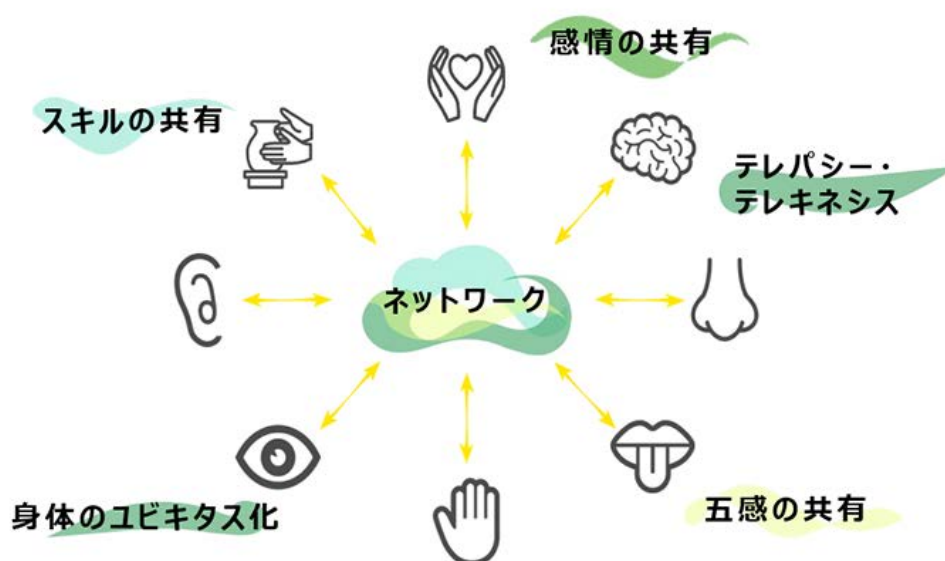
によっても、無意識的な二者間の姿勢協調が生じることを明らかにした。このような触覚を介した相互作用は、社会的な関係性の構築や維持に寄与し、他者の存在をより強く感じさせる要因となる。

さらに、触覚は、人と動物との関係を築く上でも重要な役割を果たしている。例えば、ペットを撫でる行為は、人が触覚を通じて動物との繋がりを感じ、絆を深めるための手段である。また、ペットの柔らかな毛並みや温かな体温を感じることは、ストレスを軽減し、心を落ち着かせる効果があることが知られている。Uvnäs-Moberg ら [6] は、ペットとの触れ合いがオキシトシンの分泌を促進し、人間のストレスホルモンであるコルチゾールの低下につながることを示した。また、触覚を通じたやりとりは、人がペットを「存在」として認識し、感情を共有するための重要な手段でもある。例えば、犬が寄り添ってきたときの体の温かさや、猫を撫でたときの毛並みの変化は、飼い主にペットがそこにいるという確かな感覚を与える。これらの触覚体験は、言葉を介さないコミュニケーションを成立させるだけでなく、人とペットの関係をより親密で特別なものにしている。このように、触覚は物理的な感覚にとどまらず、感情的な繋がりを意味付ける役割も果たしている。それは、人やペットとの触れ合いが、単なる日常的な行為を超えて、人間に深い安らぎや喜びをもたらす理由の一つである。

これらのことから、触覚は、物体、環境、そして生物との間で情報をやり取りする手段として機能していることがわかる。人が物体に触れることでその形状や材質を理解し、環境の中で温度や圧力を感知することは、触覚が情報取得の基盤である。また、ペットとの触れ合いや他者との握手などの行為において、触覚は感情を伝え、存在感を確認する重要なコミュニケーションの役割を担う。こうした触覚を通じた相互作用は「触覚コミュニケーション」として位置付けられ、日常生活の中で我々が周囲の世界と繋がるための根本的な仕組みであるといえる。

1.4. FEEL TECH Project

本研究は，株式会社NTTドコモ（以下，「NTTドコモ」）を主体とする共同研究プロジェクト，FEEL TECH^{®10}の一環である．FEEL TECH[®]とは，身体情報をデータ化して共有可能にする技術で，NTTドコモの開発する人間拡張基盤^{®1}上に実装されている（図1.2）．



（FEEL TECH 紹介資料¹¹より引用）

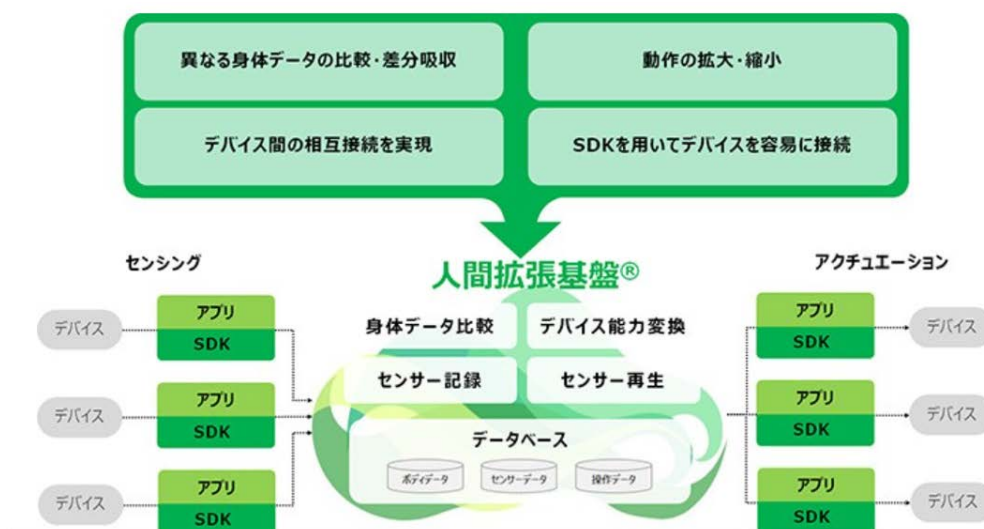
図 1.2 FEEL TECH[®] 未来図

現在までに，動作，触覚 [7]，味覚 [8] の共有を実現している．NTTドコモは，低遅延・超高速大容量の特徴を持つ次世代通信基盤 6G に感覚伝送技術を含め，人々のコミュニケーションを促進し新たな価値を創出することを目指している．人間拡張基盤 (図 1.3) 上で，個人の持つ触知覚感度をもとに送信者の触覚データを変換して自分ごとのように体感可能なシステムが提供される．これにより感度が下

10 「FEEL TECH」，「人間拡張基盤」は株式会社NTTドコモの登録商標である．

2 FEEL TECH 紹介資料 https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/rd/tech/6g/pdf/feel_tech.pdf

がりがちな年配の方でも主観的な体験として楽しむことができる。



(NTT ドコモ Web サイト¹²より引用)

図 1.3 「人間拡張基盤®」システム構成図

また、本プロジェクトでは、新たなコミュニケーションの形として感覚の共有を目指し、画面越しのコミュニケーションから進化した、空間を超えた感覚の共有を行うシステムの開発を行っている（図 1.4）。FEEL TECH®では、「離れていても触れられる」をコンセプトに、触覚を介したコミュニケーションによる相互理解を実現させる未来を描いている。これにより、遠隔コミュニケーションにおける触覚共有やスキルトレーニングなどの場面において、触覚共有による直感的理解が可能になると考える。

3 NTT ドコモ 報道発表資料 https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2023/01/25_00.html

4 「あなたと世界を変えていく。」フィールテック篇 | 30 秒 <https://www.youtube.com/watch?v=n8oubXOVJ00>



(docomo Official YouTube¹³より引用)

図 1.4 空間を超えた感覚の共有例

1.5. 本研究の目的

ここまで、遠隔コミュニケーション技術の歴史やデジタル技術とコミュニケーションとの関係、及び、日常における触覚の重要性、本研究の背景について述べてきた。その結果、触覚は、物体、環境、そして生物との間で情報をやり取りする手段として機能していることが判明し、コミュニケーションにおいて、対象との「繋がり」を付与する重要な役割を担っていることが判明した。また、テクノロジーの進歩に伴い、遠隔コミュニケーションは文通から、通話、電子メール、SMS、SNS、そしてオンライン会議ツールへと進化してきた。さらに、デジタル技術の進歩により、xR 空間での遠隔コミュニケーションといった、コミュニケーションの新しい在り方が生まれた。しかし、これらのコミュニケーションツールでは視覚や聴覚を中心とした情報のやり取りが行われており、触覚を伴うコミュニケーションは依然として欠如している。また、空間情報も共有可能なデジタルコミュニケーションでは、ユーザのインタラクションに応じた触覚レンダリングが不可欠である。また、本研究は NTT ドコモを主体とする共同研究プロジェクト、FEEL TECH の一環である。FEEL TECH では、遠隔コミュニケーションにおける感覚共有やスキルトレーニングなどの場面において、身体情報をデータ化して共有可

能にすることを目指す。そこで、本研究では、遠隔コミュニケーションをはじめとした空間を超えたインタラクションにおける触覚レンダリングシステムを構築することを目的とする。

1.6. 本論文の構成

本論文は6つの章で構成される。第1章では、本研究の背景及び目的、構成を示した。第2章では、本研究の関連研究として、触覚による存在感の知覚の仕組みと、触覚提示技術、触覚を通じたコミュニケーションについて述べる。第3章では、本研究における未来像と共同研究研究プロジェクトの概要、及びプロジェクト内での本研究の役割、そして、提案手法である触覚提示システムに関して述べる。第4章では、第3章で提案したシステムが期待の効果を生み出すかを検証する。第5章では、第3章で提案したシステムを組み込んだアプリケーションについて述べる。第6章では、本論文についてのまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

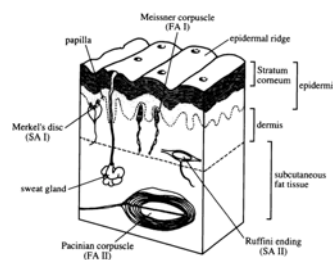
Literature Review

2.1. 触覚による存在感の知覚

触覚は，人と物体との物理的接触によって生じる感覚であり，視聴覚とは異なり，対象物に直接的な影響をもたらす．つまり，接触した人の皮膚にも対象物にも変化を与える双方向的な関係性を持つ感覚である．

2.1.1 皮膚構造

触覚は大きく，皮膚感覚と固有受容感覚に分類される [2, 9, 10]．皮膚感覚は物理的接触を行う皮膚を通じて知覚される感覚であり，振動覚・圧覚・冷温覚・痛覚などに細分される．図 2.1 に示すように，感覚受容器の中で，物理的な接触による皮膚変形に大きく関わる受容器は皮膚下に 4 種類存在し，Meissner 小体，Merkel 盤，Ruffini 終末，Pacinian 小体と呼ばれる．これら 4 つの受容器は複合的に応答しており，それぞれの知覚特性は異なっている．



(前野 (2000) [11] より引用)

図 2.1 無毛皮膚の組織および触覚受容体

2.1.2 触覚受容器

Jones ら [12] と Johnson ら [13] は、前述した触覚受容器のそれぞれの特徴を以下のように述べている [図 2.1].

- Meissner 小体：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。周波数領域は 1Hz～300Hz，最も知覚する周波数は 50Hz であり，低周波振動に応答する。
- Merkel 盤：表皮の一番深いところ，乳頭間溝と真皮との境界部に存在する受容器。周波数領域は 0Hz～500Hz，最も知覚する周波数は 5Hz であり，物体の形状を知覚する。
- Ruffini 小体：神秘のやや深いところに存在する米粒状の受容器。皮膚の引っ張りに応答する。
- Pacinian 終末：皮下組織内，真皮の真相に存在する卵形の受容器。周波数領域は 5Hz～1000Hz，最も知覚する周波数は 200Hz であり，高周波の振動で応答する。

表 2.1 各触覚受容器の知覚特性

Afferent type	SA1	RA	PC	SA2
Receptor	Merkel	Meissner	Pacinian	Ruffini
Location	Tip of epidermal sweat ridges	Dermal papillae (close to skin surface)	Dermis and deeper tissues	Dermis
Axon diameter	7–11 μm	6–12 μm	6–12 μm	6–12 μm
Conduction velocity	40–65 m/s	35–70 m/s	35–70 m/s	35–70 m/s
Sensory function	Form and texture perception	Motion detection, grip control	Perception of distant events through transmitted vibrations, tool use	Tangential force, hand shape, motion direction
Effective stimulus	Edges, points, corners, curvature	Skin motion	Vibration	Skin stretch
Response to sustained indentation	Sustained with slow adaptation	None	None	Sustained with slow adaptation
Frequency range	0–100 Hz	1–300 Hz	5–1000 Hz	0–? Hz
Peak sensitivity	5 Hz	50 Hz	200 Hz	0.5 Hz
Threshold for rapid vibration or indentation (best)	8 μm	2 μm	0.01 μm	40 μm
Threshold (mean)	30 μm	6 μm	0.08 μm	300 μm
Receptive field area (measured with rapid 0.5 mm indentation)	9 mm ²	22 mm ²	Entire finger or hand	60 mm ²
Innervation density (finger pad)	100/cm ²	150/cm ²	20/cm ²	10/cm ²
Spatial acuity	0.5 mm	3 mm	10+ mm	7+ mm

(Johnson ら (2002) [13] より引用)

2.1.3 能動触と触運動知覚

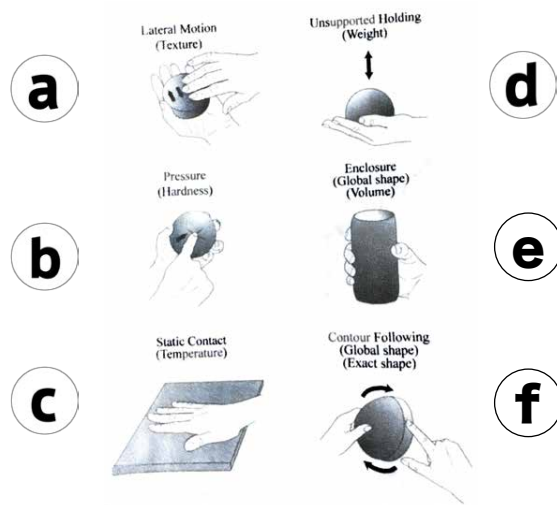
「接触」には，触ることと触られることの2種類が存在する．伊藤ら [14] は，触ることの知覚体験は対象であり，触られることの知覚体験は自己の身体であると述べている．また，Gibson [15] は，能動的に手を動かして触る動作を能動触と名付け，手を静止させて触覚刺激を受ける状態（受動触）との違いを示した．能動触においては，手指を動かし対象は静止している場合，継続的に面的情報を得られ，それらの情報が時空間的に関連づけられるため，対象の詳細な形状まで知覚することが可能である．一方，受動触においては，対象が動いている場合でも，対象の温度や硬さ，テクスチャ感は知覚できるが，対象の形や大きさについては限られた範囲でしか知覚できない，Jones ら [12] は，能動触による皮膚感覚に基づく触知覚と固有受容感覚に基づく運動知覚が時空間的に統合され，それぞれ単一の感覚から得る知覚とは異なる触運動知覚として知覚されると述べている．

Lederman ら [16] による触知動作の分類によると，人がモノに触る動作は，図 2.2 に示す 6 種に大きく分けられ，これらの動作から人はモノの特徴を認識する．このように，能動触においては触運動知覚の効果によって，モノから刺激を受けているという認識ではなく，モノの形状や材質，温度といった物理情報の認識が生まれ，モノの存在を知覚する．この触運動知覚が触覚提示技術において成立するためには，人の動きに応じた触覚レンダリングが不可欠であり，それによって初めて「自分自身が手を動かして触っている」「自分自身が感じている」ことが認識される．

2.2. 触覚提示技術

2.2.1 擬似触覚

擬似触覚（Pseudo-Haptics）は，視覚刺激を用いて触覚的な錯覚を引き起こす手法であり，機械的な触覚デバイスを必要としない触覚提示方法として注目されている．Ujitoko ら [17] は，その設計手法や応用例について包括的なレビューを行い，擬似触覚が持つ可能性を詳述している．

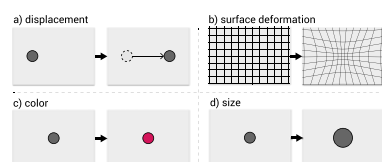


(Human Hand Function(2006) [12] より引用)

図 2.2 触知動作の分類

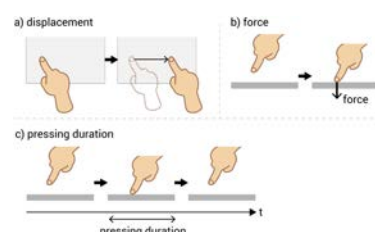
- (a) 横方向運動：モノの表面を手で撫でる動作。モノのテクスチャ感を取得しようとする際に最も多く用いられる。
- (b) 加圧運動：モノの表面と垂直な方向に手で押す動作。モノの硬さを取得しようとする際に最も多く用いられる。
- (c) 静的接触：モノに接触した状態を保つ動作。モノの温度を取得しようとする際に最も多く用いられる。
- (d) 非固定把持：モノを手に乗せる動作。モノの重量を取得しようとする際に最も多く用いられる。
- (e) 把持：モノを手で掴む動作。モノの大きさや大まかな形状を取得しようとする際に最も多く用いられる。
- (f) 輪郭追従：モノの輪郭を手でなぞる動作。モノの細かな形状を取得しようとする際に最も多く用いられる。

擬似触覚は、触覚の基盤となる物質的特性と幾何学的特性を視覚的に再現することで、ユーザに物体の触感や操作感を錯覚させる技術である。物質的特性としては、重さや弾性、摩擦、温度などが挙げられ、幾何学的特性には、形状や曲率、サイズなどが含まれる。これらの特性の分類は、Lederman ら [16] の触知動作の分類に基づいており、表 2.2 に、提示される触覚特性と視覚刺激、ユーザの動作の組み合わせが整理されている。これらの特性を、視覚的な変化としてユーザに提示することで、触覚に似た感覚を誘発する。この設計手法では、物体の変位や表面の変形、色、大きさの変化 [図 2.3] を視覚刺激として用い、変位や力、押下時間 [図 2.4] といったユーザの動作に応じてこれらを動的に変化させることが重要であるとされている。



(Ujitoko ら (2021) [17] より引用)

図 2.3 4種類の視覚刺激



(Ujitoko ら (2021) [17] より引用)

図 2.4 3種類のユーザの動作

これらの擬似触覚による触覚特性提示が多様な応用分野に適用されていることが示されている。例えば、医療分野では、外科手術のトレーニングシステムにおいて、視覚的に物体の硬さや柔らかさを提示することで、物理的な触覚デバイスを必要としない軽量かつコスト効率の高いソリューションが実現されている。また、エンターテインメントの分野では、バーチャル空間内での物体の操作感を向上させる技術として利用されており、ユーザが重さや摩擦を視覚的に体感できるシステムの構築が進められている。

一方で、擬似触覚の設計と応用にはいくつかの課題が指摘されている。その一つは、視覚刺激とユーザ入力とのズレ、いわゆるミスマッチの克服である。このズレが生じると、擬似触覚のリアリティが損なわれ、体験の品質に影響を与える可能性がある。また、物理的な触覚デバイスとの併用における最適な設計手法や、実験室外での実用的な応用に向けた課題も未解決のままである。これらの課題に対

表 2.2 擬似触覚での触覚特性提示のための視覚刺激とユーザ動作の組み合わせ

Target haptic property	Sub-property (if present)	User input	Visual stimuli	Reference
Weight	-	Displacement D Applied force F	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha D$)	[19], [20], [21], [22]
Weight	-	Displacement D	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha D$)	[23], [24], [25]
Weight	-	Angular displacement θ	Angular displacement θ' (e.g., $\theta' = \alpha \theta$)	[26], [27]
Weight	-	Angular displacement θ	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha \int \theta dt$)	[28]
Compliance	-	Displacement D Applied force F	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha D$)	[29], [30], [31], [32] [33], [34], [35], [36] [37], [38], [39], [40]
Compliance	-	Displacement D	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha D$)	[41]
Compliance	-	Applied force F	Displacement D' (e.g., $D' = \alpha F$)	[42], [43], [44]
Compliance	-	Applied force F	Surface deformation $d(F)$	[45], [46], [47], [48]
Compliance	-	Press duration Δt	Surface deformation $d(\Delta t)$	[49], [50]
Compliance	-	Displacement D	Surface deformation $d(D)$	[46], [51], [52], [53]
Compliance	-	Press duration Δt	Cursor color $c(\Delta t)$	[49]
Compliance	-	Applied force F	Skin color $c(F)$	[33], [45]
Compliance	-	Angular displacement θ Applied force F	Angular displacement θ' ($\theta' = \alpha \theta$)	[54]
Friction	Kinetic friction	Applied force F	Displacement D' ($D' = \alpha F$)	[29]
Friction	Kinetic friction	Displacement D	Displacement D' ($D' = \alpha D$)	[24], [55], [56], [57] [58], [59], [60]
Friction	Static friction	Displacement D	Displacement D'	[60], [61]
Friction	Viscosity	Displacement D	Displacement D'	[60], [62], [63]
Fine roughness	-	Displacement D	Perturbed Displacement D'	[60], [63], [64]
Macro roughness	-	Displacement D	Displacement D'	[65], [66], [67], [68] [69], [70], [71]
Macro roughness	-	Displacement D	Pointer size s	[60], [63], [68]
Thermal property	-	-	-	
Material	-	Displacement D	Displacement D'	[72]
Other	Force	Displacement D	Displacement D'	[73], [74], [75], [76] [77], [78], [79], [80] [81], [82], [83], [84] [85]
Other	Force	-	Displacement D' (of background image)	[86]
Other	-	Displacement D	Displacement D'	[87]

(Ujitoko ら (2021) [17] より引用)

しては、視覚刺激の設計精度を高めるとともに、ユーザの動作や環境条件に適応する動的な触覚提示技術の開発が重要であるとされている。

これらのことから、擬似触覚が従来の物理的触覚デバイスを補完し、あるいは代替する可能性を示す一方で、設計と応用における新たな課題を浮き彫りにしている。これらの課題に取り組むことで、擬似触覚はさらなる応用可能性を拓き、より幅広い分野での利用が期待される。

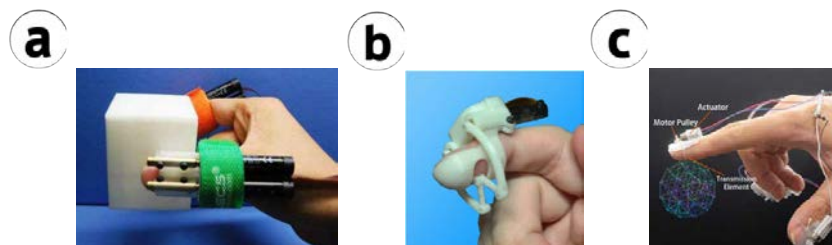
2.2.2 皮膚せん断変形による擬似力覚提示

これまでに、様々な装着型触覚提示デバイスが開発されており、それらが提示する刺激の種類は大きく力覚と皮膚感覚に分類される。中でも、皮膚せん断変形による力覚提示は、物理的な触覚デバイスを用いながら、皮膚にせん断刺激を与え、皮膚のズレを生じさせることで力覚の錯覚を引き起こす技術である。この手法は、軽量で装着性の高いデバイスによって、バーチャル環境や遠隔操作の現場で実用的な触覚提示を可能にする点で注目されている。

皮膚せん断変形は、指や手の皮膚に対するせん断応力を誘発することで、力覚や摩擦感、滑り感覚を提示する [18]。この技術は、皮膚表面の高密度な触覚受容器とその低い刺激閾値を活用し、実装の際に比較的シンプルな構造で高い効果を得られることが特徴である。例えば、指先に取り付けるデバイスにより、皮膚の動的なせん断刺激を与えることで、物体の重量感や摩擦力を提示できる。これにより、ユーザは視覚情報と同期した触覚体験を得られ、バーチャル環境における没入感が向上する。

具体的な応用例として、指先装着型のデバイスが挙げられる [図 2.5]。このデバイスは、ベルトやローラーを用いて皮膚を水平または垂直方向に引っ張る仕組みを持ち、ユーザが触れているバーチャルオブジェクトの質感や力覚をシミュレーションする。例えば、Minamizawa ら [19] が開発した触覚デバイスは、2つのモーターを用いて指先のベルトを動かし、皮膚にせん断刺激を与えることで、オブジェクトの重量感を提示することに成功している。また、Xu ら [20] が開発した触覚デバイスは、爪に装着する軽量なアクチュエータと細い糸を使用して、指先の圧力や摩擦感、滑り感覚を提示する構造を持つ。このデバイスは、軽量であること

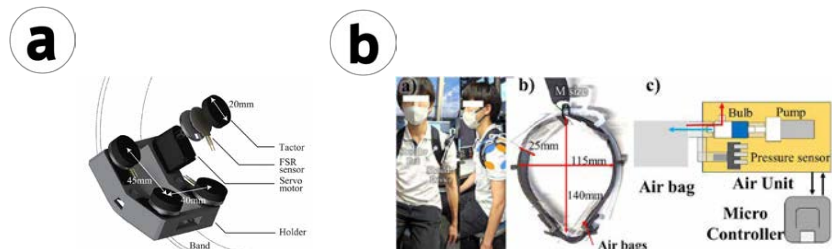
を重視して設計されており，日常生活での使用やバーチャル環境での操作において妨げにならないことが特徴である．



((a)Minamizawa ら (2007) [19], (b)Tsetserukou ら (2014) [21], (c)Xu ら (2024) [20] より引用)

図 2.5 指先装着型皮膚せん断刺激提示デバイス例

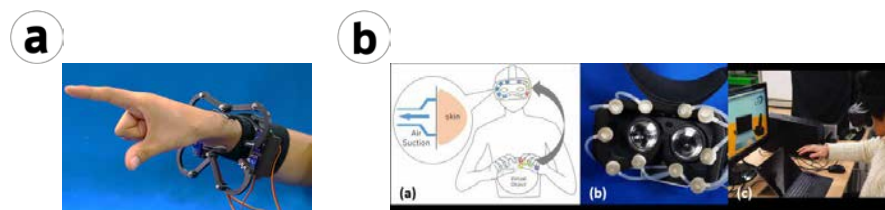
また，バーチャルオブジェクトとの接触による力覚や皮膚感覚の提示ではなく，固有受容感覚の提示に向けたデバイスも存在する [22, 23]．これらのデバイス [図 2.6] では，皮膚せん断刺激によって，腕や肩における力の入れ具合や強度，力の方向を提示している．これにより，力技能学習やリハビリテーションに向けた触覚提示が可能になる．



((a)Horie ら (2023) [22], (b)Nakamura ら (2024) [23] より引用)

図 2.6 固有受容感覚提示デバイス例

しかしながら，これらの技術にはいくつかの課題が残されている．例えば，デバイスの軽量化や低コスト化，またユーザの動きに応じた安定した刺激提示が重要な課題である．これに対し，デバイスの設計段階で刺激の精度と装着性のトレードオフを最適化することが求められている．



((a)Moriyma ら (2022) [24], (b)Kameoka ら (2021) [25] より引用)

図 2.7 触覚代替を用いた触覚提示デバイス例

2.2.3 触覚リマッピングとリターゲティング

触覚リマッピングは、触覚情報を本来の部位とは異なる場所に提示することで、知覚や認識を補完または代替する手法である。例えば、Moriyma ら [24] は、指先に生じる圧力と摩擦力を手首に提示する手法を提案した。また、Kameoka ら [25] は、指先に生じる圧力をヘッドマウントディスプレイ (HMD) と顔との接触部位に提示する手法を提案した。これらの触覚提示手法 [図 2.7] は、HMD が提示する視覚刺激による擬似触覚との組み合わせによる影響から効果が高まっていると考える。

一方で、人が感覚情報を競合する際に視覚情報を優位に競合することを活用し、単一のオブジェクトで複数のバーチャルオブジェクトに受動的触覚を提示する触覚リターゲティングが存在する。Azmandian ら [26] は、バーチャル空間の視覚情報を人の周囲にある物理的な小道具の位置に合わせて歪めることで、バーチャルリアリティ環境で触覚のリターゲティングを可能にした。

触覚リマッピングや触覚リターゲティングを活用することにより、触覚受容器が密に配置されている掌をフリーな状態にした上で触覚提示をしたり、触覚提示に用いるアクチュエータを減らしたりすることができると考える。しかし、触覚リマッピングでは本来提示する位置と異なる部位に刺激を提示していることによる違和感が生じる可能性があったり、触覚リターゲティングでは視覚情報の歪みによる違和感が生じる可能性があったりするという課題が存在する。これらの課題を考慮し、別の触覚提示技術との組み合わせによって課題の解決を試みながら触覚提示手法の設計を行うことが求められる。

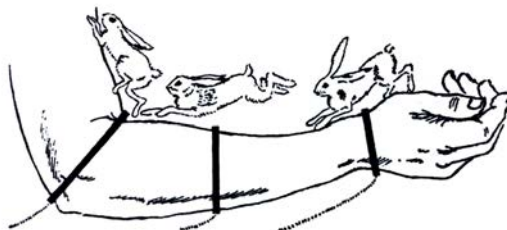
2.2.4 触覚における錯覚

触覚における錯覚には、ファントムセンセーションや仮現運動、皮膚兎などの現象が存在する。ファントムセンセーションは、機械的または電氣的な刺激が2つ以上同時に皮膚に提示された際に生じる触覚における錯覚効果である [27]。ある距離を隔てて皮膚上に2つの振動刺激を、同時あるいは短い時間間隔でほぼ同等の強度で与えた際に、2点の刺激として感じられず、その中間地点に1つの振動感覚として知覚される [14]。また、2つの刺激の強度差や時間差によって、触感覚知覚部位の変位が生じる。このように、複数点での触覚刺激提示によって起こるファントムセンセーションは、触覚デバイスに必要な刺激素子の数を大幅に減らすことができると考える。

一方で、触覚における仮現運動は、皮膚表面の異なる部位に刺激を提示する際に、わずかな時間差をつけることで、刺激が連続し移動しているように感じる錯覚効果である。Kirman ら [28] は、刺激を提示する時間および刺激間の距離間隔の変化が、視覚における仮現運動と類似した効果が得られることを明らかにした。仮現運動はファントムセンセーションと同じように、異なる刺激提示位置間に刺激が提示されているように感じる錯覚現象であるが、2つ以上の刺激を同時に提示するファントムセンセーションとは異なり、時間差によって刺激提示位置が移動しているように感じるものである。

さらに、触覚刺激の位置の変位現象に皮膚兎がある [12, 14]。図 2.8 のように、腕の一点から順次離れた点に振動刺激を与えると、刺激が滑らかに移動しているかのように知覚される。この効果は、触覚情報を連続的かつ効率的に伝達する手法として注目されており、バーチャルな力覚や動的な触覚情報の提示に応用できると考える。

このように、多くの触覚における錯覚効果が存在し、それらを用いて触刺激素子を高密度に配置する必要性を減らすことができる。これらの触覚における錯覚効果は、触覚の提示領域や感覚情報を柔軟に拡張するための基盤技術として、触覚提示デバイスの設計において重要な役割を果たしている。これまで研究されてきた様々な触覚提示刺激も、触覚における錯覚効果と組み合わせることで、より高度な触覚体験の実現が期待される。



(Human Hand Function [12] より引用)

図 2.8 皮膚兎

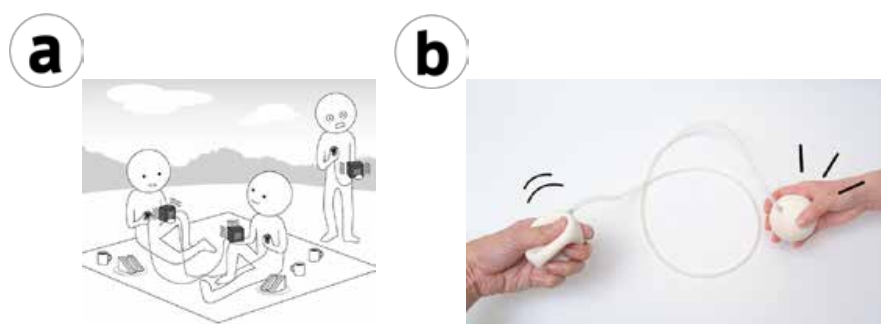
2.3. 触覚を通じたコミュニケーション

2.3.1 実世界での事例

触覚を通じたコミュニケーションの事例はいくつか存在する。握手やハグ、チークキスなど、人と人との挨拶の中で触覚を介したコミュニケーションが交わされている。このような直接的な接触による触覚コミュニケーションだけでなく、リレーにおけるバトンパスといった道具を介した触覚コミュニケーションも存在する。これらの行為は、コミュニケーションを行う対象間での感情や情報のやり取り、関係性の構築を行う役割を持つ。

また、触覚をメディア (媒体) としたコミュニケーション手法も存在する [図 2.9]。渡邊ら [29] が実施した“心臓ピクニック”と呼ばれるワークショップでは、自身の鼓動を振動として触れられるようにすることで、触覚をメディアとした他者とのコミュニケーションを実現させた。さらに、渡邊ら [30] は、晴眼者と視覚障がい者がスポーツ観戦の盛り上がりの共有を目的とした空気伝送触感コミュニケーションデバイスを開発した。このデバイスによって、自身の握り量に応じて空気が伝送され、ボールの膨らみを介したコミュニケーションが実現される。

このように、我々は普段から触覚を介したコミュニケーションを行っており、触覚を媒介としたコミュニケーションを実現させる触覚技術の開発が行われてきた。触覚コミュニケーション技術によって、密な双方向のコミュニケーションが可能になり、対象間の関係性の構築に繋がる。また、既存の視聴覚技術に触覚コミュニ



((a) 渡邊ら (2011) [29], (b) 渡邊ら (2020) [30] より引用)

図 2.9 メディアとしての触覚

ケーション技術を取り入れることで、よりインタラクティブなコミュニケーションの実現が期待される。

2.3.2 遠隔触覚コミュニケーション

触覚を介したコミュニケーションは、時間的及び空間的制約を超えて行われている。触覚フィードバックを通じて遠隔地との触覚コミュニケーションを行う研究が存在する。Follmer ら [31] と Leithinger ら [32] は、再構成可能で形状が変化するインターフェースを実現し、遠隔地の物理的物体や共有デジタルコンテンツの物理的レンダリングを操作可能にした。これにより、図 2.10 に示すように、遠隔地にいるユーザとの物理インタラクションが可能になった。また、早川ら [33] は、遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア”公衆触覚伝話”を提案した。このように、遠隔地にいる人とのコミュニケーションにおいて、触覚を付与することはより高い実在感、及び親密性に繋がる。

一方で、Taguchi ら [7] は、リアルタイムのマルチチャンネル触覚伝送に向け、既存のワークフローを活用し、振動触覚コンテンツを簡単に開発できるプラットフォームを提案した。これにより、図 2.11 に示すようなコンテンツにおける指先の皮膚感覚を、時間的、及び空間的制約を越えて共有することができる。

このように、様々なアプローチにより遠隔地との触覚コミュニケーションが可能になってきた。しかし一方で、これらの技術では、能動触による皮膚感覚に基



(Leithinger ら (2014) [32] より引用)

図 2.10 Physical Telepresence

づく触知覚を成立させる要素のみを含んでおり，固有受容感覚に基づく運動知覚を成立させる要素は含まれていない．そのため，相手の手の動きをトレースするような運動知覚を成立させる行為を行わなければ，「自分自身が手を動かして触っている」「自分自身が感じている」こととして認識されにくいと考える．



(Taguchi ら (2023) [7] より引用)

図 2.11 マルチチャンネル触覚の記録，編集，再生プラットフォーム

2.4. 本章のまとめ

本章では，まず触知覚のメカニズムについて調査した．触知覚において，「自分自身が手を動かして触っている」感を認識するには，触運動知覚と呼ばれる，能動的に触ることによる皮膚感覚に基づく触知覚と固有受容感覚に基づく運動知覚が時空間的に統合されて得る知覚が成立する必要があると判明した．この触運動

知覚が触覚技術において成立するためには、提示される触覚情報がユーザの動作に基づいてリアルタイムに編集される必要がある。

次に既存の触覚技術について詳細に掘り下げた。まず、機械的な触覚デバイスを必要としない触覚提示方法として擬似触覚について調査した。擬似触覚は、重さや弾性、摩擦、温度などの物質的特性と、形状や曲率、サイズなど幾何学的特性を視覚的に再現することで、ユーザに物体の触感や操作感を錯覚させる技術である。擬似触覚による触覚特性提示は、医療分野やエンターテインメント分野といった多様な応用分野に適用されている一方で、設計と応用には視覚刺激とユーザ入力の変位といった課題が指摘されている。このような課題に対して、視覚刺激の設計精度を高めるとともに、ユーザの動作や環境条件に適応する動的な触覚提示技術の開発が重要であるとされている。

また、これまで様々な装着型触覚提示デバイスが開発されており、中でも、皮膚せん断変形による力覚提示は、軽量で装着性の高いデバイスによって、バーチャル環境や遠隔操作の現場で実用的な触覚提示を可能にする点で注目されている。皮膚せん断変形は皮膚の変位を生じさせることで力覚の錯覚を引き起こす技術であり、比較的シンプルな構造で高い効果を得られることが特徴である。また、バーチャルオブジェクトとの接触による力覚や皮膚感覚の提示ではなく、固有受容感覚の提示に向けて皮膚せん断変形が用いられてきている。しかしながら、デバイスの軽量化や低コスト化、ユーザの動きに応じた安定した刺激提示といった重要な課題が残されている。

さらに、触覚情報を本来の部位とは異なる場所に提示することで、知覚や認識を補完または代替する触覚リマッピング手法が存在する。この技術は、触覚代替、ファントムセンセーション、皮膚兎といった現象や応用に関連して研究が進められており、触覚提示デバイスの設計において重要な役割を果たしている。触覚リマッピング技術による錯覚効果を引き起こすことにより、触覚デバイスに必要な刺激素子の数を大幅に減らすことが期待される。

最後に、コミュニケーションにおける触覚の役割や遠隔触覚コミュニケーション技術の現状を調査した。我々が普段行う握手やハグといった挨拶における触覚コミュニケーションだけでなく、触覚をメディアとしたコミュニケーション手法

が存在することが判明した。触覚コミュニケーション技術は、視聴覚情報にとらわれない双方向のコミュニケーションを可能にし、対象間の関係性の構築に繋がる。また、時間的及び空間的制約を超えた遠隔コミュニケーション技術の研究も行われており、触覚情報の伝送によって遠隔地とのリアルタイムな触覚コミュニケーションが可能になった。しかしながら、これらの技術では、ユーザが相手の手の動きをトレースするような運動知覚を成立させる行為を行わなければ「自分自身が手を動かして触っている」感を生成しづらいという課題が残されている。

これらの知見から、本研究は遠隔コミュニケーションをはじめとする複合空間での身体性インタラクションにおける触覚提示において、「自分自身が手を動かして触っている」感を生成するために、ユーザの動きに基づいたリアルタイム力触覚レンダリングを行うシステムの構築を目指す。従来の触覚提示手法は、主に静的な触覚情報や視覚・聴覚に依存した代替的な知覚体験を提供してきた。しかし、ユーザが能動的に物体や環境を探索する際に感じる能動触の感覚を再現するためには、ユーザの運動入力と触覚フィードバックがリアルタイムで同期する必要がある。この課題を解決する触覚レンダリングシステムを構築し、自己主体感を伴う触覚インタラクションを実現することを目指す。

第 3 章

Proposed Method

3.1. 触覚提示手法の設計

本研究では、複合空間での身体性インタラクションに向けた、ユーザの動きに基づくリアルタイム力触覚フィードバックシステムを構築する。ユーザの動きの拘束を避けるため、本研究における触覚提示デバイスはウェアラブルでポータブルである必要がある。また、自己主体感を伴う触覚インタラクションの実現に向け、ユーザの触運動知覚を成立させるため、本研究における触覚デバイスによる力覚や皮膚感覚の提示において固有受容感覚との整合性を保つため、ユーザの動作に基づく触覚レンダリングシステムが必要である。また、触覚デバイスの設計において、「何もないところを何もない感覚に」するため、触覚の透明性 (Haptic Transparency) が重要である [34]。そこで、本システムでは、ハンドインタラクション時に生じる触覚情報を力覚と皮膚感覚に分け、それぞれ別部位に触覚提示を行う。また、それぞれの触覚情報は、ユーザや接触対象の動作に基づいてレンダリングされる。

先行研究において、指先に生じる圧力や摩擦力を手首へ提示する触覚代替手法が有効であることが示された [24]。また、Horie ら [22] が提案する触覚デバイスは、回転皮膚せん断刺激分布を提示するものであり、回転素子の角度によって刺激強度の提示が可能である。そこで、本システムにおける力覚提示に向け、手首への回転皮膚せん断刺激分布提示を行う。

一方で、皮膚感覚提示に向け、本システムでは振動提示を指先に行うこととする。振動刺激は、周波数や振幅を調整することで、多様な触覚情報を提示できる技術として広く研究されてきた [18]。例えば、振動周波数を変化させることで、表

面の粗さや滑らかさ，摩擦の変化といった物体表面の触覚情報を模倣できる点が挙げられる．これらの特性により，振動提示は物理的な触覚体験を補完する手法として適している．本研究では，指先への振動提示を採用することで，ハンドインタラクションにおける繊細な皮膚感覚を効率的に再現し，触覚体験の鮮明さを向上させることを目指す（図 3.1）．

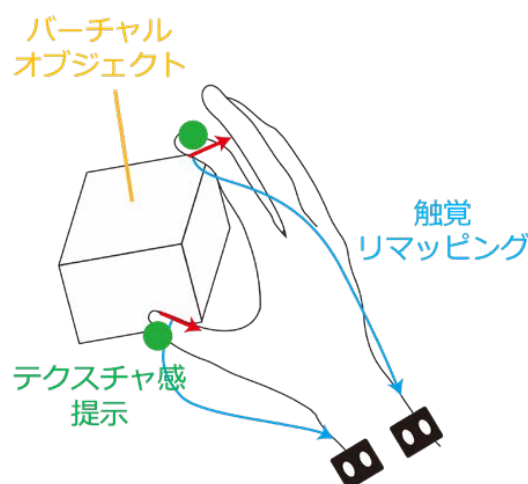


図 3.1 本研究での触覚提示手法

3.2. 開発体制

本プロジェクトにおいて，次世代通信基盤が伝送する 3 次元空間情報に対し，リアルタイムで触覚レンダリングできるようにすることは将来的な普及に繋がると考えている．そこで，本研究では 3 次元空間情報に対し，体験者の動作に合わせて触覚レンダリング及び触覚フィードバックを行うシステムを構築する．

図 3.2 に本研究の開発体制図を示す．本研究の開発には，複数の主要パートナーの協力によって実現される．各パートナーは，プロジェクトに独自のスキルと知識を提供し，包括的かつ多分野にわたるアプローチを行っている．以下に，本プロジェクトにおける各パートナーの役割を示す．

- NTT ドコモ：本プロジェクトのメインパートナー．慶應義塾大学大学院メ

ディアデザイン研究科 Embodied Media Project とビジョン・コンセプトを共創する。

- 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 Embodied Media Project: NTT ドコモとビジョン・コンセプトを共創する。また，触覚提示・センシング技術の研究を行う。
- 株式会社 commissure（以下,「commissure」）: 触覚提示・センシング技術の研究を行う。また，触覚デバイスの設計・試作を行う。
- 株式会社 SPLINE DESIGN HUB（以下,「SPLINE DESIGN HUB」）: commissure の製造パートナー。触覚デバイスのプロダクトデザイン・制作を行う。

筆者は，開発における触覚レンダリングシステムの構築，及び触覚コンテンツの開発を担う。

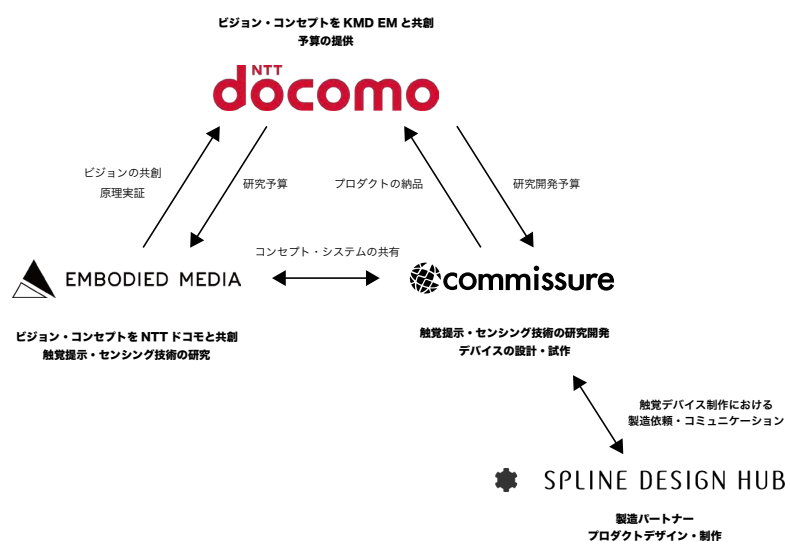


図 3.2 研究開発体制図

株式会社 NTT ドコモ，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 Embodied Media Project，株式会社 commissure による共同開発であり，株式会社 commissure の製造パートナー企業として株式会社 SPLINE DESIGN HUB が参画している。

3.3. 提案手法：FEEL TECH Wear

本節では，本プロジェクトで開発した触覚提示システム FEEL TECH Wear のハードウェアと触覚レンダリング手法について述べる．図 3.3 に本システムの構成図を示す．本システムは触覚レンダリングを行うソフトウェア，及び，触覚提示デバイスの制御ユニット，触覚提示を行うハンドデバイスで構成されている．

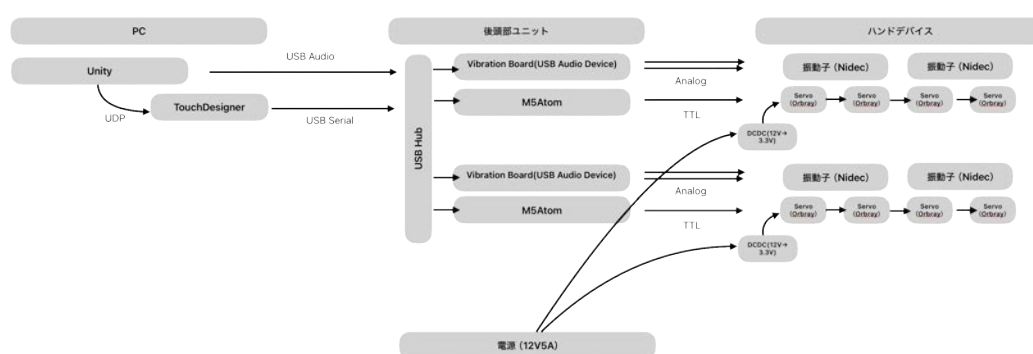


図 3.3 システム構成図

3.3.1 ハードウェア

FEEL TECH Wear のハードウェアは commissure と SPLINE DESIGN HUB によって設計・制作された．本デバイスは，装着時の装着感を最小化する設計思想で制作されており，図 3.4 に示すように FEEL TECH Wear のハードウェアは主に 2 つの要素から構成されている．手部装着デバイスには両手にそれぞれ手首に 4ch の回転皮膚せん断素子と，親指と人差指にそれぞれ振動素子が搭載されている．回転素子は小型のシリアルサーボ (RSV10-1003ESG400, Orbray 株式会社) によって回転角が制御されており，表面は自己粘着性を持つゲル素材でできている．指輪型の振動素子には LRA(CA7-VH5, ニデック株式会社) が搭載されており，小型軽量ながら高い強度の振動を提示することが可能である．全てのアクチュ

エータは独立に制御可能であり，その動作の組み合わせによって複雑なインタラクションを実現する．後頭部ユニットにはシリアルサーボに TTL コマンドを送信するマイコンおよび合計 4 つの振動子を駆動するためのオーディオアンプが実装されている．この設計により，触覚提示を行う手部装着部が最小化され，Haptic Transparency が担保される．また，本システムにおける触覚レンダリングによる効果を最大化する上で最適な設計がされている．

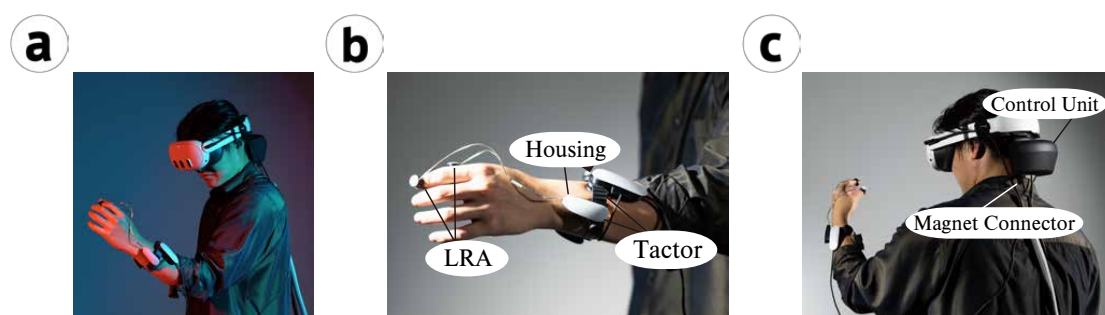


図 3.4 FEEL TECH Wear ハードウェア

(a)FEEL TECH Wear ハードウェア装着図，(b) 手首への 4ch 回転皮膚せん断タクタと親指と人差し指の先への振動子から成る手部装着型触覚提示デバイスと
(c) 後頭部装着型制御ユニット．

3.3.2 触覚レンダリング手法

FEEL TECH Wear の触覚レンダリングシステムは筆者によって設計・実装された．

方向性を持つ力覚提示に向けた手首回転素子の制御則

バーチャルオブジェクトとのハンドインタラクション時に手部に生じる力 $\hat{F}$ を提示するため，回転の皮膚せん断刺激を生じさせる回転角変換手法を設計した．手部に生じる力 $\hat{F}$ を図 3.5 に示すような手首の 3 次元直交基底から，式 (3.1) を用

いて直交分解を行う。ただし、 $\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}$ はそれぞれ手における 3 次元正規直交基底であり、 i, j, k は直交分解した際のそれぞれの基底の定数である。

$$\begin{pmatrix} \hat{p} & \hat{q} & \hat{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \hat{F} \quad (3.1)$$

直交分解をして得られた定数 i, j, k から、図 3.6 に示すように Skin-Stretch デバイスのサーボモータを回転させる。ただし、回転角変換係数を l° / N とし、このときの回転角はそれぞれ $l|i|^\circ, l|j|^\circ, l|k|^\circ$ とする。

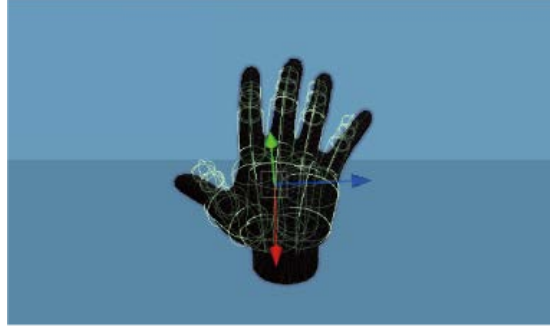


図 3.5 手における 3 次元基底ベクトル

(緑) 掌から甲に向かうベクトル $\hat{p}$ (赤) 指先から腕に向かうベクトル $\hat{q}$ (青) 親指から掌に向かうベクトル $\hat{r}$

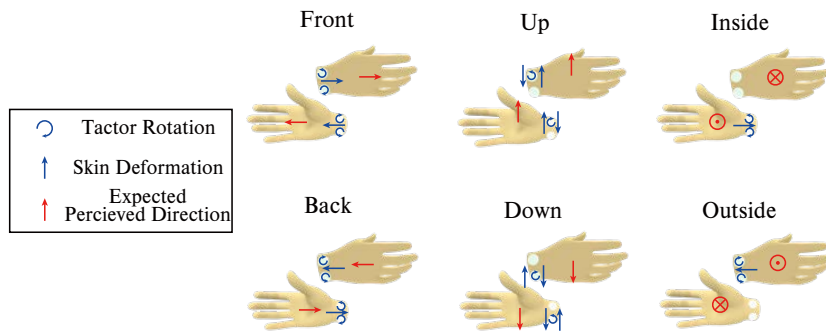


図 3.6 直交分解後の各基底に対応する回転の制御則

指先振動刺激のレンダリング手法

オブジェクトとのハンドインタラクション時に指先で生じる皮膚感覚を提示するため、指先と指先で触れたオブジェクトの接触点との相対速度 $\hat{v}$ を用いて振動波形をリアルタイムでレンダリングするシステムを設計した。

本システムでは、事前に振動データを WAVE 形式で用意し、ハンドインタラクション時の指先と指先で触れたオブジェクトの接触点との相対速度 $\hat{v}$ の値に応じて振動データの Volume と Stretch の値を変化させることで提示する触覚情報を変化させている。ただし、指先で生じる力を衝突力と摩擦力とで分離し、衝突力では Volume のみを、摩擦力では Volume と Stretch 両方を変化させている。また、用意する振動データは事前に収録したもの、及び、効果音などの音声データにローパスフィルタを適用して振動成分を抽出したものを使用した。

手首から指先への触覚リマッピング

節 3.3.2 で述べた、手部で生じる力を手首に提示する触覚代替を行なう場合、オブジェクトとの接触部位と触覚提示部位との違いによる違和感が生じる。そのため、本システムではファントムセンセーションの原理に基づき、手首提示刺激と指先提示刺激との強度バランスを調整することで違和感の低減を試みる。手首提示刺激の強度は節 3.3.2 で述べた回転角変換係数 $l [^\circ / N]$ として、指先提示刺激の強度は振動データの Gain 値として、それぞれを調整する。

3.3.3 触覚コンテンツの設計

本項では、提案した触覚提示システムを適用した体験コンテンツにおける設計・実装について述べる。体験コンテンツは、リアルタイムに遠隔の 3D 空間情報を取得し、MR 空間として再構築できることを仮定し、MR コンテンツとして設計する。

システムアーキテクチャ

本システムでは, TouchDesigner¹と Unity²を使用し, コンテンツにおける触覚レンダリング, 及びデバイス制御を行う. また, MR 体験を行うため, Meta Quest 3³を使用し, Meta XR Core SDK⁴からユーザーの頭や手指の姿勢情報, リアル空間の映像情報を Unity で取得する. 手首回転皮膚せん断刺激の提示の流れとして, Unity を用いて各サーボモータへの指示角度を決定し, TouchDesigner でコマンド生成およびシリアル通信をマイコン間で行っている. サervoモータの制御周期は 120Hz であった. 指先振動刺激の提示には Unity のオーディオシステム⁵と FMOD⁶, 及び AudioStream⁷を使用している. AudioStream では Unity の AudioManagerGroup に対し, オーディオの出力先を設定することができ, HMD と各振動子を出力先にした AudioManagerGroup を作成し, Mixer の Gain や Pitch Shifter の値をリアルタイムで編集することができる.

コンテンツとの統合

付録 A に手首せん断刺激分布のリアルタイムレンダリングに向けて実装した Unity 内のスクリプト DecompositionMatrix を示す. また, 図 3.7 にスクリプト内での主要な関数を示す. 触覚のリアルタイムレンダリングは, 手首や指先の姿勢 (Transform) 情報に基づき, それぞれのクラス内で定義された関数を呼び出す処理を毎フレーム行うことで実現する. この際, 計算の処理速度を担保するため, 直

1 TouchDesigner 公式サイト <https://derivative.ca>

2 Unity 公式サイト <https://unity.com/ja>

3 Meta Quest3 公式サイト : <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-3/>

4 Meta 開発者サイト https://developers.meta.com/horizon/downloads/package/meta-xr-core-sdk/?locale=ja_JP

5 Unity Audio System 公式ドキュメント <https://docs.unity3d.com/ja/2022.3/Manual/Audio.html>

6 FMOD 公式サイト <https://www.fmod.com/>

7 AudioStream 公式サイト <https://r618.github.io/>

交分解を行う行列式の実装を行なった．また，後述の第4章の実験により回転角変換係数 l° / N を調整し，オブジェクトを引っ張る・押すタスクにおいては1.0付近，オブジェクトを把持した際の重量感提示においては0.25付近，オブジェクトを撫でるタスクにおいては0.5付近が適切であると考え，設定した．

```

1  public static class DecompositionMatrix
2  {
3      // ハンドトラッキング情報から手首の 3 次元直行基底を取得する関数
4      public static Vector3[] GetWristBase(HapticSystemAdjuster.HandType handSide, Transform wristTransform)
5      // ハンドトラッキング情報から指先の 3 次元直行基底を取得する関数
6      public static Vector3[] GetFingerBase(HapticSystemAdjuster.HandType handSide, Transform fingerTip)
7      // 力ベクトルを直行分解をした際の係数を取得する関数
8      public static Vector3 DecompositionMatrix(Vector3 A, Vector3[] bases)
9      {
10         float[] Answer = new float[3];
11         double[,] AccelerationVec = { { A.x }, { A.y }, { A.z } };
12         double[,] HandsMatrix = { { bases[0].x, bases[1].x, bases[2].x }, { bases[0].y, bases[1].y, bases[2].y }, { bases[0].z,
13             ↳ bases[1].z, bases[2].z } };
14         double[,] HandMatrixInverse = inverseMatrix(HandsMatrix);
15         double[,] MyoSynthRotate = MatrixTimesMatrix(HandMatrixInverse, AccelerationVec);
16         for (int i = 0; i < MyoSynthRotate.GetLength(0); i++)
17         {
18             Answer[i] = (float)MyoSynthRotate[i, 0];
19         }
20         return new Vector3(Answer[0], Answer[1], Answer[2]);
21     }
22     // 左右の手首に提示したい力を回転角に変換する関数
23     public static float[] ConvertForceToAngles(Vector3 leftForce, Vector3 rightForce)

```

図 3.7 DecompositionMatrix スクリプト

また，付録 B に指先振動調整に向けて実装した Unity 内のスクリプト FingerVibrationAudio を示す．また，図 3.8 にスクリプト内での主要な関数を示す．指先や動きのあるオブジェクトには，ボーンに沿って衝突判定用の Collider を割り当て，衝突した Collider 同士の相対速度から刺激を設定する．また，後述の第4章の実験から得られた振動の強度設計を参考に，提示刺激の振動オーディオデータの音量を調整した．指先でオブジェクトと接触するタスクにおいては+5.0dB 程強めに設計し，掌全体で接触するタスクにおいては0.0dB と調整を行わず，オブジェクトを引っ張るような腕全体にも力を入れるようなタスクにおいては-2.5dB 程弱めに設計した．

```

1  public class FingerVibrationAudio : MonoBehaviour
2  {
3      AudioMixer _AudioMixer = null; //HMD と触覚音のミキサー
4      FingerVibrationAudioTable _FingerVibrationAudioTable = null; //各指の音源 Dictionary
5
6      protected AudioOutput[] _Left = new AudioOutput[2] { AudioOutput.LeftThumb, AudioOutput.LeftIndex }; //左手の指の音源
7      protected AudioOutput[] _Right = new AudioOutput[2] { AudioOutput.RightThumb, AudioOutput.RightIndex }; //右手の指の音源
8
9      protected string OculusPitchShifterID;
10     protected string LeftPitchShifterID;
11     protected string RightPitchShifterID;
12
13     // 特定の指に一度だけ振動音を再生する
14     public virtual void PlayOneShot_Vibration(HapticSystemAdjuster.HandType hand, HapticSystemAdjuster.FingerType finger,
15     ↪ AudioClip clip, float volume = 1.0f)
16
17     // 特定の指での振動音再生を開始する
18     public virtual void PlayAudio_Vibration(HapticSystemAdjuster.HandType hand, HapticSystemAdjuster.FingerType finger,
19     ↪ AudioClip clip, float volume = 1.0f, float stretch = 1.0f, bool loop = false)
20
21     // 特定の指での振動音の volume や stretch を変更する
22     public virtual void ChangeAudioPitch(AudioOutput output, float volume = 1.0f, float stretch = 1.0f)
23     {
24         var _AudioOutputTable = _FingerVibrationAudioTable.GetTable();
25         AudioSource _AudioSource = _AudioOutputTable[output];
26         if (_AudioSource != null)
27         {
28             _AudioSource.volume = volume;
29             _AudioSource.pitch = stretch;
30             switch (output)
31             {
32                 case AudioOutput.Oculus:
33                     _AudioMixer.SetFloat(OculusPitchShifterID, 1 / stretch);
34                     break;
35                 case AudioOutput.LeftThumb:
36                     _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1 / stretch);
37                     break;
38                 case AudioOutput.RightThumb:
39                     _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
40                     break;
41                 case AudioOutput.RightIndex:
42                     _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
43                     break;
44             }
45         }
46     }
47
48     // 特定の指での振動音再生を停止する
49     public virtual void StopAudio(AudioOutput output)
50 }

```

図 3.8 FingerVibrationAudio

3.4. 本章のまとめ

本章では、まず、本システムにおける、目的達成に向けた触覚提示手法の設計を行った。ユーザの動きの拘束を避けるため、本研究における触覚提示デバイスの設計をウェアラブルでポータブルなものに方針立て、力覚・皮膚感覚提示を行う触覚デバイスとユーザの動作に基づいた触覚レンダリングシステムが必要であると考えた。また、触覚デバイスの設計において Haptic Transparency を担保するため、ハンドインタラクション時に生じる触覚情報を力覚と皮膚感覚に分け、それぞれ別部位に触覚提示を行うこととした。

続いて、NTT ドコモを主体とする FEEL TECH プロジェクトの概要と、本研究及び筆者との関わりを明示した。FEEL TECH[®] とは、身体情報をデータ化して共有可能にする技術で、NTT ドコモの開発する人間拡張基盤[®] 上に実装されている。本プロジェクトにおいて、本研究では、3次元空間情報に対し、ユーザの動作に基づいた触覚レンダリングシステムを構築する。これにより、次世代通信基盤が伝送する3次元空間情報に対し、リアルタイムで触覚レンダリングすることが可能になり、将来的な普及に繋がると考える。

最後に、本研究の提案手法である FEEL TECH Wear における、ハードウェア及び触覚レンダリングシステムの説明を行い、Unity 上での実装方法を述べた。FEEL TECH Wear のハードウェアは、共同パートナーである commissure と、その製造パートナーである SPLINE DESIGN HUB によって設計・制作された。本デバイスは、装着時の装着感を最小化する設計思想で制作されており、Haptic Transparency を担保するために、手部装着部を最小化した上で、後頭部ユニットと2つに分かれている。手部装着部には、両手にそれぞれ手首に 4ch の回転皮膚せん断素子と、親指と人差指にそれぞれ振動素子が搭載されている。リアルタイムな触覚レンダリングを実現するため、方向性を持つ力覚提示に向けた手首回転素子の制御則、及び、指先振動刺激の振動波形の編集規則を設計した。また、触覚代替での接触部位と触覚提示部位との違いによる違和感を解消するため、ファントムセンセーションの原理に基づいた各刺激提示部位での刺激強度バランスの設計を行った。

第 4 章

Verification

本章では，第 3 章で述べた提案システムにおいて，手首回転皮膚せん断刺激分布が方向性を持つ力覚提示可能か，及び，手首提示刺激と指先提示刺激の強度バランス設計による触覚リマッピングが可能かを検証する．

4.1. 手首回転素子の回転角制御による刺激強度提示

本節では，手首への回転素子の回転角が刺激強度の提示に有効か評価する．また，実験を通じて得られたモデルの一貫性から，システムが所定の範囲で必要な機能を満たしていることを確認する．

4.1.1 実験環境

11 人の参加者 (平均年齢 25.7 歳，年齢幅 22 歳～33 歳，男性 7 人，女性 4 人) が本実験に参加した．参加者のうち 10 人は右利きで，1 人は左利きであった．

図 4.1 に本実験で使用した触覚刺激提示デバイスを示す．リストバンド型のウェアラブルデバイスであり，4 つの円形の Tactor が回転する事によって刺激を伝達する．回転素子は手の甲側に 2 つ，手の平側に 2 つ配置されている．搭載されている回転素子の直径は 25mm，厚みは 3mm であり，素材は滑りを抑制するために自己粘着性をもつゲルを用いた．ゲルの針入度は 55 であり，皮膚になじむことで接触面積を最大化している．アクチュエータには小型のシリアルサーボモーター (RSV10-1003ESG400, Orbray) を用いることで，薄型のフォームファクターを実現している．アクチュエータを固定しているハウジングは 3D プリントした TPU

製であり，アクチュエータ同士の間で屈曲することで回転素子を皮膚に対して可能な限り垂直に接触させる．回転素子同士の距離は最大で 50mm であった．

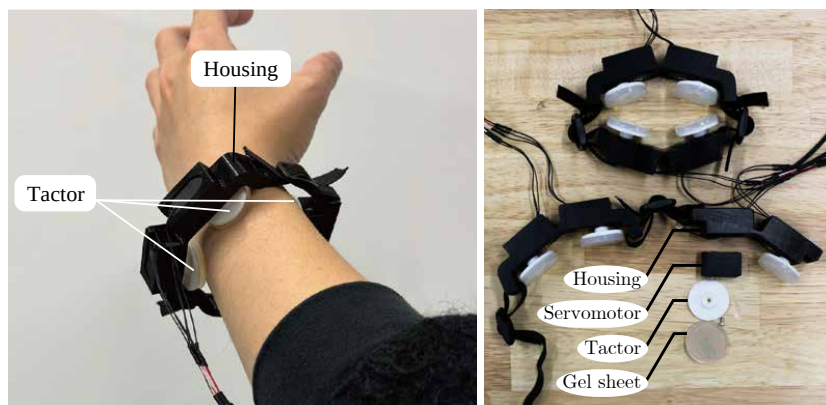


図 4.1 実験装置

ラバーバンドで接続された 2 つのモジュールが手首の掌側・甲側にそれぞれ配置されている．

図 4.2 に実験環境を示す．実験の最中，実験装置の回転による聴覚刺激の影響を低減するため，参加者はノイズキャンセリングヘッドホンでホワイトノイズを聴くことを求められた．

触覚刺激は力覚フィードバック装置に搭載された 1 つのサーボモータの回転によって提示された．回転角度は図 4.3 に示す 5 つのプロファイルに従って制御した．最大角度は 10° から 50° の間で異なっており，左回転と右回転の両方を用意した．すべての刺激の提示時間はすべて同じであった．各試行には参照刺激があり，参照刺激の回転角度は 30° であった．したがって，左右の手それぞれに対して 4 点の刺激位置に対して刺激強度および回転方向の組み合わせの 10 条件であった．

4.1.2 実験手順

参加者は参照刺激の後にテスト刺激が提示されることを知らされた．参加者は次に，参照刺激の強度に対するテスト刺激の強度をマグニチュード推定法で評価することが求められた．この時，参照刺激の強度は 30 であると仮定した．各参加

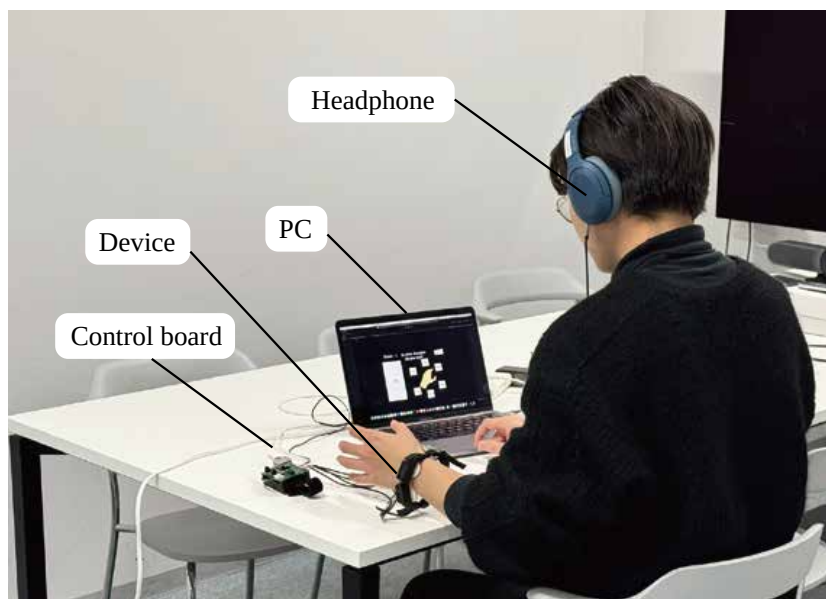


図 4.2 実験環境

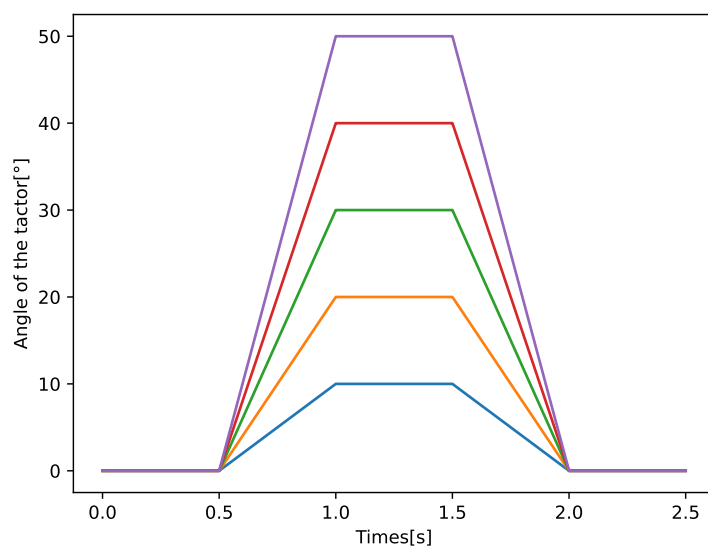


図 4.3 回転素子の時間的プロファイル

者は各テスト刺激を3回繰り返し各部位合計30回の試行を行った。実験の最中、参加者はノイズキャンセリングヘッドフォンでホワイトノイズを聴くことを求められた。各部位における試行の順序は無作為であり、30回の試行ごとに少なくとも30秒間の休憩をとった。刺激提示部位は両手首合計で8箇所であり、合計240回の試行を行った。実験時間は休憩時間を合わせて約80分であった。

4.1.3 結果

図4.4に各刺激部位での実験結果を示す。回転角10°の刺激については、知覚する強度が極度に小さく、実験参加者が強度を数値として判断ができなかったケースが多くあったため除外した。また、手の左右および回転方向によらず一貫した傾向が見られたため、データを統合している。色のついた点はその条件における各実験参加者の回答の平均値を表しており、黒い丸がその条件における実験参加者間の平均値を表している。

スティーブンスの法則は、物理的強度と知覚的強度の関係をモデル化するための確立された方法である。

$$\psi = k\phi^\alpha \quad (4.1)$$

式(4.1)を参加者全体の回答の平均にあてはめると、次のようになる。

$$\psi_{WristShellRadius} = 5.118\phi^{0.554} (R^2 = 0.984) \quad (4.2)$$

$$\psi_{WristShellUlna} = 5.747\phi^{0.520} (R^2 = 0.997) \quad (4.3)$$

$$\psi_{WristPalmRadius} = 5.266\phi^{0.543} (R^2 = 0.984) \quad (4.4)$$

$$\psi_{WristPalmUlna} = 5.827\phi^{0.518} (R^2 = 0.990) \quad (4.5)$$

すべてのモデルについて決定係数が0.98を超えており、実験参加者が知覚する刺激強度がこれらのモデルで説明可能であることが示された。また、提示位置同士でのモデルの間では指数の差は0.05以内に収まっており、手首における回転せん断刺激の強度は刺激提示位置に大きな影響を与えないことが示唆されている。図4.4の破線は各実験参加者のデータに基づいて式(4.1)にフィッティングしたモデルを表しており、式(4.2)-(4.5)は黒の実線にて表示している。

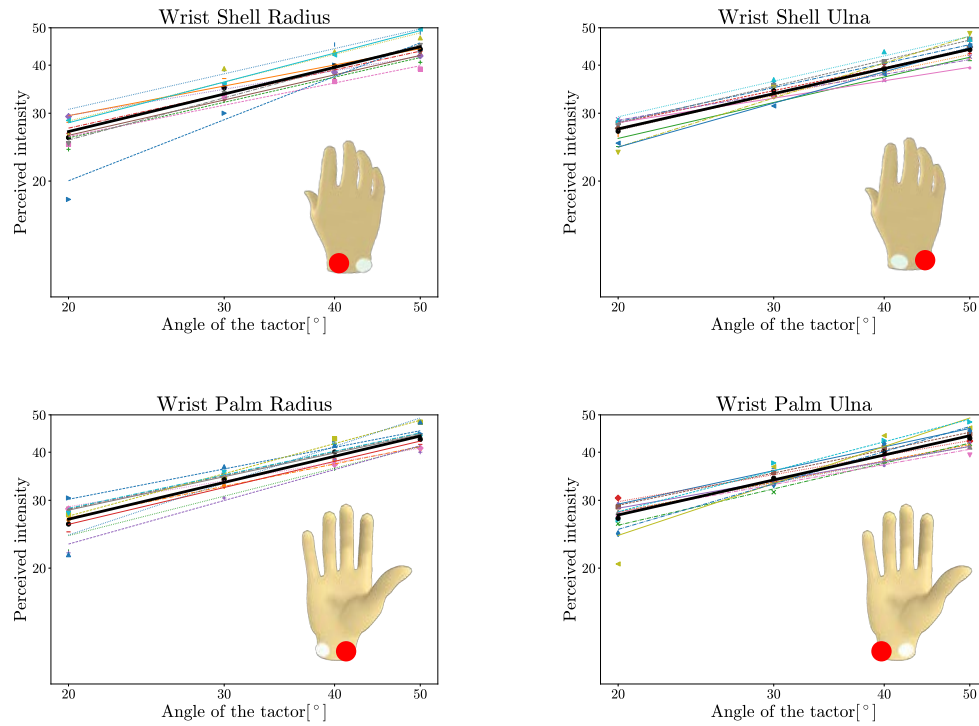


図 4.4 各位置における回転角度が 20° を超える場合の知覚強度

手首に示された赤い円は刺激の位置を示す．回転角度が 10° の刺激は，知覚強度が極めて低く，実験参加者が刺激の強さを数値で評価することが困難であったため除外した．データは，手の位置や回転方向に関係なく一貫した傾向が観察されたため，統合した．図中の破線は，スティーブンスの法則に従って個々の参加者のデータに当てはめたモデルを表し，黒色の実線は，全参加者のデータの平均に当てはめたモデルを表している．両方とも対数プロットでプロットされている．

4.1.4 考察

各刺激提示部位において、式 (4.2)-(4.5) のような一貫した知覚強度モデルを得られたことから、手首における回転せん断刺激の強度は刺激提示位置に大きな影響を与えず、回転素子の回転角が提示刺激の知覚強度に繋がることが明らかになった。また、本実験で得られた知覚強度モデルを活用することで、各部位に対して同等の刺激強度を提示することができる。

実験参加者が 10° の回転に対して回答が難しかった背景には、回転素子の素材の柔軟性あるいは回転によるブレスレットのねじれが起因していると考えられる。Horie ら [22] の研究において、前腕部に提示された回転せん断刺激強度に関する実験では 12° や 6° などの小さい回転角に対しても実験参加者は応答できていた。先行研究では Tactor の素材としてクロロプレンゴムスポンジを使用しているのに対し、本実験では針入度が 55 の比較的柔らかいゲルを用いている。このため、ゲル製の素子が回転による変位の多くを吸収してしまったことで、知覚の絶対閾値付近の刺激となった可能性がある。また、ブレスレットは固定されていないため、tactor の回転によってブレスレットのねじれが生じ、皮膚の変形量を減衰させている可能性がある。

4.2. 方向性を持つ力覚提示に向けた手首回転素子の制御則

本節では、回転素子の回転方向の組み合わせによって生じる回転せん断刺激分布が、方向性をもつ力覚提示に有効か評価する。

4.2.1 実験環境

節 4.1 の実験参加者はこの実験にも続けて参加した。また、実験装置は節 4.1 の実験装置と同様であり、実験環境は節 4.1 の実験環境と同様であった。

触覚刺激は図 4.1 に示す、力覚フィードバック装置に搭載された 4 つのサーボモータの回転によって提示された。デバイスに搭載された 4 つのアクチュエータ

はすべて独立に制御することができ、回転方向や回転角度を制御することによって手首に歪みの分布を生成することができる。隣り合う回転素子の回転方向に応じて、手首の内側、外側の素子間の皮膚に並進のひずみを生じさせたり、特定の位置の回転素子を動作させることによって局所的な刺激を提示するなど、刺激の分布による複雑な刺激設計が可能である。

設計可能な刺激分布の一例として、提案するデバイスが回転の刺激の分布によって方向性を持った力を提示するための2つの制御則である Local 制御則と Global 制御則を用意した.. 図 4.5 に2つの制御則に基づきデザインした前後上下内外それぞれの方向を提示すると期待される回転せん断刺激分布を示す。

Local 制御則に基づいた刺激分布は特定の方向に位置する2つの回転素子の回転の合成によって局所的に歪みの分布を生じさせ、方向を提示することを期待した。隣り合う2つの回転する素子間の提示方向側に皮膚が歪むようにそれぞれの回転素子の回転方向をデザインした。このアプローチでは提示方向に存在する素子のみが動作し、ユーザーに与える感覚的な手がかりを限定するため、ユーザーは特定の方向への力を知覚する可能性が高いと考えられる。提案するデバイスにおいて回転素子が前後に配置される箇所はないため、Local 制御則に基づいて誘発が期待できる力の方向は上下と内外であった。

Global 制御則に基づいた刺激分布は、手首内側と外側にそれぞれ提示する方向性を持つ力の合成によって全体の力の方向を提示するものである。この制御則では4つ全ての素子を回転させ、手首内側と外側にある2つの隣接素子の回転の合成によって指定方向に皮膚の歪みを生じさせる。例えば、Global 制御則を用いた Inside 方向の提示は、Local 制御則での刺激の提示に加えて手首外側に内側と逆向きの歪みを作るよう設計されている。また、Global 制御則では Front や Back に対しても、手首内側と外側で同方向の歪みを作るような設計をした。各試行での各 Tactor の最大回転角度は 30° であり、時間的なプロファイルは説 4.1 の実験で用いた図 N のプロファイルと同様であった。

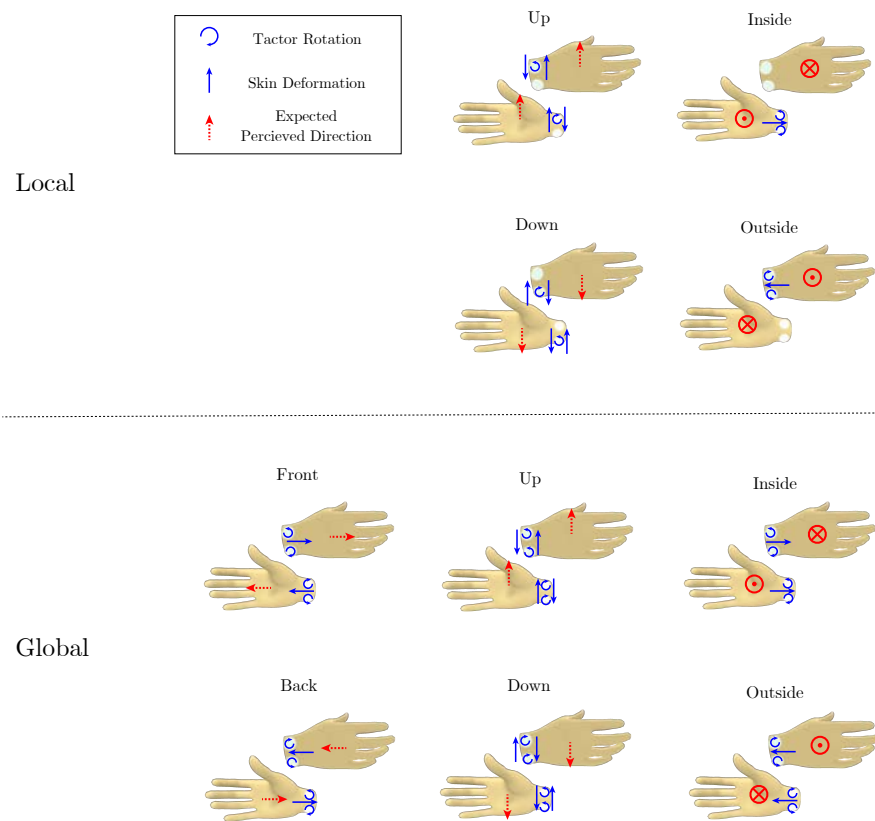


図 4.5 回転皮膚せん断刺激分布提示のための回転素子の2つの制御則

4.2.2 実験手順

参加者は前後上下内外いずれかの方向を知覚することを期待されるテスト刺激分布が提示されることを知らされた。参加者は次にテスト刺激分布が前後上下内外どの方向を示すものと感じたか回答することを求められた。ただし、方向を感じられなかった場合は”None”と回答するよう求められた。各参加者は左右いずれかの手にデバイスを装着し、10種類、3回の繰り返し試行をランダムに行い、30回の試行が完了した段階で5minの休憩が設けられた。続いてもう片方の手について同様の試行を行い、左右の手首合計60回の試行を行った。実験時間は左右合わせて約40分であった。

4.2.3 結果

表4.6に各条件に対する反応率を表した実験結果を示す。カイ二乗検定ではクロス集計表全体として差があるかを判断することができ、残差分析を行うことでどのセルに偏りがあるかを知ることができる。そこで、実験結果に対してカイ二乗検定を行った結果、有意な差が得られた($\chi^2 = 205.83, p < 0.0001$)。また、残差分析の結果、以下の刺激分布と方向の組み合わせでの方向提示が有意であることが示された。

4.2.4 考察

実験結果は、節3.3.2で提案したGlobal則とLocal則とを組み合わせた制御則を用いることで所望の方向への提示が可能であるということを示している。しかし、FrontやBackの際にGlobalの考え方を適用し、その他の方向についてLocalの考え方を適用する事によって、Up以外の条件においては方向提示が可能であると言える。指定方向へ直接的に皮膚を引き伸ばすわけでないため精度は下がるが、回転の歪み分布から方向を知覚する事ができることが示唆される。

結果を見ると、Local則の正答率がGlobal則の結果よりも高い。これは、Hongら[35]やStanleyら[36]の研究と同様、実験参加者が稼働している回転素子の位

Presented Stimuli	GlobalFront	21	12	18	10	21	12	4
	GlobalBack	16	25	13	12	6	9	16
	GlobalUp	12	22	22	19	10	6	6
	GlobalDown	13	13	22	7	1	19	21
	GlobalInside	13	10	28	6	15	15	10
	GlobalOutside	15	10	16	13	13	19	10
	LocalUp	1	12	25	18	19	6	16
	LocalDown	10	9	9	33	3	22	12
	LocalInside	10	4	7	15	42	7	12
	LocalOutside	13	6	10	6	12	46	4
		Front	Back	Up	Down	Inside	Outside	None
		Answer						

図 4.6 各皮膚せん断刺激分布における反応率 (%) を示す混合行列
 赤い四角で囲まれたセルは残差分析で有意に多いと明らかになったものである
 ($p < 0.05$).

置を知覚しているためと考えられる．しかし，Global 則において前後方向の知覚傾向が見られることを考慮して，参加者が素子の回転方向を知覚できているかより詳しい調査が必要である．

本実験では3つの軸での方向性提示について検討を行ったが，それらの軸の間の方向の提示手法については今後の課題である．実際の物体とのインタラクションにおいてはあらゆる方向に力が生じる可能性があるため，離散的に方向を提示するのではなく，連続的に方向が変化する力の提示が求められる．本実験で用意した2つの刺激セットを拡張し，提示する回転角度を調整することによって斜め方向の刺激を提示することができる可能性がある．他にも，振動刺激で提案されている Phantom Sensation を活用した位置情報提示の考え方 [37] を活用することによって，軸間の刺激を実現できる可能性がある．

4.3. タスク実行時の触覚強度バランス

本節では，バーチャルオブジェクトからの自然な触覚フィードバックに向けた，手首への回転皮膚せん断刺激と指先への振動刺激の強度バランスの評価を行う．図4.7のように，評価対象のタスクとして pull/poke/shake/stroke の4種類のハンドインタラクションを用意した．

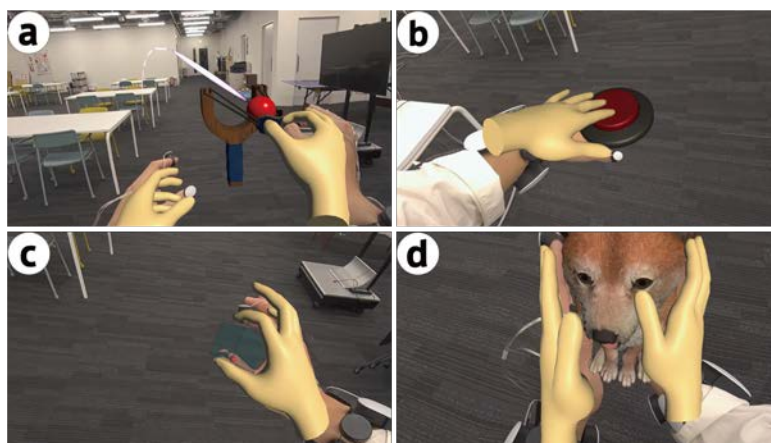


図 4.7 評価対象のハンドインタラクション

(a)pull (b)poke (c)shake (d)stroke

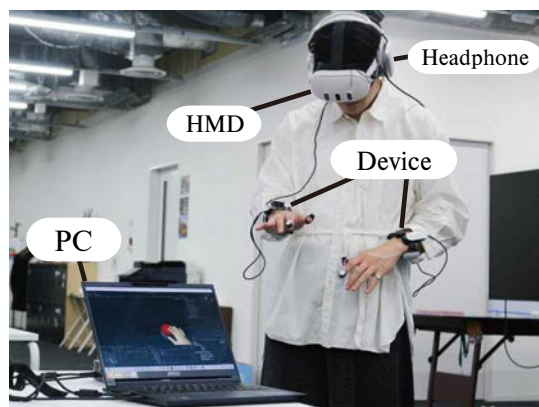


図 4.8 実験環境

4.3.1 実験環境

実験参加者は学生3名（平均年齢21.7歳，20～23歳，男性2名，女性1名）であった．実験環境を図4.8に示す．バーチャルオブジェクトとの接触を認識するため，ハンドトラッキングを行うことができるHMDとしてMeta Quest3を使用する．触覚提示デバイスは図3.4で示した手部に装着している．また，サーボモータの回転による音の影響を低減するため，ヘッドホンを装着し，ホワイトノイズを聴きながら実験を行った．3D環境のレンダリングにはUnityを用い，指先と物体の速度の取得にはVelocity Estimator¹を用いた．

実験時の衝突力と摩擦提示にはそれぞれ図4.9に示すような5Hzと50Hzの振動波形を用意した．実験時の振動波形のリアルタイムレンダリングは行わず，0.50N以上の衝突力と指先とバーチャルオブジェクトとの相対速度が $0.050m/s$ 以上の時の微細振動のみを振動刺激として提示する．また，回転の皮膚せん断刺激の強度として，回転角変換係数 l の値0.25，0.50，1.00の3段階を，振動刺激の強度として振動オーディオデータのゲイン値-10.0dB，+0.0dB，+10.0dBを用意した．

1 Velocity Estimator ドキュメント：https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/api/Valve.VR.InteractionSystem.VelocityEstimator.html

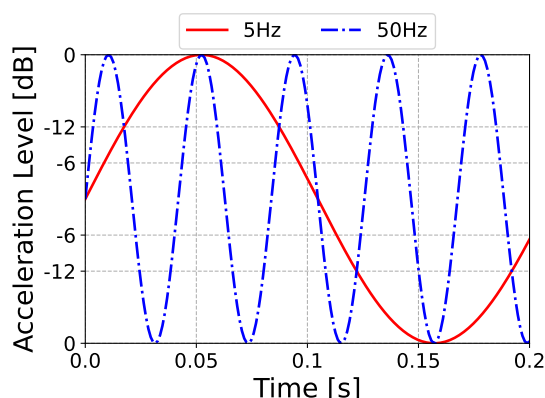


図 4.9 衝突力と摩擦提示の振動波形
(赤)5Hz, (青)50Hz

4.3.2 実験手順

各評価タスクにおける実験手順は以下の通りである。

- (1) タスク実行に慣れるため、装置を装着し、図 4.7 で示したタスクを順に行う。
ただし、各タスクの実行時間はオブジェクトとの接触開始から 10 秒間とし、
全てのタスクにおける触覚フィードバックは行わないものとする。
- (2) 各刺激強度の組み合わせをランダムな順序で設定し、(1) で行なったタスク
を行う。
- (3) (2) で行なったタスクを各刺激強度の組み合わせを変えて繰り返す。ただし、
各刺激強度の組み合わせ (全 9 種) は 1 セットのみ用意するものとする。
- (4) すべてのタスクにおいて全刺激強度の組み合わせで体験した後、対話形式で
3 つの質問に回答する。用意した質問は、各タスクにおいて試行回数ごとに
触覚刺激の違いを感じたか、それぞれのタスクに適した触覚強度バランスは
あると感じたか、その他感じたことはあるかである。

表 4.1 実験参加者への質問の回答

	触覚刺激の違い	適切な強度バランス	その他コメント
参加者 A	やや違いがわかる	押すタスクでは指先振動、 振るタスクでは手首側の刺激 が強い方がよかった。	めり込み量で刺激が設計されて いるのがわかり、犬の形状が 触覚情報からでもわかるような 気がした。
参加者 B	ある	振るタスクは振った時の揺動感 より指先の衝突感を示す振動を 強くした方がよかった。 引っ張るタスクは手首の方が 強い時の方がリアルだった。	犬を撫でた時の振動が ふわふわ感に近かった
参加者 C	手首はわかるが 指先はあまり変化ない	全てのタスクにいえるが、 全ての指先にフィードバック があるとよい。 振るタスクは指先振動が強い とよい。	振るタスクでは、指先の振動の 大きさに波がある方がよかった。 引っ張るタスクでは手首の刺激 から提示される方向がわかった。

4.3.3 結果

表 4.1 に実験参加者から得られた回答をまとめる。全ての参加者は少なくとも皮膚せん断刺激の強度を知覚できたと回答した。また、すべての参加者は stroke のタスクにおける適切な強度バランスについて語らなかった。参加者の中には提示した皮膚せん断刺激の強度だけでなく、刺激の変位から刺激をどのように設計したかを知覚した者がいた。

4.3.4 考察

表 4.1 の刺激強度の違いに関する回答から、全ての参加者は少なくとも皮膚せん断刺激の強度を知覚できたと考える。また、参加者の中には手首に提示した回転の皮膚せん断刺激分布の変位から pull タスクにおける提示刺激の方向を知覚した者がいた。節 4.2 では回転タクタの制御測から方向性のある力覚を提示する能力を予備的に調査した。しかし、回転タクタの制御測を組み合わせによって異なる軸間の連続的な力の方向変化を知覚することに有効であるかは自明ではない。pull タスクのようにユーザが提示されるべき連続的な力の方向変化を能動的に制御できる時、複数の制御ルールを組み合わせることで所望の機能を実現できることを

示唆している。

また、表 4.1 の刺激強度バランスに関する回答から、各タスク実行時における適切な触覚強度バランスが存在することが示唆される。pull タスクのように他のタスクよりも強い力の提示が要求されるタスクにおいては、より提示可能な刺激強度が高い手首回転皮膚せん断刺激を強く設計することが好まれる。また、手全体にかかる力より指先の皮膚感覚を意識するタスクにおいては、指先振動刺激を強く設計することが好まれると期待する。

4.4. 本章のまとめ

本章では、まず、提案システムにおいて、手首回転皮膚せん断刺激分布が方向性を持つ力覚提示可能かを検証した。手首回転皮膚せん断刺激分布による方向性を持つ力覚提示の検証では、回転皮膚せん断刺激が知覚強度を提示可能かの検証と、回転皮膚せん断刺激分布が知覚方向を提示可能かの検証を行った。2つの検証における実験参加者及び実験環境は共通しており、実験参加者は知覚強度の検証実験に参加した後、知覚方向の検証実験に参加した。知覚強度の検証において、参加者はテスト刺激の強度をマグニチュード推定法で評価した。その結果、回転角 10° の刺激については、知覚する強度が極度に小さく、実験参加者が強度を数値として判断ができなかったケースが多くあったが、手首における回転せん断刺激の強度は刺激提示位置に大きな影響を与えず、一貫した知覚強度モデルを得られた。知覚方向の検証において、提示刺激は 10 パターン用意され、参加者はテスト刺激分布が前後上下内外どの方向を示すものと感じたか回答した。その結果、手首に位置する 4 つのサーボモータのうち、特定の方向に位置する 2 つのサーボモータを回転させることによる局所的な刺激分布が知覚方向を提示する可能性が示唆された。ただし、4 つのサーボモータの配置は手首における前後方向に局所的な刺激分布を提示することはできないため、隣接するサーボモータの回転の合成によって指定方向に皮膚の歪みを生じさせることで、指定の知覚方向を提示可能であると考えられる。これらのことから、本システムにおける手首回転素子の回転の制御則は方向性を持つ力覚提示に有効であると考えられる。

次に、提案システムにおいて、手首提示刺激と指先提示刺激の強度バランス設計による触覚リマッピングが可能かを検証した。手首提示刺激と指先提示刺激の強度バランスの設計には、サーボモータの回転角変換係数と振動オーディオミキサーの Gain 値が用いられ、提示刺激強度バランスにはそれぞれの値の組み合わせを 9 パターン用意された。参加者は pull・poke・shake・stroke4 つのタスクをランダムな順序で設定された提示刺激強度バランスで行い、体験終了後に対話形式で行われる質問に回答した。その結果、全ての参加者は少なくとも手首皮膚せん断刺激分布の強度の違いを知覚できたと回答した。また、参加者の中には pull タスクにおける提示刺激の連続的な方向変化を知覚する者がおり、特定の方向提示だけでなく連続的に変化する方向提示の可能性が示唆された。さらに、参加者はそれぞれいくつかのタスクにおいて、手首及び指先の刺激の好みの強度が存在すると述べた。したがって、本システムにおける触覚リマッピングに刺激強度バランスの設計が有効であることが示唆された。

これらの検証から、提案システムは多自由度な力覚提示に有効であり、ファントムセンセーションの原理に基づいた手首と指先の刺激強度バランスの設計は触覚リマッピングに有効であると考えられる。多自由度な力覚提示においては、連続的な力の方向の変化や強度の変化も提示可能であることが示唆される。また、提案システムをコンテンツに実装する際、コンテンツ内で行われる各タスクにおける適切な触覚強度バランスの設計が必要とされる。リアルタイムで空間情報が共有される際、空間情報から行われるタスク群を予測し、各タスクにおける触覚強度バランスの設計をリアルタイムで行う必要がある。

第 5 章

Validation

5.1. MR.Dog : Mixed Reality Haptic Interaction with Virtual Dog

本システムを使った MR 触覚コンテンツとして，MR 空間内でバーチャル犬と触覚インタラクションを行うコンテンツ MR.Dog を作成した．

5.1.1 コンテンツ概要

MR.Dog では，図 5.1 に示すようなバーチャル犬とのインタラクションにおける触覚情報をユーザの動きに応じてリアルタイムにレンダリングして提供する．MR.Dog は，Unity ゲームエンジンで作成され，コンテンツ内での手の動きは，Meta Quest3 のハンドトラッキングシステムを通じて取得される．

5.1.2 実装

図 5.2 に，コンテンツ内で実装したクラス図を示す．本システムを用いたコンテンツを開発する際は，各インタラクションに対して，手首回転皮膚せん断刺激を制御する HapticForceCalculator の継承クラスと，指先振動刺激を設計する FingerVibrationAudio の継承クラスを用意し，それぞれをインタラクションを行うオブジェクトにアタッチする必要がある．また，各インタラクションにおける触覚刺激の制御クラスを実装することで，インタラクション時の触覚レンダリングが行われる．

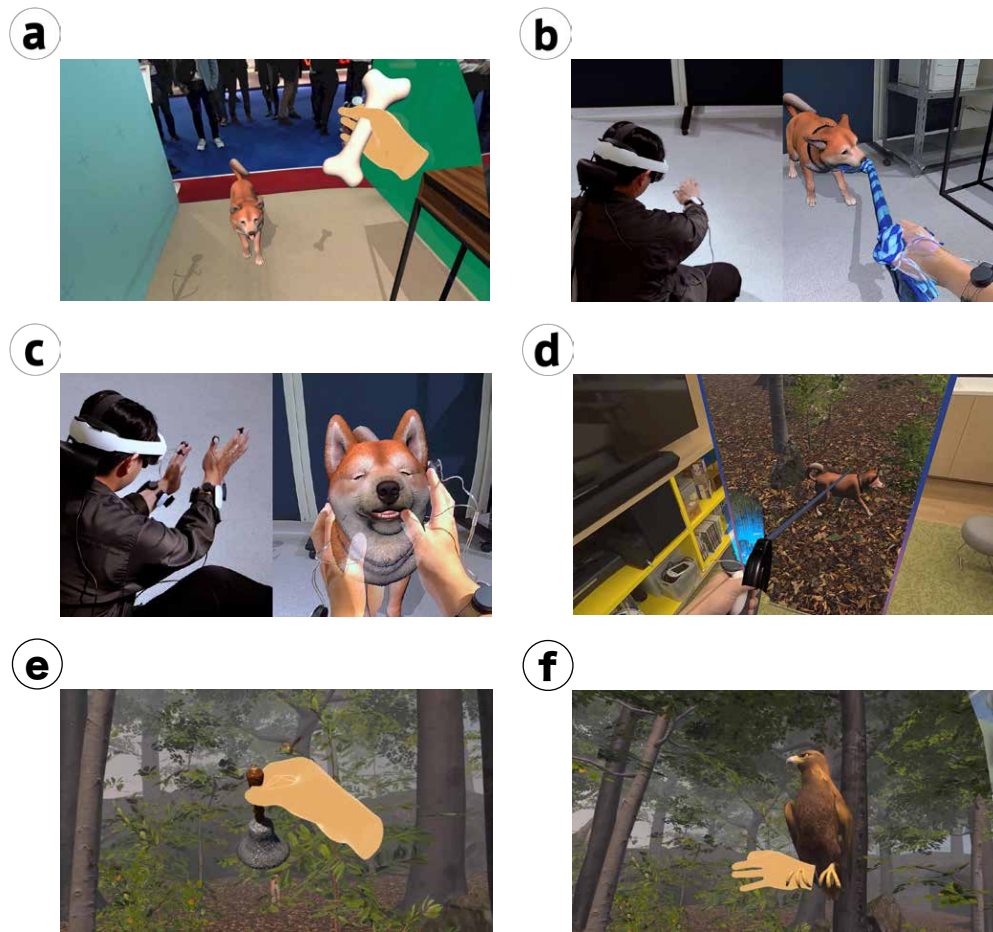


図 5.1 インタラクションの様子

- (a) シャカシャカなる骨のおもちゃを振って眠っている犬を呼び起こす.
- (b) 紐のおもちゃを咥えさせ、引っ張り合う遊びを行う.
- (c) 犬を撫でて可愛がる.
- (d) リードを把持して森に移動し、散歩する.
- (e) 飛んできた鷲に注意を引かれた犬を、ベルを鳴らして呼び戻す.
- (f) ベルの音に釣られてやってきた鷲に腕を掴まれる.

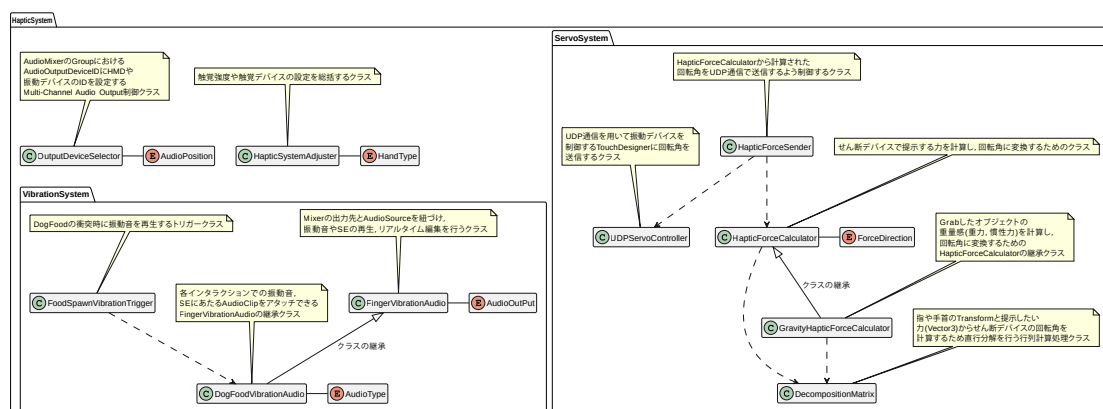


図 5.2 コンテンツ内での実装クラス図

5.1.3 MWC24 でのデモンストレーション

完成した MR.Dog を持って、2024 年 2 月 27 日から 2 月 28 日にかけてバルセロナで開催された「MWC24」¹内でデモンストレーションを行った。合計 400 人以上の国内外の参加者に体験いただいた。デモンストレーションでは、図 5.3 のように約幅 4m 奥行き 3m の VR スペースを割り当てられ、2 レーンで行われた。体験者は、VR スペースを HMD を装着して歩き回ることによって体験を行う。VR スペースの外に出ないように、安全のため HMD に標準装備されているガーディアン機能を使用した。

はじめに、体験者は、触覚提示デバイスと HMD を装着し、待機シーンで年齢区分選択をし、触覚強度を調整する。その後、体験シーンに遷移し、MR.Dog を体験する。MR.Dog のフィードバックは、主に体験中の反応や体験後デバイスを外す際に行った簡単なインタビューから得た。体験者の多くから「紐が犬の方に引っ張られる感じがした」や「ベルを鳴らした感覚が本物のようだった」、「確かに驚に腕を掴まれた感じがした」といった好意的なコメントをいただいた。しかし、「犬の毛並み感がリアルではない」といった否定的なコメントもいただいた。

¹ MWC24 Post Event Report

<https://www.mwcbarcelona.com/post-event-report>



図 5.3 MWC24 での体験の様子

5.1.4 考察

体験者の多くは驚に掴まれる際に提示した触覚刺激を最もリアルな感覚であったと述べた。驚に掴まれる際に提示した刺激は手首への回転皮膚せん断刺激分布のみであり、ユーザーはバーチャルな森空間に遷移している。このことから、バーチャルオブジェクトとの接触部位と触覚刺激提示部位が一致していることと装着しているデバイスが刺激提示時に見えていないことが触覚刺激のリアルさに繋がる可能性が示唆される。しかし、手で把持している状態で触覚刺激が提示される「紐の引っ張り合い」や「ベルを鳴らす行為」に対しても、体験者は好意的なコメントをしている。このことから、節 4.3 で評価した手首提示刺激と指先提示刺激の強度バランスの設計が有効であると考ええる。

また、デバイスを装着することにより、Meta Quest3 のハンドトラッキングが外れてしまうことが体験中稀に発生することが判明した。デバイスの装着位置や向きを調整することで現場での解決を行なったが、カメラベースでのハンドトラッキングシステムを阻害しない設計を再度行う必要があると考える。

さらに、犬を撫でるといったモノを触るインタラクション時には、多くの体験者はオブジェクトの輪郭に沿うような手の動きで撫でていた。バーチャルオブジェクトに対する体験者の手のめり込み量に応じて反力提示を手首側の刺激で行って

おり、手がオブジェクトに触れていることを認知しやすいことが影響すると考える。また、視覚情報としてもオブジェクトにめり込まないバーチャルハンドを表示しており、触れているオブジェクトが目の前に存在すると意識し、輪郭に沿った手の動きをしていたと考える。

5.2. リアルオブジェクトを介した触覚の Mixed Reality の設計

MR.Dog のコンテンツの追加インタラクションとして、リアルオブジェクトを介したバーチャルオブジェクトとのインタラクションを実装した。リアルオブジェクトの姿勢トラッキングのため、Meta Quest3 のマルチモーダルトラッキング機能²を使用する。インタラクションに使用するリアルオブジェクトにコントローラを取り付け、コントローラの姿勢情報をバーチャルオブジェクトと一致させることで、Unity 内での触覚レンダリングを可能にした。リアルオブジェクトを介した触覚の Mixed Reality を使用したインタラクションとして、「バーチャル犬へのエサやり」と「散歩」を実装した (図 5.4)。



図 5.4 各インタラクションの様子 (主観図)

2 Meta 公式ドキュメント 手とコントローラを同時に使う (マルチモーダル)

https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-multimodal/?locale=ja_JP

5.2.1 コンテンツ概要

追加インタラクションを含め、バーチャル犬とのハンドインタラクションを行う新たな体験コンテンツを制作した。図 5.5 に本コンテンツの流れを示す。

5.2.2 SIGGRAPH2024 でのデモンストレーション

完成したコンテンツを持って、2024 年 7 月 29 日から 8 月 1 日にかけてデンバーで開催された「SIGGRAPH 2024 Emerging Technologies」³内でデモンストレーションを行った。合計 100 人以上の国内外の参加者に体験いただいた。デモンストレーションでは、図 5.6 のように約幅 3m 奥行き 4m の VR スペースを割り当てられた。体験者は、VR スペースを HMD を装着して歩き回ることによって体験を行う。VR スペースの外に出ないように、安全のため HMD に標準装備されているガーディアン機能を使用した。

体験者は、触覚提示デバイスと HMD を装着し、体験を行う。以下に、体験の流れを示す。

- a パチンコを使って風船を狙い撃つ。
- b ボトル(リアルオブジェクト)を使用し、ドッグフードを取得し、バーチャル犬へエサやりを行う。
- c 紐のおもちゃを咥えさせ、引っ張り合う遊びを行う。
- d リード(リアルオブジェクト)を把持して森に移動し、散歩する。
- e 飛んできた鷺に注意を引かれた犬を、ベルを鳴らして呼び戻す。
- f ベルの音に釣られてやってきた鷺に腕を掴まれる。

3 SIGGRAPH 2024 Emerging Technologies

<https://s2024.siggraph.org/program/emerging-technologies/>

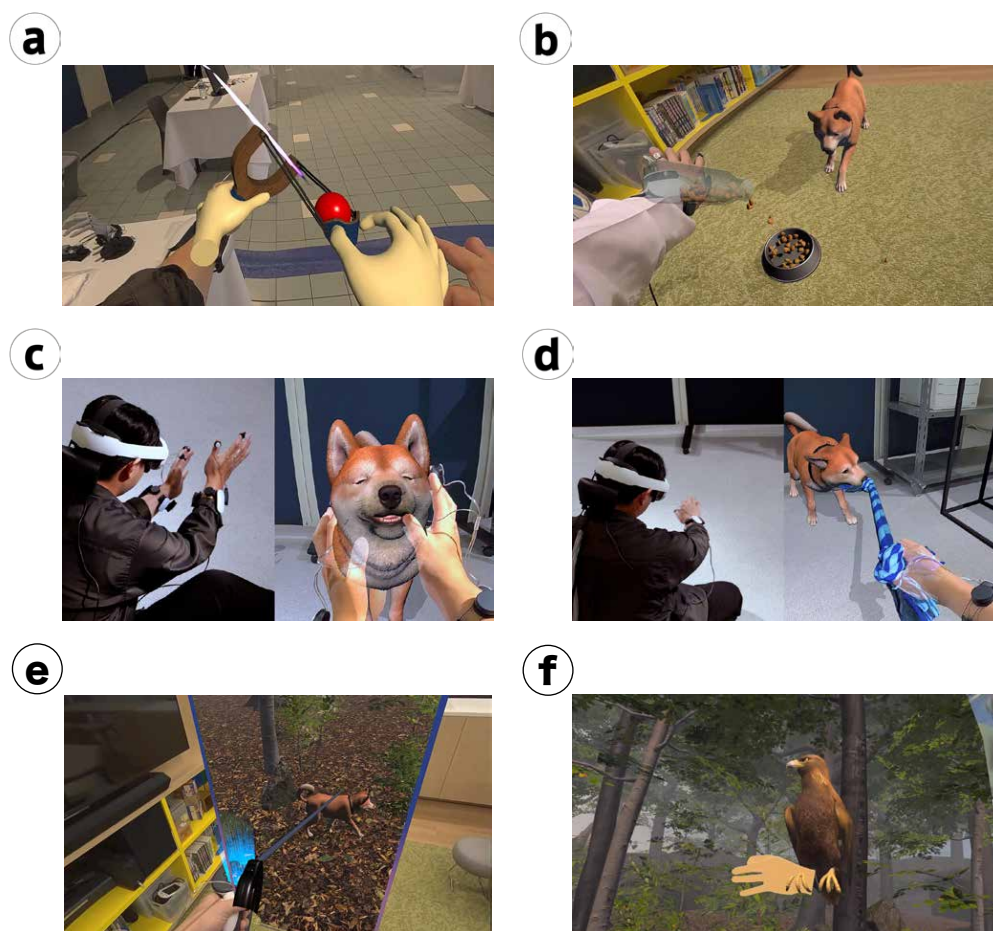


図 5.5 触覚の Mixed Reality を含めたコンテンツの流れ

- (a) パチンコで宙に浮いた風船を狙い撃ち，コンテンツを開始する。
- (b) ボトル（リアルオブジェクト）を使ってドッグフードを獲得し，エサやりを行う。
- (c) 犬を撫でて可愛がる。
- (d) 紐のおもちゃを咥えさせ，引っ張り合う遊びを行う。
- (e) リード（リアルオブジェクト）を把持して森に移動し，散歩する。
- (f) 飛んできた鷲に注意を引かれた犬を，ベルを鳴らして呼び戻し，ベルの音に釣られてやってきた鷲に腕を掴まれる。



図 5.6 SIGGRAPH 2024 での体験の様子

コンテンツのフィードバックは、主に体験中の反応や体験後デバイスを外す際に行った簡単なインタビューから得た。体験者の多くから「触っているものがバーチャルなのかリアルなのかわからなくなってしまった」や「本当にドッグフードが入ってきている感じがした」、「驚に腕を掴まれる感覚がリアルだった」といった好意的なコメントをいただいた。また、「コンテンツにおける触覚レンダリングだけでなく、ビジュアルレンダリングも相まってリアルな触覚になっている気がする」といったコメントもいただいた。

5.2.3 考察

体験者の多くは、用意した2つの触覚のMRインタラクションのうち「バーチャル犬へのエサやり」における触覚刺激に好意的なコメントをした。節5.1での「骨のおもちゃ」と同じ把持方法だが、リアルオブジェクトを使用した「エサやり」インタラクションの方が、多くの体験者から好意的なコメントをいただいた。このことから、指先のリング型振動子だけでなく、掌全体でリアルオブジェクトと触れていることが触覚のリマッピングに有効であると考ええる。また、「触っているものがバーチャルなのかリアルなのかわからなくなってしまった」というコメントから、本システムが触覚提示システムとしてMR体験に有効であると考えられる。

また、体験者の中には、リアルオブジェクトであるボトルやリードのハンドルに触れた際に驚く者がいた。この現象は、リアルオブジェクトの上にバーチャル

オブジェクトの映像を描いているため、リアルかバーチャルかの判別がつきにくいことが影響すると考える。実際に、驚きを示した体験者の多くは、触れているオブジェクトがバーチャルなのかリアルなのか即座に判別できなかったと述べている。これらのことから、本システムで提示する触覚刺激がリアルな刺激に近いと考える。

5.3. ゲートを介した遠隔空間とのハンドインタラクション

FEEL TECH では、本システムを使用し、遠隔地とのコミュニケーションをコンセプトに現実空間から世界の各地を繋ぐゲートを出現させ、異なる空間が複合的に存在する空間内でのハンドインタラクションを行うコンテンツを作成し、2025年1月7日から10日にかけてラスベガスで開催された「CES2025⁴」内でデモンストレーションが行われた。

体験コンテンツでは、会場から東京に接続し、犬と紐の引っ張り合いを行うシーンや、ドバイに接続し、電気系統の修理を行うシーン、異なる2空間からフルーツをもぎ取り、別の空間に存在する鳥に与えるシーンが存在した。紐やケーブルの引っ張り力やモノを握る際の力の入れ具合、触れているモノの重量感など、本システムが得意とする触覚情報の提示が必要とされるインタラクションが各シーン内で行われた。

5.4. 全体の考察

本章では、MR.Dog とその追加コンテンツである触覚のMRインタラクションの実装と評価について述べた。本コンテンツは、Unity と Meta Quest3、及び本システムを使用して開発され、ユーザやリアルオブジェクトの動きをMR環境内に反映することで、リアルタイムな触覚レンダリング及びフィードバックを実現す

4 CES 2025 <https://www.ces.tech>

る。第5章で行った検証から得られた考察をもとに、本コンテンツの実装を行った。そして、完成したコンテンツを持って、MWC24 及び、SIGGRAPH 2024 にてデモンストレーションを行った。これらのデモンストレーションでは、国内外の幅広い年代の参加者が体験し、計 500 人以上の体験者から様々なフィードバックが得られた。これらのフィードバックから、3D 空間でのインタラクションにおける触覚レンダリング手法として、本システムがどのような効果を生むのか、考察し、まとめた。体験者がリアルだと感じた触覚刺激の特徴から、触覚のリマッピングによる触覚の帰属先が本システムにおいて重要であると考ええる。また、体験時のインタビューから、本システムを用いた触覚の MR が MR 体験の没入感を向上させたと考ええる。さらに、FEEL TECH では、遠隔地とのコミュニケーションをコンセプトに現実空間から世界の各地を繋ぐゲートを出現させ、異なる空間が複合的に存在する空間内でのハンドインタラクションを行うコンテンツを作成し、2025 年 1 月 7 日から 10 日にかけてラスベガスで開催された「CES2025」⁵内でデモンストレーションが行われた。

5 CES 2025 <https://www.ces.tech>

第 6 章

Conclusion

本研究では、遠隔コミュニケーションをはじめとする複合空間内での身体性インタラクションに向けた、ユーザの動きに基づくリアルタイム力触覚フィードバックシステムの提案、構築、検証、考察を行った。

第1章では、はじめに、本研究の背景について述べた。次に、遠隔コミュニケーションの歴史について述べ、コミュニケーションツールの変容と遠隔コミュニケーションにおける触覚の欠如の問題を提起した。また、デジタル技術によるコミュニケーションの新たな在り方について述べ、デジタルコミュニケーションの将来的な普及に対する課題を触覚に関するアプローチで述べた。さらに、日常における触覚の役割と重要性について述べ、空間を超えたコミュニケーションにおいて触覚の共有が必要であることを指摘した。

第2章では、はじめに、触覚による知覚のメカニズムに関する調査を行った。次に、触覚提示技術の効果や限界、可能性を、擬似触覚・皮膚せん断変形による擬似力覚・触覚リマッピングの3つの手法において調査した。さらに、触覚コミュニケーションについて、実世界での事例、及び、遠隔触覚コミュニケーション技術において調査した。

第3章では、はじめに、先行研究から判明した、遠隔触覚コミュニケーションにおける課題点を、触運動知覚の観点から述べ、本研究での触覚提示手法の設計を行った。次に、NTT ドコモを主体とする FEEL TECH プロジェクトの概要を説明し、各関係機関や本研究及び筆者との関わりを明示した。さらに、本研究の提案手法である FEEL TECH Wear における、ハードウェア及び触覚レンダリングシステムの説明を行い、Unity 上での実装方法を述べた。

第4章では、回転皮膚せん断刺激分布による多自由度な力覚提示の検証とファ

ントムセンセーションの原理に基づいた触覚強度バランス設計による触覚リマッピングの検証を行った。

第5章では、提案システムを用いたコンテンツを制作し、その実装についてまとめた。また、実装したコンテンツでのデモンストレーションを行い、体験者からのフィードバックから、本システムをコンテンツに実装する上での考察を行った。

本論文では、複合空間内でのハンドインタラクションに向けたリアルタイム力触覚レンダリングシステムの構築を試みた。本論文で提案したFEEL TECH Wearは、複合空間内でのハンドインタラクションにおいて、ユーザが「手を動かして触っている」感を得るためのハードウェア、及び、触覚レンダリングシステムを指す。FEEL TECH Wearのハードウェアは、触覚レンダリングによる効果を最大化する上で最適な設計がされている。また、検証実験によって、本システムにおける手首回転皮膚せん断刺激分布は、方向性を持つ力覚提示が可能であり、指先振動刺激との刺激強度バランスの設計による触覚リマッピングにおいてもいくつかの洞察を得ることができた。さらに、本システムを用いたコンテンツMR.Dogを制作し、デモンストレーションを行った。検証実験やデモンストレーションから、本システムにはいくつか課題が残されていることが判明した。インタラクションにおける実行タスクには、適切な刺激強度バランスがあると考えられるため、起こり得るタスク群を予測し、各タスクにおける刺激強度バランスをリアルタイムに設計しなければならない。そのため、空間情報から起こり得るタスク群を予測し、タスクの分類、及びタスク毎の刺激強度バランスを設計するフローを自動化する必要がある。また、本システムが提示する触覚刺激は、毛との接触における複雑な皮膚感覚の再現には到達していないことが判明した。これは、本システムでは対象の温度を直接的に提示することができないことによる違和感によるもの、もしくは、本システムにおける振動レンダリング手法によるものとする。これらのシステムの限界を考慮し、提示する触覚刺激の種類や提示位置を再設計することを期待する。また、リアルタイム複合空間インタラクションに向けて、空間情報から触覚を自動生成するシステムの構築が必要となる。本システムが、複合空間内での身体性インタラクションにおけるリアルタイム力触覚レンダリングシステムとして安定して機能するために、触覚自動生成との組み合わせを期待する。

また, commissure では, 本システムを搭載した触覚提示デバイス FeelFuse¹を発売し, SDK と共にリリースする予定である.

1 FeelFuse <https://commissure.co.jp/product/feelfuse>

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教授に心から感謝いたします。

また，研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心から感謝いたします。

さらに，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の堀江新特任助教には，入学当初から研究指導や論文執筆において適切な助言をいただき，研究活動を力強く支えていただきました。また，株式会社 commissure の最高技術責任者の立場から，技術的アドバイスと実装を支援していただきました。心から感謝いたします。

そして，プロジェクトを推進し，多くの貴重な機会を賜りました株式会社 NTT ドコモ / 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科特任教授 の石川博規氏に心から感謝いたします。

株式会社 SPLINE DESIGN HUB の神山友輔氏，阪本真氏には，本研究における触覚デバイスの試作からプロダクト制作までに，多くのお時間をいただき，技術的支援をいただきました。心から感謝申し上げます。

技術的なアドバイスと実装を支援していただきました神山洋一研究員にも心から感謝申し上げます。

また，研究ディスカッションや技術的アドバイスをいただきました，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の花光宣尚特任助教にも心より感謝申し上げます。

先輩方には多くの刺激や学びをいただき，同期の皆さんには出張や研究ディスカッションなどあらゆる場面で支えていただきました。後輩の皆さんとは研究ディスカッションを通じて互いに学び合うことができたことに心から感謝いたします。

株式会社 commissure の溝橋正輝氏には、プロダクト制作においてマネジメントをしていただきました。また、小谷新太氏には、コンテンツ制作のサポートをしていただきました。心から感謝申し上げます。

本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」(Grant number JPMJMS2013)の支援を受けて実施されました。

参 考 文 献

- [1] 田村秀行. アニメ『電脳コイル』にみるリアルとバーチャルの接点. 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 6–19, 2008. URL: <http://journal.vrsj.org/13-4/s6-19.pdf>.
- [2] 岩村吉晃. タッチ. 医学書院, 東京, 2001.
- [3] John Locke. *An essay concerning human understanding*. Kay & Troutman, 1847.
- [4] Maurice Merleau-Ponty. 知覚の現象学. みすず書房, 東京, 1945. 原著: *Phénoménologie de la perception*.
- [5] Tomoya Ishigaki, Ryota Imai, and Shu Morioka. Association between unintentional interpersonal postural coordination produced by interpersonal light touch and the intensity of social relationship. *Frontiers in Psychology*, Vol. 8, , 2017. doi:10.3389/fpsyg.2017.01993.
- [6] Kerstin Uvnäs-Moberg and Linda Handlin. Self-soothing behaviors with particular reference to oxytocin release induced by non-noxious sensory stimulation. *Frontiers in psychology*, Vol. 5, p. 116675, 2015.
- [7] Harunobu Taguchi, Youichi Kamiyama, Kenta Kan, Yulan Ju, Arata Horie, Yoshihiro Tanaka, Hironori Ishikawa, and Kouta Minamizawa. Multichannel haptic communication platform with wearable sensing and display. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23. Association for Computing Machinery, 2023. doi:10.1145/3610541.3614573.

- [8] Homei Miyashita. Taste media: Innovative technology transforms the eating experience. In Vicenç Torra, Yasuo Narukawa, and Hiroaki Kikuchi, editors, *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, pp. 8–16, Cham, 2024. Springer Nature Switzerland.
- [9] 正大山, 省吾今井, 典二和気. 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [10] 正大山, 省吾今井, 典二和気, 正菊地. 新編 Part2 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 2007.
- [11] 前野隆司. 器用な手 ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000.
- [12] Lynette A. Jones and Susan J. Lederman. *Human Hand Function*. Oxford University Press, 05 2006. doi:10.1093/acprof:oso/9780195173154.001.0001.
- [13] Kenneth Johnson. Neural basis of haptic perception. Stevens’ handbook of experimental psychology, Vol. 1, pp. 537–580, 2002.
- [14] 伊藤謙治. 人間工学ハンドブック. 朝倉書店, 2003.
- [15] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, pp. 477–491, 1962.
- [16] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342–368, 1987. doi:[https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9).
- [17] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. In *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, pp. 699–711. IEEE, 2021. doi:10.1109/TOH.2021.3077619.

- [18] Claudio Pacchierotti, Stephen Sinclair, Massimiliano Solazzi, Antonio Frisoli, Vincent Hayward, and Domenico Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives. In *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, pp. 580–600. IEEE, 2017. doi:10.1109/TOH.2017.2689006.
- [19] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '07, p. 8–es. Association for Computing Machinery, 2007. doi:10.1145/1278280.1278289.
- [20] Yunxiu XU, Siyu Wang, and Shoichi Hasegawa. Preserving real-world finger dexterity using a lightweight fingertip haptic device for virtual dexterous manipulation, 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.16835>, arXiv: 2406.16835.
- [21] Dzmitry Tsetserukou, Shotaro Hosokawa, and Kazuhiko Terashima. Link-touch: A wearable haptic device with five-bar linkage mechanism for presentation of two-dof force feedback at the fingerpad. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 307–312. IEEE, 2014. doi:10.1109/HAPTICS.2014.6775473.
- [22] Arata Horie, Yunao Zheng, and Masahiko Inami. A wearable system integrating force myography and skin stretch feedback toward force skill learning. In *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 190–196. IEEE, 2023. doi:10.1109/WHC56415.2023.10224440.
- [23] Takuto Nakamura and Hideaki Kuzuoka. Force perception by presentation of skin shear deformation to shoulder. In Hiroyuki Kajimoto, Pedro Lopes, Claudio Pacchierotti, Cagatay Basdogan, Monica Gori, Betty Lemaire-Semail, and Maud Marchal, editors, *Haptics: Understanding Touch*;

- Technology and Systems; Applications and Interaction*, pp. 278–290, Cham, 2025. Springer Nature Switzerland.
- [24] Taha Moriyama and Hiroyuki Kajimoto. Wearable haptic device presenting sensations of fingertips to the forearm. In *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, pp. 91–96. IEEE, 2022. doi:10.1109/TOH.2022.3143663.
- [25] Takayuki Kameoka, Yuki Kon, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Haptopus: Haptic vr experience using suction mechanism embedded in head-mounted display. In *Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’18 Adjunct, p. 154–156. Association for Computing Machinery, 2018. doi:10.1145/3266037.3271634.
- [26] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson. Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’16, p. 1968–1979. Association for Computing Machinery, 2016. doi:10.1145/2858036.2858226.
- [27] Hiroshi Kato, Yuki Hashimoto, and Hiroyuki Kajimoto. Basic properties of phantom sensation for practical haptic applications. In Astrid M. L. Kappers, Jan B. F. van Erp, Wouter M. Bergmann Tiest, and Frans C. T. van der Helm, editors, *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, pp. 271–278, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer Berlin Heidelberg.
- [28] Jacob H Kirman. Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration. *Perception & Psychophysics*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–6, 1974.
- [29] 渡邊淳司, 川口ゆい, 坂倉杏介, 安藤英由樹. 心臓ピクニック : 鼓動に触れるワークショップ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 303–306, 2011. doi:10.18974/tvrsj.16.3_303.

- [30] 渡邊淳司, 藍耕平, 吉田知史, 晃希, 掲, 林阿希子. 空気伝送触感コミュニケーションを利用したスポーツ観戦の盛り上がり共有: wow ball としての検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 311–314, 2020. doi:10.18974/tvrsj.25.4_311.
- [31] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. inform: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Uist*, Vol. 13, pp. 2501–988. Citeseer, 2013.
- [32] Daniel Leithinger, Sean Follmer, Alex Olwal, and Hiroshi Ishii. Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, p. 461–470. Association for Computing Machinery, 2014. doi:10.1145/2642918.2647377.
- [33] 早川裕彦, 大脇理智, 石川琢也, 南澤孝太, 田中由浩, 掲, 鎌本優, 渡邊淳司. 高実在感を伴う遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア「公衆触覚伝話」の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 412–421, 2020. doi:10.18974/tvrsj.25.4_412.
- [34] Hiroto Saito, Arata Horie, Azumi Maekawa, Seito Matsubara, Sohei Wakisaka, Zendai Kashino, Shunichi Kasahara, and Masahiko Inami. Transparency in human-machine mutual action. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 33, No. 5, pp. 987–1003, 2021. doi:10.20965/jrm.2021.p0987.
- [35] Jonggi Hong, Alisha Pradhan, Jon E. Froehlich, and Leah Findlater. Evaluating wrist-based haptic feedback for non-visual target finding and path tracing on a 2d surface. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '17, p. 210–219. Association for Computing Machinery, 2017. doi:10.1145/3132525.3132538.
- [36] Andrew A. Stanley and Katherine J. Kuchenbecker. Evaluation of tactile feedback methods for wrist rotation guidance. In *IEEE Transactions on*

- Haptics*, Vol. 5, pp. 240–251. IEEE, 2012. doi:10.1109/TOH.2012.33.
- [37] Gen Ohara, Daiki Kikuchi, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. Stereohaptic vibration: Out-of-body localization of virtual vibration source through multiple vibrotactile stimuli on the forearms. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 17, No. 1, pp. 86–91, 2024. doi:10.1109/TOH.2024.3357574.

付 録

A. 手首せん断刺激分布レンダリング

以下に、本システムにおける手首回転皮膚せん断刺激分布を Unity 環境下でレンダリングする上で使用したスクリプトを示す。

```
script:DecompositionMatrix
1 using System;
2 using System.Collections;
3 using System.Collections.Generic;
4 using UnityEngine;
5
6 public static class DecompositionMatrix
7 {
8     // ハンドトラッキング情報から手首の 3 次元直行基底を取得する関数
9     public static Vector3[] GetWristBase(HapticSystemAdjuster.HandType handSide, Transform wristTransform)
10    {
11        Vector3 tipVecLR = Vector3.zero;
12        Vector3 tipVecFB = Vector3.zero;
13        Vector3 tipVecUD = Vector3.zero;
14        if (handSide == HapticSystemAdjuster.HandType.RightHand)
15        {
16            tipVecLR = wristTransform.forward;
17            tipVecFB = wristTransform.right;
18            tipVecUD = wristTransform.up;
19        }
20        else if (handSide == HapticSystemAdjuster.HandType.LeftHand)
21        {
22            tipVecLR = wristTransform.forward;
23            tipVecFB = -wristTransform.right;
24            tipVecUD = -wristTransform.up;
25        }
26        return new Vector3[] { tipVecLR, tipVecFB, tipVecUD };
27    }
28    // ハンドトラッキング情報から指先の 3 次元直行基底を取得する関数
29    public static Vector3[] GetFingerBase(HapticSystemAdjuster.HandType handSide, Transform fingerTip)
30    {
31        Vector3 tipVecLR = Vector3.zero;
32        Vector3 tipVecFB = Vector3.zero;
33        Vector3 tipVecUD = Vector3.zero;
34        if (handSide == HapticSystemAdjuster.HandType.RightHand)
35        {
36            tipVecLR = fingerTip.forward;
37            tipVecFB = fingerTip.right;
38            tipVecUD = fingerTip.up;
39        }
40        else if (handSide == HapticSystemAdjuster.HandType.LeftHand)
41        {
42            tipVecLR = -fingerTip.forward;
43            tipVecFB = -fingerTip.right;
44            tipVecUD = -fingerTip.up;
45        }
46    }
```

```

46     return new Vector3[] { tipVecLR, tipVecFB, tipVecUD };
47 }
48
49 // 行列の掛け算
50 public static double[,] MatrixTimesMatrix(double[,] A, double[,] B)
51 {
52
53     double[,] product = new double[A.GetLength(0), B.GetLength(1)];
54
55     for (int i = 0; i < A.GetLength(0); i++)
56     {
57         for (int j = 0; j < B.GetLength(1); j++)
58         {
59             for (int k = 0; k < A.GetLength(1); k++)
60             {
61                 product[i, j] += A[i, k] * B[k, j];
62             }
63         }
64     }
65
66     return product;
67
68 }
69 // 行列の逆行列
70 public static double[,] InverseMatrix(double[,] A)
71 {
72
73     int n = A.GetLength(0);
74     int m = A.GetLength(1);
75
76     double[,] invA = new double[n, m];
77
78     if (n == m)
79     {
80
81         int max;
82         double tmp;
83
84         for (int j = 0; j < n; j++)
85         {
86             for (int i = 0; i < n; i++)
87             {
88                 invA[j, i] = (i == j) ? 1 : 0;
89             }
90         }
91
92         for (int k = 0; k < n; k++)
93         {
94             max = k;
95             for (int j = k + 1; j < n; j++)
96             {
97                 if (Math.Abs(A[j, k]) > Math.Abs(A[max, k]))
98                 {
99                     max = j;
100                 }
101             }
102
103             if (max != k)
104             {
105                 for (int i = 0; i < n; i++)
106                 {
107                     // 入力行列側
108                     tmp = A[max, i];
109                     A[max, i] = A[k, i];
110                     A[k, i] = tmp;
111                     // 単位行列側
112                     tmp = invA[max, i];
113                     invA[max, i] = invA[k, i];
114                     invA[k, i] = tmp;

```

```

115         }
116     }
117
118     tmp = A[k, k];
119
120     for (int i = 0; i < n; i++)
121     {
122         A[k, i] /= tmp;
123         invA[k, i] /= tmp;
124     }
125
126     for (int j = 0; j < n; j++)
127     {
128         if (j != k)
129         {
130             tmp = A[j, k] / A[k, k];
131             for (int i = 0; i < n; i++)
132             {
133                 A[j, i] = A[j, i] - A[k, i] * tmp;
134                 invA[j, i] = invA[j, i] - invA[k, i] * tmp;
135             }
136         }
137     }
138
139 }
140
141
142 for (int j = 0; j < n; j++)
143 {
144     for (int i = 0; i < n; i++)
145     {
146         if (double.IsNaN(invA[j, i]))
147         {
148             Console.WriteLine("Error : Unable to compute inverse matrix");
149             invA[j, i] = 0;
150         }
151     }
152 }
153
154
155 return invA;
156
157 }
158 else
159 {
160     Console.WriteLine("Error : It is not a square matrix");
161     return invA;
162 }
163
164 }
165 // 行列の和差
166 public static double[] ArrayAddSub(double[] A, double[] B, bool isAdd)
167 {
168     double[] C = new double[A.GetLength(0)];
169     for (int i = 0; i < A.GetLength(0); i++)
170     {
171         if (isAdd)
172         {
173             C[i] = A[i] + B[i];
174         }
175         else
176         {
177             C[i] = A[i] - B[i];
178         }
179     }
180     return C;
181 }
182 // カベクトルを直行分解をした際の係数を取得する関数
183 public static Vector3 DecompositionMatrix(Vector3 A, Vector3[] bases)

```

```

184 {
185     float[] Answer = new float[3];
186     double[,] AccelerationVec = { { A.x }, { A.y }, { A.z } };
187     double[,] HandsMatrix = { { bases[0].x, bases[1].x, bases[2].x }, { bases[0].y, bases[1].y, bases[2].y }, { bases[0].z,
    ↳ bases[1].z, bases[2].z } };
188     double[,] HandMatrixInverse = inverseMatrix(HandsMatrix);
189     double[,] MyoSynthRotate = MatrixTimesMatrix(HandMatrixInverse, AccelerationVec);
190     for (int i = 0; i < MyoSynthRotate.GetLength(0); i++)
191     {
192         Answer[i] = (float)MyoSynthRotate[i, 0];
193     }
194     return new Vector3(Answer[0], Answer[1], Answer[2]);
195 }
196 // 直行分解で得た係数から回転角に変換する関数
197 public static float[] ConvertForceToAngles(Vector3 leftForce, Vector3 rightForce)
198 {
199     float[] angles = new float[8] { 0f, 0f, 0f, 0f, 0f, 0f, 0f, 0f };
200
201     float forceLR_L = leftForce.x;
202     float forceFB_L = leftForce.y;
203     float forceUD_L = leftForce.z;
204
205     float forceLR_R = rightForce.x;
206     float forceFB_R = rightForce.y;
207     float forceUD_R = rightForce.z;
208
209     if (forceLR_L >= 0)
210     {
211         angles[0] += forceLR_L;
212         angles[3] -= forceLR_L;
213     }
214     else
215     {
216         angles[1] += forceLR_L;
217         angles[2] -= forceLR_L;
218     }
219     if (forceLR_R >= 0)
220     {
221         angles[5] += forceLR_R;
222         angles[6] -= forceLR_R;
223     }
224     else
225     {
226         angles[4] += forceLR_R;
227         angles[7] -= forceLR_R;
228     }
229     angles[0] -= forceFB_L;
230     angles[1] += forceFB_L;
231     angles[2] -= forceFB_L;
232     angles[3] += forceFB_L;
233     angles[4] -= forceFB_R;
234     angles[5] += forceFB_R;
235     angles[6] -= forceFB_R;
236     angles[7] += forceFB_R;
237     if (forceUD_L >= 0)
238     {
239         angles[2] -= forceUD_L;
240         angles[3] += forceUD_L;
241     }
242     else
243     {
244         angles[0] += forceUD_L;
245         angles[1] -= forceUD_L;
246     }
247     if (forceUD_R >= 0)
248     {
249         angles[6] += forceUD_R;
250         angles[7] -= forceUD_R;
251     }

```



```

252         else
253         {
254             angles[4] -= forceUD_R;
255             angles[5] += forceUD_R;
256         }
257         return angles;
258     }
259 }

```

B. 指先振動レンダリング

以下に、本システムにおける指先振動を Unity 環境下でレンダリングする上で使用したスクリプトを示す。

```

script:DecompositionMatrix
1  using System;
2  using UnityEngine;
3  using UnityEngine;
4  using UnityEngine.Audio;
5
6  namespace FingerVibrationSystem
7  {
8      public enum AudioOutPut
9      {
10         Oculus = 0,
11         LeftThumb = 1,
12         LeftIndex = 2,
13         RightThumb = 6,
14         RightIndex = 7,
15         None = 99
16     }
17     public class FingerVibrationAudio : MonoBehaviour
18     {
19         [Header("Audio Mixer")] [SerializeField] AudioMixer _AudioMixer = null;
20         [Header("Audio Table")] [SerializeField] FingerVibrationAudioTable _FingerVibrationAudioTable = null;
21
22         protected AudioOutPut[] _Left = new AudioOutPut[2] { AudioOutPut.LeftThumb, AudioOutPut.LeftIndex };
23         protected AudioOutPut[] _Right = new AudioOutPut[2] { AudioOutPut.RightThumb, AudioOutPut.RightIndex };
24
25         protected string OculusPitchShifterID = "OculusPitchShifter Pitch";
26         protected string LeftPitchShifterID = "PitchShifter1 Pitch";
27         protected string RightPitchShifterID = "PitchShifter2 Pitch";
28
29         // Play one shot Vibration Audio to Selected Finger
30         public virtual void PlayOneShot_Vibration(HapticSystemAdjuster.HandType hand, HapticSystemAdjuster.FingerType finger,
31             ↳ AudioClip clip, float volume = 1.0f)
32         {
33             AudioOutPut _finger = AudioOutPut.None;
34             switch(hand)
35             {
36                 case HapticSystemAdjuster.HandType.LeftHand:
37                     switch (finger)
38                     {
39                         case HapticSystemAdjuster.FingerType.Index:
40                             _finger = AudioOutPut.LeftIndex;
41                             break;
42                         case HapticSystemAdjuster.FingerType.Thumb:
43                             _finger = AudioOutPut.LeftThumb;
44                             break;
45                         default:

```

```

45         return;
46     }
47     break;
48     case HapticSystemAdjuster.HandType.RightHand:
49         switch (finger)
50         {
51             case HapticSystemAdjuster.FingerType.Index:
52                 _finger = AudioOutPut.RightIndex;
53                 break;
54             case HapticSystemAdjuster.FingerType.Thumb:
55                 _finger = AudioOutPut.RightThumb;
56                 break;
57             default:
58                 return;
59         }
60         break;
61     default:
62         return;
63 }
64
65 var _fingerVibrationTable = _FingerVibrationAudioTable.GetTable();
66 AudioSource _fingerAudioSource = _fingerVibrationTable[_finger];
67 if (clip != null)
68 {
69     _fingerAudioSource.volume = volume;
70     _fingerAudioSource.pitch = 1.0f;
71     switch (_finger)
72     {
73         case AudioOutPut.LeftThumb:
74             _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1.0f);
75             break;
76         case AudioOutPut.LeftIndex:
77             _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1.0f);
78             break;
79         case AudioOutPut.RightThumb:
80             _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1.0f);
81             break;
82         case AudioOutPut.RightIndex:
83             _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1.0f);
84             break;
85     }
86     _fingerAudioSource.PlayOneShot(clip);
87 }
88 break;
89 }
90
91 // Play one shot Vibration Audio to Selected Finger
92 public virtual void PlayAudio_Vibration(HapticSystemAdjuster.HandType hand, HapticSystemAdjuster.FingerType finger,
93 ⇨ AudioClip clip, float volume = 1.0f, float stretch = 1.0f, bool loop = false)
94 {
95     AudioOutPut _finger = AudioOutPut.None;
96     switch (hand)
97     {
98         case HapticSystemAdjuster.HandType.LeftHand:
99             switch (finger)
100             {
101                 case HapticSystemAdjuster.FingerType.Index:
102                     _finger = AudioOutPut.LeftIndex;
103                     break;
104                 case HapticSystemAdjuster.FingerType.Thumb:
105                     _finger = AudioOutPut.LeftThumb;
106                     break;
107                 default:
108                     return;
109             }
110             break;
111         case HapticSystemAdjuster.HandType.RightHand:
112             switch (finger)
113             {

```

```

113         case HapticSystemAdjuster.FingerType.Index:
114             _finger = AudioOutPut.RightIndex;
115             break;
116         case HapticSystemAdjuster.FingerType.Thumb:
117             _finger = AudioOutPut.RightThumb;
118             break;
119         default:
120             return;
121     }
122     break;
123 }
124
125 var _fingerVibrationTable = _FingerVibrationAudioTable.GetTable();
126
127 AudioSource _fingerAudioSource = _fingerVibrationTable[_finger];
128 if (clip != null)
129 {
130     _fingerAudioSource.loop = loop;
131     _fingerAudioSource.clip = clip;
132     _fingerAudioSource.volume = volume;
133     _fingerAudioSource.pitch = stretch;
134     switch (_finger)
135     {
136         case AudioOutPut.LeftThumb:
137             _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1 / stretch);
138             break;
139         case AudioOutPut.LeftIndex:
140             _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1 / stretch);
141             break;
142         case AudioOutPut.RightThumb:
143             _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
144             break;
145         case AudioOutPut.RightIndex:
146             _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
147             break;
148     }
149     _fingerAudioSource.Play();
150 }
151 else
152 {
153     _fingerAudioSource.Stop();
154 }
155 break;
156 }
157
158 public virtual void ChangeAudioPitch(AudioOutPut output, float volume = 1.0f, float stretch = 1.0f)
159 {
160     var _AudioOutputTable = _FingerVibrationAudioTable.GetTable();
161     AudioSource _AudioSource = _AudioOutputTable[output];
162     if (_AudioSource != null)
163     {
164         _AudioSource.volume = volume;
165         _AudioSource.pitch = stretch;
166         switch (output)
167         {
168             case AudioOutPut.Oculus:
169                 _AudioMixer.SetFloat(OculusPitchShifterID, 1 / stretch);
170                 break;
171             case AudioOutPut.LeftThumb:
172                 _AudioMixer.SetFloat(LeftPitchShifterID, 1 / stretch);
173                 break;
174             case AudioOutPut.RightThumb:
175                 _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
176                 break;
177             case AudioOutPut.RightIndex:
178                 _AudioMixer.SetFloat(RightPitchShifterID, 1 / stretch);
179                 break;
180         }
181     }

```

```
182     }  
183  
184     public virtual void StopAudio(AudioOutPut output)  
185     {  
186         var _AudioOutputTable = _FingerVibrationAudioTable.GetTable();  
187         AudioSource _AudioSource = _AudioOutputTable[output];  
188         _AudioSource.Stop();  
189     }  
190 }  
191 }
```