慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	触覚伝送技術に基づく視触覚コンテンツ制作の実践
Sub Title	Visuo-haptic content production based on haptic recording and transmission technology
Author	田口, 晴信(Taguchi, Harunobu) 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1122号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002024-1122

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

触覚伝送技術に基づく
視触覚コンテンツ制作の実践

慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

田口　晴信

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。

田口　晴信

研究指導コミッティ：

南澤　孝太 教授　(主指導教員)

砂原　秀樹 教授　(副指導教員)

論文審査委員会：

南澤　孝太 教授　(主査)

砂原　秀樹 教授　(副査)

杉浦　一徳 教授　(副査)

修士論文 2024 年度

触覚伝送技術に基づく
視触覚コンテンツ制作の実践

カテゴリ：デザイン

論文要旨

近年、情報技術の発達や普及により、映像や音声メディアを通じて自身の体験を容易に共有できるようになった。その一方で、言語を介さずに感覚やスキルの伝達などを可能にする、五感を通じた感覚共有技術の実現が求められている。触覚技術によって主観的な体験が共有可能になるが、触覚情報を記録して提示する触覚伝送技術を用いた視触覚コンテンツ制作は発展途上にある。

そこで本研究では、映像や振動触覚により感覚を共有可能な視触覚コンテンツ制作のワークフローの構築を目的として、制作に求められるプロセスや映像プロダクションとの連携手法を提案する。複数の場面でワークフローを適用して制作したコンテンツを FEEL TECH に実装し、各地でデモンストレーションを行った。その結果、多種多様なシーンの制作において有効であり、多くの人々に訴求可能なコンテンツを生み出せた。これにより、高品質かつ安定した視触覚コンテンツの制作につながり、今後多くの人や分野に展開させられる可能性がある。

キーワード：

触覚伝送, 視触覚コンテンツ, ワークフロー, 共同制作, FEEL TECH

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

田口　晴信

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2024

Visuo-Haptic Content Production Based on Haptic Recording and Transmission Technology

Category: Design

Summary

In recent years, the development and spread of information technology has made it easier to share one's own experiences through visual and audio media. And there is a need to realize sensory sharing technology through the five senses, which enables the transmission of sensations and skills without language. Although haptic technology makes it possible to share subjective experiences, haptic transmission technology that records and presents the sense of touch has not been established.

In this study, I propose a process for production and a method of collaboration with video production for the purpose of establishing a workflow for the production of visuo-haptic content that enables sensory sharing through video and vibrotactile sensations. Content produced by applying the workflow to multiple scenes was implemented in FEEL TECH and demonstrated in various locations. As a result, this workflow was effective in the production of a wide variety of scenes and produced content that could appeal to a large number of people. These result have led to the production of high-quality and stable visuo-haptic content, and there is a possibility that it will be deployed to many people and fields.

Keywords:

haptic transmission, visuo-haptic content, workflow, co-production, FEEL TECH

Keio University Graduate School of Media Design

Harunobu Taguchi

目　　次

第 1 章　Introduction **1**

1.1. 感覚の共有 1

1.2. 情報通信の変化 2

1.3. コンテンツ制作の課題 3

1.4. 本研究の目的 3

1.5. 本論文の構成 4

第 2 章　Literature Review **5**

2.1. 主観的体験の記録と再生 5

2.2. 触覚の計測・提示技術 7

2.2.1　触覚センシング 7

2.2.2　触覚ディスプレイ 8

2.3. 触覚伝送技術 9

2.4. 触覚コンテンツのデザイン 11

2.4.1　デザインツール 11

2.4.2　応用事例 13

2.5. 本章のまとめ 14

第 3 章　Concept Design **15**

3.1. FEEL TECH プロジェクト 15

3.1.1　プロジェクト概要 15

3.1.2　FEEL TECH が目指すユースケース 16

3.1.3　プロジェクトにおける本研究の役割 17

3.2. 提案手法：視触覚コンテンツ制作のワークフロー 17
3.3. 触覚収録手法 20
3.3.1 概要 20
3.3.2 システム構成 20
3.3.3 収録方法 21
3.3.4 編集前の下処理 22
3.4. 触覚編集手法 22
3.4.1 概要 22
3.4.2 編集手順 22
3.4.3 触覚編集に用いるエフェクト 24
3.5. 触覚再生手法 25
3.5.1 概要 25
3.5.2 システム構成 25
3.5.3 2ch 把持型触覚提示デバイス 26
3.5.4 4ch 指先装着型触覚提示デバイス 26
3.6. 本章のまとめ 28

第 4 章 Proof of Concept **30**
4.1. 概要 30
4.2. スタジオにおける触覚収録 31
4.2.1 道具越しの収録 31
4.2.2 手を用いたインタラクションの収録 33
4.2.3 手触り感の収録 35
4.2.4 視覚障害者の感覚の収録 37
4.2.5 MWC2023 における展示 38
4.3. 触覚効果のアフターレコーディング 40
4.3.1 概要 40
4.3.2 コンテンツ制作 40
4.3.3 恐竜コンテンツの展示 42
4.4. フィールドにおける触覚収録 43

4.4.1 花火 43
4.4.2 サイクルトレイン 45
4.4.3 動物園 48
4.4.4 JR 大阪駅における展示 50
4.5. 映像プロダクションとの連携 51
4.6. 考察 52

第 5 章 Conclusion **55**

謝辞 **57**

参考文献 **59**

関連発表 **66**

付録 **68**
A. FEEL TECH コンテンツ詳細 68

図　目　次

2.1　空間再現ディスプレイ ELF-SR2 6
2.2　Apple Vision Pro 7
2.3　TECHTILE toolkit 10
2.4　TELESAR V 11
2.5　触感デザインツール Haptic Composer の画面 12

3.1　「人間拡張基盤」システム構成図 16
3.2　コンテンツ制作の一連のワークフロー 19
3.3　収録に使用する触覚センサ 21
3.4　Premiere Pro 上での視触覚コンテンツの編集画面 23
3.5　2ch 把持型触覚提示デバイス 27
3.6　指先装着型 4ch 触覚提示デバイス 28
3.7　交換可能な指先装着具 29

4.1　道具越しのコンテンツ 31
4.2　道具越しの収録の様子 32
4.3　手を用いたインタラクションのコンテンツ 33
4.4　手を用いたインタラクションの収録の様子 34
4.5　手触り感のコンテンツ 35
4.6　視覚障害者の感覚のコンテンツ 37
4.7　視覚障害者の感覚の収録の様子 38
4.8　MWC2023 における展示の様子 39
4.9　恐竜のコンテンツ 41
4.10　各シーンに応じた素材の収録 41

4.11 東京スカイツリーにおける展示の様子 42
4.12 花火のコンテンツ 44
4.13 花火収録の様子 44
4.14 サイクルトレインのコンテンツ 46
4.15 サイクルトレイン収録の様子 46
4.16 サイクルトレインの再生システム 47
4.17 動物のコンテンツ 48
4.18 動物の収録の様子 49
4.19 大阪駅インタラクティブ空間における体験イベントの様子 50

第 1 章
Introduction

1.1. 感覚の共有

人は自身の体験を他者に伝えるときどのような手段を用いるだろうか。日常では会話の中で言葉を巧みに用いて情景や動作を伝えることで実現している。しかし、話し手の表現力や聞き手の理解力に左右される上、思ったように伝わらないとか感覚的に理解しにくいといった課題がある。絵やジェスチャーといった手段の場合も同様であり、全てを事細かに伝えるのは困難である。

また、体験を記録し、利用する意義について角ら [1] は以下の項目に分類して述べている。

- 思い出の記録と共有
- 体験を通した知識共有
- 記憶の理解と支援

例えば、体験を通した知識共有においては、伝統工芸などの職人の技術、ノウハウを伝承することが可能であり、記憶の理解と支援では、過去の体験を容易かつより鮮明に思い出すことが可能である。感覚を共有することで、情報だけでなく感情までも伝えることが可能になる。

近年では情報技術の発達や普及により、一人ひとりが誰でも感覚を手軽に記録、共有することが可能になった。対面で写真や動画を見せるだけでなく、インターネット越しに世界中の人に向けて発信することもできる。映像はより高解像度に、音声は実際の空間の中にいるかのように記録、再現できるようになり、自身の体

験として錯覚するほどと言っても過言ではない。このように、道具を使うことで体験を感覚的に伝えることが現在では徐々に可能になってきている。

しかし、現在では視覚や聴覚情報の共有に限られており、五感で感じる主観的な体験として捉えるには情報量が限られている。触覚を共有できれば動作や感覚を言語を介さずに他者に伝えられる可能性があるほか、身体情報をデータ化することでスキルの保存や伝達など技能伝承に繋がる可能性がある。例えば、ピアノや書道で手の上から先生がなぞるように、道具を用いて記録された感覚を追体験して自身の体験として体で覚えられるようになる。感覚共有において触覚を加えることは新たな価値につながるといえる。

1.2. 情報通信の変化

ネットワークを通じて様々な情報を高速に共有できるようになったほか、誰もが共有資産にアクセスできるデバイスを持つ時代になった。人々は動画共有サイトや音楽配信サイトなどにどこからでもアクセス可能であり、手軽にコンテンツを利用し楽しむことができる。これはテレビや CD といったメディアをただ置き換えただけでなくリアルタイムなコミュニケーションを促進させており、チャットに始まり zoom などのオンラインビデオ会議システムが日常的に使用されている。これらはコロナ禍をきっかけとした社会変化がありながらも、情報通信の進化によってもたらされたものである。

また、社会的にも次の目標へと向かって大きく動き始めている。内閣府が掲げる科学技術政策 “Society 5.0” では、

> 「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、
> 経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」

と未来社会像を提示しており [2]、情報通信の活用が益々求められている。移動通信の標準化団体 3GPP 内では次世代通信 6G の目標が議論されている最中であり、XR(eXtended Reality) や五感を含む「没入型体験」や「デジタルツイン」、「スマート産業とロボティクス」が挙げられている [3]。

情報通信はただの通信インフラにとどまらず、社会を支えるサービス基盤としての進化が求められている。社会を変えていくために新たな価値創造を追求し、未来の情報通信に何を乗せるのかという議論が始まっている。

1.3. コンテンツ制作の課題

次世代の通信基盤に触覚を含む感覚共有の実装が進められていることがわかった。しかし、通信に触覚データを乗せるためには、センシング、アクチュエーションといった一連のプロセスが定まっている必要がある。良いコンテンツを生み出せることが通信に触覚技術を乗せるための前提条件である。

既存の映像コンテンツ制作では、映像や音響を組み合せた複数人での共同制作手法が確立されている。規格に則った収録や再生、編集のための機材、プロセス間の連携を取るための手法が存在するためである。カメラにはマイク端子が搭載され、映像及び音声データが重畳されてファイルに記録されるため、同期の必要もなく、編集ソフトウェア上でも扱いやすい。

触覚を含む映像コンテンツ制作はこれまで行われてきたものの、共同制作という観点からはワークフローが確立されていない。現在の触覚共有技術は研究室内での取り組みが多く、現場で使用可能な機材として完成されていないためである。共同制作を行うことで良いコンテンツに近づけることができる一方で、そのためのワークフローが必要である。

1.4. 本研究の目的

このように、情報通信の進化に伴ってコミュニケーションのあり方が変化してきている一方で、触覚共有の取り組みが進められている。そのような中、次世代の通信基盤に感覚共有技術を実装することを目標として、大手通信会社株式会社NTT ドコモとの共同研究プロジェクトが 2022 年に発足した。プロジェクト第一期では触覚のネットワーク伝送、そして事前収録型の視触覚コンテンツ制作を実現した。本研究はそのプロジェクトの一環として行われ、筆者は触覚コンテンツ

の開発に携わった。感覚共有の実現に向けて、高品質な触覚を含む映像コンテンツの制作を目指している。そこで本研究では、映像プロダクションと共同で視触覚コンテンツ制作を行えるワークフローの構築を目的とし、その有効性を実践して検証する。

1.5. 本論文の構成

本論文は五章で構成される。本章では感覚共有の意義や情報通信を取り巻く社会的背景について述べた。第 2 章では感覚の共有に用いられる触覚の要素技術や応用事例を示す。第 3 章では制作に関する一連のプロセスを定義し、システム構築およびプロトタイピングを経た手法の提案を行う。第 4 章では提案手法を用いた視触覚コンテンツ制作の実践とその考察について述べる。第 5 章では本研究に関する一連の取り組みについて総論を述べる。

第 2 章
Literature Review

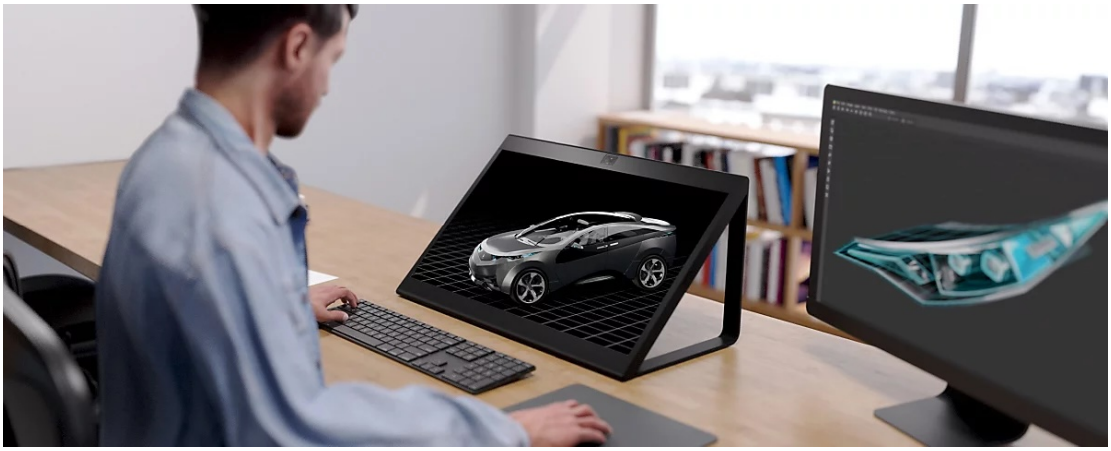
2.1. 主観的体験の記録と再生

個々人の感覚を通じた体験を記録し、共有する手法はいくつか存在する。五感のうち視覚や聴覚に関しては映像や音響技術によって記録、再生を行える。主観映像の記録技術としては、GoPro[1]のような小型のアクションカメラ、ステレオカメラ、360 度カメラなどが挙げられる。アクションカメラは体に取り付けやすく、一人称視点映像を撮影するのに適している。手ぶれ補正機能が強力なものではマウンテンバイクやダイビングなどの激しいスポーツでも揺れが少なく酔いにくい映像を撮影できる。ステレオカメラでは 2 つのカメラ間の距離を適切に配置することで、立体感のある映像を撮影できる。360 度カメラでは全天球、3 自由度の映像を記録でき、視点によらず全方向を見渡すことができる。ステレオカメラと 360 度カメラを組み合わせた Insta360 TITAN をはじめとする 360 度 VR 3D カメラも存在し、立体感がありながらも自由視点映像を記録できる。

映像の再生技術としては、ディスプレイ、プロジェクター、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) などが挙げられる。ディスプレイやプロジェクターは設置して、適切な位置から視聴する。三面や曲面に投影することで立体的に見せることも可能である。3 次元のディスプレイやプロジェクターではステレオカメラの映像を立体的に視聴できる。近年ではカメラによるアイトラッキングシステムを搭載した空間再現ディスプレイも市販されており、視点に応じた映像を提示することで、立体感があり多方向から覗き込める体験が実現している。HMD では、自由視点映像を 3D で視聴できる。内蔵されたセンサによりトラッキ

1 https://gopro.com/

ングされた頭の動きに応じて、出力映像を変化させる。例として図 2.1 に Sony 社の空間再現ディスプレイ ELF-SR2[2]を、図 2.2 に Apple 社の HMD、Apple Vision Pro[3]を示す。Apple Vision Pro は、HMD でなく空間コンピュータと称して発表されたことで大きな話題を呼んだ。搭載されたカメラによって 3D の空間再現写真及び動画を撮影することができ、主観的な映像を容易に記録、再生することが可能である。



(出典：Sony 社 Web サイト[2])

図 2.1: 空間再現ディスプレイ ELF-SR2

これらの技術を組み合わせた事例として JackIn [4] のように第三者が主観映像をもとにしながら環境を俯瞰可能にする体外離脱視点の視覚共有システムも考案されている。本来、一人称視点映像は他者から観測できないものでありながら、映像を再構成することで観測可能にし、モーションシックネスの問題を解決している。

また、空間をデータ化して再現する技術も近年では発達している。LiDAR (Light Detection And Ranging) では光による距離計測によって、フォトグラメトリや 3D Gaussian Splatting などは複数の多視点画像からコンピュータビジョンによって

2 https://www.sony.jp/spatial-reality-display/products/ELF-SR2/

3 https://www.apple.com/newsroom/topics/apple-vision-pro/

(出典：Apple 社 Web サイト[3])

図 2.2: Apple Vision Pro

3D オブジェクトを構築可能である。3D 空間と HMD を組み合わせることで視点によらない空間再現が可能である。

音響についてはバイノーラル録音 [5] が主観的な音声記録といえる。鼓膜への音圧を再現することであたかもその場にいるような音響が得られる。近年では音楽配信サービス上で空間オーディオが普及しており、ステレオイヤホンによってミキシングによって作られた音楽をより臨場感高く楽しむことができる。

2.2. 触覚の計測・提示技術

2.2.1 触覚センシング

触覚の基本要素として、圧力感覚、振動感覚、温度感覚の 3 つがある [6,7]。触覚を再現するためにはこの 3 要素をセンシングすることで皮膚の機能を模倣することが求められる。本稿ではこれら 3 要素をセンシングする技術や事例について述べる。

圧力センシングは、表面に加わる力の大きさや分布を計測することで、その手

法は様々である。抵抗膜方式、静電容量方式、圧電素子方式、光学方式などが存在し、触覚センシングとしてはピエゾ素子やFSRセンサが用いられている。

振動センシングは変位、速度、加速度を計測することで、そのセンサの方式も様々である。触覚においては、マイクロフォン、加速度センサ、レーザー変位計、ピエゾ素子、PVDFフィルム [8] などが用いられている。例えば、皮膚振動の計測においてBensmaiaら [9] はホール素子を用いて、野々村ら [10] はハイスピードカメラを用いて指先の速度を、Wiertlewskiら [11] はセンシングとアクチュエータにピエゾ素子を用いている。TECHTILE toolkit [12] では、コンタクトマイクを紙コップの裏に取り付けることで、ビーズやビー玉を紙コップに流し入れる際に伝播する振動を収録している。

Lambetaら [13] は、光学式センシングにより7 μ mの分解能で圧力分布を、10kHzで振動計測を可能にしている。温度をセンシングするための手法も様々である。サーミスタ、熱電対などがある。加藤らは触原色に基づいたセンシングデバイスにサーミスタを用いている [14]。

2.2.2 触覚ディスプレイ

センシングして得られたデータを用いて感覚を再現するには触覚ディスプレイが用いられる。主に把持型、装着型、接地型に分類され [15]、各種考案されている。

把持型は道具を介して感覚を提示するタイプのデバイスで、ゲームコントローラ、鉛筆やハンドルなどが良い例である。必要なときに手や指先で持てばよいため、使用が容易である。一方で、道具を介するため特定の用途に限定されやすく汎用性を高めるのが難しい。

装着型は名の通り手腕にデバイスを固定して利用するデバイスで、グローブやリストバンド形状等のデバイスが提案されている。このタイプのデバイスは重量が常に体にかかるため抵抗が感じられやすく、何も触れていない状態を作ることは難しい。前述の触原色 [6, 16] 提示デバイスも装着型を一部採用している。

接地型はテーブル上などに固定して使用するデバイスで、比較的大型でパワーが出せるため力覚フィードバックに適している。PHANToM [17] やSPIDAR [18]

ではバーチャル上のオブジェクトをなぞることができる。その他に、非接触で感じることのできる空中触覚ディスプレイ (HaptoClone [19]) なども存在する。

デバイスのタイプによってそれぞれ向き不向きがあり汎用的なシステムは存在しないため、コンセプトに応じて適切な手段を選択する必要がある。例えば、手軽さを重視した主観的な体験には身体動作を妨げにくい把持型を、強力な力覚フィードバックが必要な場合には接地型を採用するなどである。

これらのデバイスで感覚を提示する仕組みとしては、モーター、振動子、電気刺激、空気圧、超音波などのアクチュエータが用いられている。また、これまでに上げた例は研究室内の取り組みも多いが、ディスプレイ技術に関しては社会実装が進められている。例えば、ゲーム機のコントローラでは NINTENDO64 の周辺機器として発売された振動パック[4]に始まり、現在では Nintendo Switch の Joy-Con の HD 振動[5]や PlayStation 5 の DualSense のハプティックフィードバック機能[6]により精密な振動提示が可能になった。DualSense には振動機能だけでなく、アダプティブトリガーと呼ばれる抵抗力が変化する引き金状のボタンが搭載されており、弓を引き絞ったり、車のブレーキをかけたりといった動作がよりリアルに感じられるようになっている。また、iPhone をはじめとするスマートフォンや Apple Watch といったデバイスにも Taptic Engine と呼ばれる振動子が搭載されており、タッチパネル上でのボタンやスクロール、長押し操作に応じて触覚フィードバックが生じるため、キーボード入力やホームバーなどインターフェースの操作性を高めている。

2.3. 触覚伝送技術

触覚センシング、触覚ディスプレイを含む触覚伝送技術が存在する。前述した TECHTILE toolkit [12](図 2.3) は糸電話のように対面で触覚を伝えることができ

4 https://www.nintendo.co.jp/n01/n64/option/sindop.html

5 https://www.nintendo.co.jp/jobs/keyword/29.html

6 https://www.playstation.com/ja-jp/accessories/dualsense-wireless-controller/

る。振動センサとしてマイクを、アクチュエータに振動子を用いることでコップの中のビー玉やビーズの存在を感じられる。

(出典：Minamizawa ら [12])

図 2.3: TECHTILE toolkit

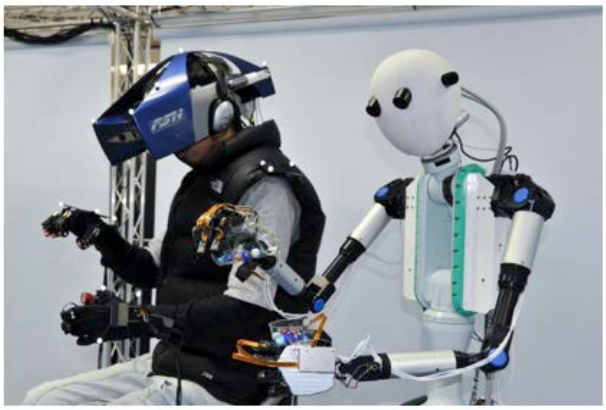
同様に、前述した HaptoClone [19] も 2 つの離れた場所の光と力の場を相互に複製、転送するもので、3 次元映像とともに 100 mN/cm^2 程度の接触圧を伝えることができる。

双方向リモート触覚伝達システム [20] では、極薄ハプティック MEMS デバイスと触覚信号編集技術を組み合わせ、リアルな触覚を再現している。

また、ネットワークを経由して触覚情報を遠隔伝送する取り組みも様々である。早川らは遠隔地でバスケットボールの試合観戦を可能にするため、床の振動を伝送している [21]。5m 間隔で床裏に設置された 8 つのコンタクトマイクにより収録した床振動を 2ch にミックスダウンし、500Hz 以上の周波数帯域をカットした信号を約 900km 離れた場所に伝送して振動床で再現している。

アバターロボットである TELESAR V [22](図 2.4) では、ロボットの指先に取り付けられたセンサが遠隔地にある物体の圧力、振動、温度を検知し、オペレータの指先にフィードバックすることで、離れていても物体の識別が可能であることを示している。マルチキャスト触覚デバイスである HaptI/O [23] では、センサ及びアクチュエータが搭載されたデバイスがネットワーク越しに一対一、一対多

など自由な構成で接続され、インタラクティブな触体験共有が可能である。また、遠隔コミュニケーション支援を目的とした、双方向の触覚付きビデオ通話である公衆触覚伝話 [24]、リモートハイタッチ [25] なども触覚のネットワーク通信といえる。Furukawa らはスマートフォン上でくすぐり感覚を伝送している [26]。



(出典：Kurogi ら [22])

図 2.4: TELESAR V

また、触覚をネットワーク越しにやり取りするためには、決められた形式で触覚データが構成されている必要がある。MPEG コンテナに触覚を重畳する MPEG-4 ALS [27] や、json に似た形式の音声と振動を同じファイルに記述する AHAP (Apple Haptic and Audio Pattern)[7]フォーマットなどが考案されている。

2.4. 触覚コンテンツのデザイン

2.4.1 デザインツール

触覚コンテンツはセンシングのみならず信号生成や編集プロセスなどデザインによっても生み出される。Enriquez ら [28] は、一自由度の触覚提示デバイスに

7 https://developer.apple.com/documentation/corehaptics/representing-haptic-patterns-in-ahap-files

対して自由な信号波形をデザイン可能な触覚デザインツールを考案した。また、昨今一般に入手可能な触覚デザインツールが登場しており、iOS (iPhone 向けオペレーティングシステム) に組み込まれているフレームワーク Core Haptics を利用した Haptrix[8]やゲーミングデバイスメーカー Razer の子会社が提供する Haptic Composer[9](図 2.5)、Meta 社の Meta Haptics Studio[10] などにより触覚コンテンツを制作可能である。触覚ミドルウェア CRI HAPTIX[11]、ミライセンス社の 3DHaptics Development Kit[12]などは製品化されており、スマートフォンやゲームなどのソフトウェアに組み込まれている。これらのツールは、収録済みの触感プリセットを組み合わせたり、振動の強弱を調整したり、音声ファイルから触感に変換したり (図 2.5) と、PC やスマートフォン、ゲーム機や HMD などの特定のプラットフォーム向けの触感をデザイン可能にしている。映像のような他の要素と関連付けて制作することは困難である。

(出典：Interhaptics 社 Web サイト[9])

図 2.5: 触感デザインツール Haptic Composer の画面

8 https://www.haptrix.com/

9 https://www.interhaptics.com/tech/haptic-composer

10 https://developer.oculus.com/documentation/unity/haptics-studio/

11 https://game.criware.jp/products/haptix/

12 https://www.miraisens.com/ja/solution.html

自動で信号を生成する手法も考案されている。Cai ら [29] は GAN (Generative Adversarial Networks) という深層学習を用いて、布素材の画像から摩擦信号を生成し、実際の触感を再現している。また、Yamaguchi ら [30] は、触知覚特性に基づいて高周波信号を強度変調した低周波信号に変換する ISM (Intensity Segment Modulation) 法を開発した。LRA (Linear Resonant Actuator) などアクチュエータの特性に適した信号に変換することも触覚デザインの一種といえ、感覚の再現に重要である。

2.4.2 応用事例

デザインされた触覚コンテンツはこれまでにも様々作られてきた。身近なところでは体感型シアターの 4DX[13]もその一例と言え、映画に合わせて動いて振動する椅子や風やミスト、香りなどマルチモーダルかつ没入感のある体験を提供している。Synesthesia Suit [31] は、26 の振動子から構成される全身触覚スーツであり、視覚や聴覚とともにビートに合わせて音楽と一体化したような間隔が得られ、ゲームの没入体験を全身へと拡張している。Twech [32] は、触り心地を動画とともに記録、共有、検索できるプラットフォームで、センサ及びアクチュエータ搭載のデバイスをイヤホン/マイク端子を介してスマートフォンに接続することで、動画に音声として触覚を記録している。記録したデータを畳み込みニューラルネットワークで学習させることで、記録したデータに近い触感を検索することができる。絵本の読み聞かせに触覚を併用するキンダーぶるぶるクッション [33] も注目されている。振動子を内蔵したクッションに子どもたちが座りながら絵本の読み聞かせをすることで、通常の読み聞かせと比較して絵本への注意を維持することが可能であった。このように、触覚情報が行動へ影響を与える例も存在する。

また、社会的な取り組みとしても HAPTIC DESIGN [34] としてプロジェクトが立ち上がっている。これは、ビジュアルデザインやサウンドデザインが確立されてきたように、触れることをデザインしようという取り組みで、研究のみならずワークショップやアワードなどが開催された。

13 https://www.cj4dplex.com/4dx

また、ゲームにおける振動デザインは山本ら [35,36] によれば、音声と同じようなものだとしており、サウンドデザイナーが重要なシーンの振動デザインを担っているようである。前述の Nintendo Switch に搭載されている HD 振動機能は、ゲーム内でコントローラを傾けると中に玉が入っていたり、バイクに乗ったりキャラクターが水面に飛び込んだりする感覚の提示に活用されている [37]。

2.5. 本章のまとめ

本章では、感覚共有の現状から触覚デザインの応用事例まで述べた。触覚の再現には計測、提示技術が重要であり、適切な手段を使い分けているのが現状である。また、その手段の選定に着目することが触覚デバイスの開発に求められている。また、ゲーム機やスマートフォンなど触覚技術は身近なものになってきており、触覚を共有する基盤の実現可能性も高まっている。その一方で、視触覚コンテンツ制作は研究室内での取り組みがほとんどであり、プロダクションにおいて活用可能なワークフローは未成熟であった。

第 3 章
Concept Design

触覚を共有する基盤技術を確立することで、多くの人に主観的体験を伝える手段を提供したい。ゲームや UI としての触覚技術は身近になってきたが、自身の感覚を実際に記録して伝えることは未だ困難である。ここに確立された制作プロセスがあれば、より多くの人が触覚共有の価値を享受できると考え、コンテンツ制作を実践する。

3.1. FEEL TECH プロジェクト

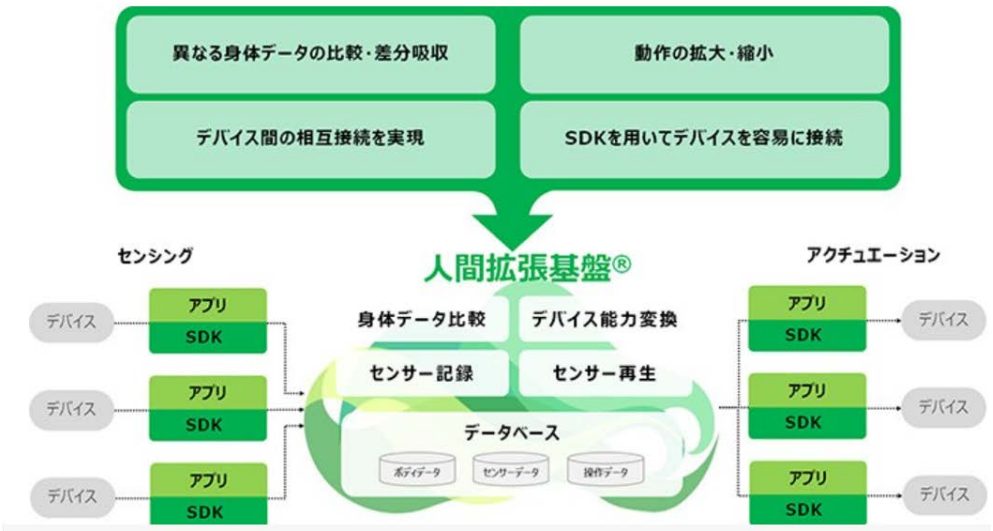
3.1.1 プロジェクト概要

このような未来像の実現を目指し、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が 2022 年に発足した。今回のプロジェクトには、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 Embodied Media Project、名古屋工業大学大学院工学研究科 Haptics Lab、旧 FCNT 株式会社が参画し、FEEL TECH®[1]の触覚技術の開発に取り組んだ[2]。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。今回の実装を含めると本稿執筆時点までに、動作、触覚、味覚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

1 「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 報道発表資料: docomo Open House'23 出展: 世界初、6G 時代に新たな価値を提供する「人間拡張基盤」によって相手の感じ方に合わせて触覚共有する技術「FEEL TECH」を開発, https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2023/01/25_00.html

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。コミュニケーションにおいて感覚をどのように伝えるか、ということを重視し、本プロジェクトでは「触覚のパーソナライズ」を実現した。人間拡張基盤 (図 3.1) 上で、測定された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事のように体感可能な触覚伝送システムが提供される。これにより、加齢や皮膚状態などが原因で触知覚感度が低下している方でも主観的な体験として楽しむことができる。



(出典：NTT ドコモ Web サイト[2])

図 3.1: 「人間拡張基盤」システム構成図

3.1.2 FEEL TECH が目指すユースケース

次世代通信基盤に触覚技術を含めるにあたっては次のようなユースケースが想定される。

- リアルタイム触覚コミュニケーション
- EC や広告

- 体験共有
- 医療
- 教育

触覚共有をコミュニケーションに取り入れることで、人々の日常生活の質向上につなげることが狙いである。この際、主観的な感覚を再現することが、感覚的コミュニケーションの実現に求められる。主観的な感覚をこれまでの触知覚メカニズムの知見をもとに変換してパーソナライズした感覚を伝送可能にすることを目指す。また、触覚技術によって質感再現が可能であることから、着用感が重要となるファッション分野の EC などで大きな価値を発揮すると想定している。遠隔地間、バーチャルとリアルを体感可能な状態でつなぐことが、これからの新しいコミュニケーションの形であると考える。

3.1.3 プロジェクトにおける本研究の役割

本プロジェクトにおいて目標の実現には多数の課題が存在するが、中でも触覚コンテンツを誰もが作り出せるようにすることが将来的な普及につながると考えている。そこで本研究では、映像プロダクションと共同で視触覚コンテンツ制作を行い、今後の展開の足がかりとなる取り組みを進める。まず、プロフェッショナルレベルの映像制作に着目し、高品質な触覚コンテンツを生み出すことを最優先として、ワークフローを構築し、コンテンツ制作を実践することを目的とする。この制作手法が有効であると示されれば、アマチュアや一般の方々でも参入しやすくなると思われる。

筆者は本プロジェクトにおいて触覚コンテンツ制作のワークフローを検討し、事前収録型の視触覚コンテンツ制作を担う。

3.2. 提案手法：視触覚コンテンツ制作のワークフロー

制作規模や実写か CG にもよるが、映像コンテンツ制作は通常図 3.2(a) に示すような流れで行われる [38,39]。大きく三段階に分かれ、プリプロダクション、プ

ロダクション、ポストプロダクションの流れである。プリプロダクションでは企画立案、台本作成、キャスティングやロケーション・ハンティング、機材準備など、工程の全体像を決定する。プロダクションでは台本に沿った映像や音声を収録し、必要であればCGやイラスト素材を制作、発注するなど、コンテンツに必要な素材を用意する。撮影の際は、事前に作成した香盤表をもとにスケジュールを管理しながら行う。ポストプロダクションでは収録した素材を構成に基づいて編集し、コンテンツとして仕上げる。完成したコンテンツはパッケージにより納品され、インターネット配信や放送、ディスクメディアなどを通じて視聴者のもとに届けられる。

ここに視触覚コンテンツ制作を組み込むため、図3.2のような包括的なワークフローを提案する。視触覚コンテンツ制作においても収録、編集、再生と映像制作と同様の工程が求められるため、映像工程を極力妨げずに並行して触覚収録を組み込むことが可能である。ただし視触覚コンテンツは、TVやPC、スマートフォンなど社会に浸透しているデバイスを使って再生できる映像コンテンツとは異なり、現在では専用のデバイスを使用して再生する必要がある。

触覚パートについては以下のような流れで進められる。

1. 映像と同期した触覚の収録
   映像と同時にセンサを用いて触覚を収録することで、主観的な体験の記録を行う。

2. 触覚の編集
   記録した触覚データは未加工の場合感覚的に不十分である場合があるため、調整やデザインを行ってコンテンツとして仕上げる。

3. 触覚再生システムの構築
   完成した触覚コンテンツに適した再生システムを構築する。

図 3.2: コンテンツ制作の一連のワークフロー

映像と触覚の同期は動作に基づいた感覚提示のために重要であるが、センサによって触覚データに音声信号が含まれないため、スレート (カチンコ) やハンドクラップで合わせることは難しい。触覚の編集においては、感覚的なものを編集者の独断によって調整するため、多くの人にとって納得感のあるものに仕上げるにはある程度知識や経験が求められる。触覚再生システムの構築においては、コンテンツに適した提示方法でありながら体験のしやすさ等バランスが整ったものが求められるため、万能なシステムというのは現時点で存在しない。これらの困難な点を解消することを目標に、各パートでの詳細なプロセスを提案する。

3.3. 触覚収録手法

3.3.1 概要

触覚収録では、機材を準備したのち実際にセンサを用いて振動を記録し、編集のためのデータ整理までを行う。触覚の場合も音声同様に、センサ、アンプ、レコーダー等の機材を組み合わせる。センサを指や物体に固定して記録したい動作を行い、映像や音声と同時に振動を記録する。なお、映像とは別に触覚収録を行い、編集時に当てる場合もある。また、編集作業をスムーズに行うために、レコーダーに記録したデータを整理する。音声の場合はステレオでLとRのファイルに分かれることがあるが、触覚の場合は記録する指や物体に応じて適切なファイル名をつける必要がある。

3.3.2 システム構成

触覚収録を行うにあたって、音響と同様にセンサ、アンプ、レコーダー等の機材を組み合わせる必要がある。収録する動作や環境に応じて適切な機材を選定する。例えば、想定する動作のダイナミックレンジが大きく異なる場合や、防水対応が求められる場合に必要なセンサは変わってくる。レコーダーについても可搬性やチャンネル数等の要件も変わる。各センサには特定のアンプを組み合わせ、オーディオ信号レベルに増幅してレコーダーで記録する。

センサには、ECM(Electret Condenser Microphone)(プリモ社 EM246U100B1)、圧電型型加速度センサ (昭和測器 MODEL-2302B)、PVDF フィルム [8](名古屋工業大学田中研究室より借用) の 3 種類を用いる (図 3.3)。

レコーダーには、フィールドレコーダー TASCAM Portacapture X8 や ZOOM F2-BT が用いられる。これらは 32bit float 形式での収録が可能であり、打撃やなぞりなど動作のダイナミックレンジが広い触覚収録において、現場での調整の手間を省き失敗のリスクを低減することができる。音響とは異なり、触覚収録においては収録対象にセンサを直接接触させるため、ゲイン調整が必要な場合もある。

3.3.3 収録方法

センサを指や道具に装着して振動の収録を行うが、セットアップは状況によって異なる。使用するセンサや治具を用いた固定方法等、想定する動作に応じた調整が求められる。

楽器演奏や手触り感等の収録の場合、指にセンサを装着して皮膚振動を記録する。PVDF フィルムは人差し指の第一もしくは第二関節に巻き、その他のセンサの場合リング状の 3D プリンタ製治具を用いて装着する。センサを装着した指の腹で素材をなぞったり、弦をはじいたり楽器を叩いたりして振動を記録する。PVDF フィルムは繊細な手触り感の収録に、加速度センサは打撃などの強弱が強い動作に、コンタクトマイク (ECM) は音の残響成分の収録に適している。

また、なぞる際の指の角度、スピードやストローク、圧力といった触り方を調整することで、得られる感覚をコントロールできる。手触り感の収録の場合、やや爪を立てることで細かな凹凸を強調したり、スピードを速めることで振動に緩急をつけたり、圧力すなわち摩擦を高めることで強調したりと、素材に応じた動作によってより納得感のある感覚を引き出す。

バドミントンや茶筅等の道具越しの収録の場合、道具にセンサを装着して伝播する振動を収録する。コンタクトマイクの場合、道具の接触面とセンサ表面の間に空気の層を設けて密着させるほか、凹凸面に沿う治具を用意する。

また、収録の際は映像との同期のため、マイクで音を記録したり、タイムコードを用いたりする。

(a) ECM (b) 加速度センサ (c) PVDF フィルム

図 3.3: 収録に使用する触覚センサ

3.3.4 編集前の下処理

収録後、編集作業をスムーズに進められるようフォルダ分けやファイル名の変更を行ってデータを整理する必要がある。触覚データは単体で再生しても識別が難しく、どのシーンのどの指の動作であるか等がデータからはわからないためである。ファイルの記録日時をもとに映像からシーンを特定したり、同時に収録した音声を聞いてタイミングを合わせたりして編集を行っていく。ファイル名が一意になるように、日時やシーン番号、記録チャンネルやセンサの種類などを事前に記載することで、タイムラインの構成をスムーズに行えるようになる。

3.4. 触覚編集手法

3.4.1 概要

触覚データはオーディオ信号として収録されるため、既存のオーディオ編集ツールを活用可能である。今回は映像と触覚を同期させる必要があるため、視触覚コンテンツの制作に動画編集ソフト Adobe Premiere Pro を使用した。より高度なミキシング作業やエフェクト適用のために Pro Tools や Cubase のような Digital Audio Workstation(DAW) ソフトを使用することもある。映像と音声、触覚を同期させるには、マルチチャンネルオーディオの動画として作成する方法が確実かつ制作フローとしてもシンプルである。図 3.4 のように映像と音声、触覚データをトラック別にタイムライン上に並べて切り貼りすることによって一つのコンテンツとして作り上げていく。シーケンスをマルチチャンネル仕様 (今回は音声と触覚合わせて 4ch) に予め設定しておき、画像中央のミキサー部でどのチャンネルから信号を出力させるかをトラックごとに選択する。

3.4.2 編集手順

触覚コンテンツは次のような手順で編集を行う。

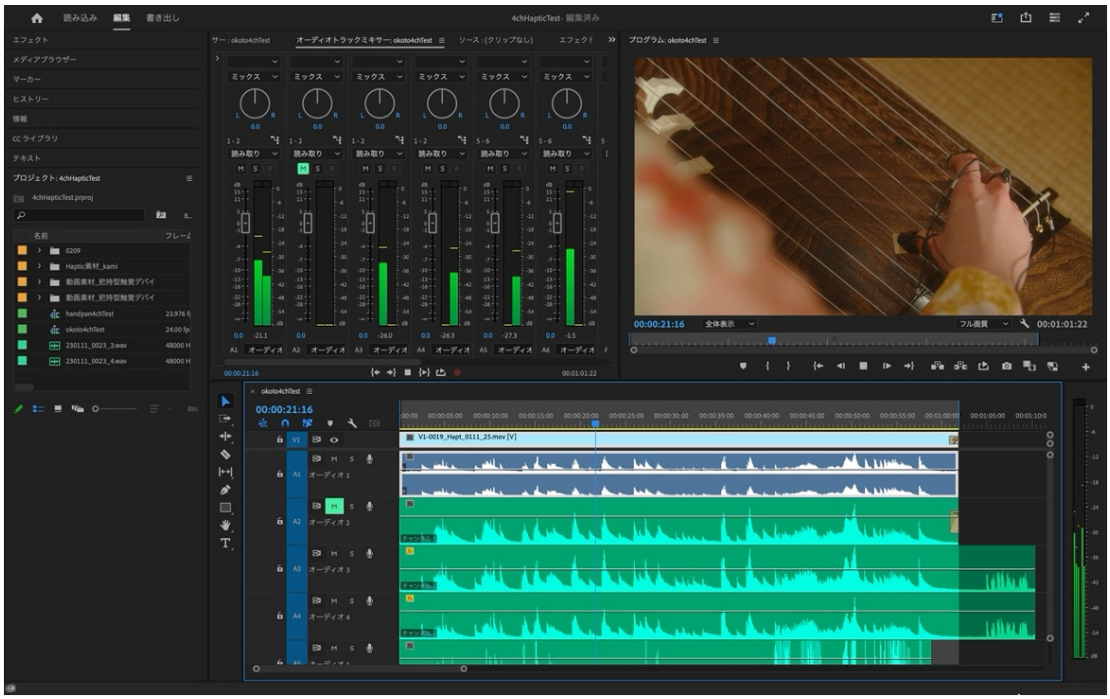


図 3.4: Premiere Pro 上での視触覚コンテンツの編集画面

1. 触覚データの同期
   カット編集が完了 (ピクチャーロック[3]) した動画に対し、シーンごとに触覚データを同期させて配置する。

2. パン調整
   映像内の手の向きに合わせ、両手または左右の手のどちらかに触覚を提示するかを選択する。

3. ゲイン調整
   シーンごとに触覚データをノーマライズし、ミキシングする。

4. 表現の調整
   質感を確認後、感覚が不十分であると感じた場合エフェクト処理を行う。

3 映像制作において、次の段階に進むために尺の調整を完了した状態を指す。オールラッシュとも言う。

このような手順で編集することで、映像とリンクした感覚をリアリティを維持したまま作り出せる。

触覚データの同期では、Premiere Pro 上でマルチチャンネルのシーケンスを作成して、映像や音声と同期して触覚データを並べていく。

3.4.3 触覚編集に用いるエフェクト

収録した触覚データは整音作業のようにエフェクト処理を施すことで、より体感に近づけたりインパクトを強調したりすることができる。触覚データに応用可能なオーディオエフェクトは主に 3 種類ある。

- ダイナミクス系
- フィルター系
- 特殊効果系

ダイナミクス系では信号の振幅軸の強弱を調整する。具体的にはコンプレッサーやエキサイター、トランジェントシェイパーなどで、アタック (打撃) 感を調整するのに用いられる。例えば、紙コップに砂を注ぐ際に連続した打撃を強調するため、振幅の強弱を拡大する場合などで有効である。

フィルター系では信号の周波数帯域ごとの強弱を調整する。イコライザ (equalizer, EQ) がメインのエフェクトであるが、帯域ごとにダイナミクスを調整可能なマルチバンドコンプレッサーなどもフィルターの一種と言える。振動として知覚できるのはおよそ 1000Hz までといわれており、主にそれ以下の帯域でゲイン調整を施して、素材の凹凸を強調する。また、アクチュエータから発生する音を聞こえにくくするため高域低減のローパスフィルタをかけることもある。

特殊効果系としては、リバーブやピッチシフターが有効である。振動自体は瞬間的であるが感覚としては余韻を感じるような場合に、リバーブを用いて残響成分を付加して振動として感じられる時間を延ばす。ピッチシフターではフォルマントを保ったまま周波数帯域を下げることで、質感を損なわずに感じられやすい帯域の成分に変換できる。

3.5. 触覚再生手法

3.5.1 概要

振動触覚の場合にはオーディオ信号として扱うことにより既存のオーディオ再生システムを活用できる。そうすることでスケーラブルなシステムを構築でき、多人数同時体験や多チャンネル化、デバイスの交換等が容易になる。編集した触覚データは音声信号としてオーディオインターフェースを経由し触覚デバイスで再生される。今回は 2ch 把持型及び 4ch 指先装着型の触覚提示デバイスを用意した。

3.5.2 システム構成

USB Audio Class 対応のオーディオインターフェースとして動作する触覚提示デバイスを PC に接続して、視触覚コンテンツを再生する。1 台の PC 上で映像と同期して再生するには、macOS の Audio MIDI 設定.app 内の機器セット機能が活用できる。機器セットは、複数のオーディオ機器を 1 台のマルチチャンネルオーディオデバイスとして束ねて使用できる機能であり、デバイスの持つ入出力数の分だけチャンネルを増やすことができる。マルチチャンネルの動画ファイルを用意するだけで VLC media player などの対応ソフトウェア上で映像と音声、触覚を同期して再生できる。また、複数のデバイスに同じ信号を出力する場合には、複数出力装置機能が使用でき、機器セット同様複数のデバイスを束ねて認識させられる。機器セットはチャンネル数を増やすために使うのに対し、体験人数を増やしたいなど複数デバイスに対応させる際に用いるのが複数出力装置である。なお、機器セットの構成機器に複数出力装置を含めることはできないため、実際には BlackHole や VB-CABLE 等の仮想オーディオデバイスや LadioCast 等の仮想ミキサーを組み合わせてルーティングを設定する必要がある。例えば、音声 2ch 及び触覚 2ch の計 4ch からなるマルチチャンネルのデータがあり、触覚のみ複数デバイスに分岐させたい場合には、スピーカー出力と仮想オーディオデバイス (出力側) で 4ch 出力の機器セットを構成し、ミキサーの入力に仮想オーディオデバイス (入力側) を設定し、複数の触覚デバイスを含んだ複数出力装置をミキサー出力

に設定することで対応可能である。

FEEL TECH の場合には映像と触覚をネットワーク越しに伝送するため、クライアント端末において触覚再生のシステムが実装されている。

3.5.3 2ch 把持型触覚提示デバイス

FEEL TECH プロジェクトの一環として 2ch 把持型触覚提示デバイスを開発した。開発の要件として、

- デバイスの装着や体験が容易である
- 左右の手で体験できる
- 日常においても溶け込むような外観である

などが挙げられ、これを満たすようなデザインが鞠氏によってなされた (図 3.5(a))。半球部をあわせて一つの球体として持つこともできるが、通常は左右に分割して両手に持ち、映像内の手の動きに合わせて動かして使用する (図 3.5(b))。首から下げることでケーブルの重量が手に伝わりにくく動かしやすいため、コンテンツに集中しやすくなる。

3D プリントした半球部にある触覚アクチュエータ (Foster, 639897) と、首元のボックス内部の USB パワーアンプ (Cidre Interaction Design Inc., HPAUSB0202) がオーディオケーブルで接続されており、アンプの USB Type-C 端子から PC 等に接続することで、プラグアンドプレイでステレオの USB オーディオデバイスとして動作する。

3.5.4 4ch 指先装着型触覚提示デバイス

より巧緻な動作の共有を実現するために、4ch の指先装着型振動触覚デバイスを設計試作した (図 3.6)。アクチュエータに Nidec 社製の CA7-VH5 を用い、ハウジングに交換可能なパーツ (図 3.7) を設計し、指先形状にフィットする小型軽量

(a) デバイス外観 (b) 着用の様子

図 3.5: 2ch 把持型触覚提示デバイス

マルチチャンネル触覚デバイスを実現した。これにより指先の動作を妨げない透明な触覚インターフェースに近づけられた。

本デバイスも同様に、Mac 上で機器セットを作成し、音声 2ch 及び触覚 4ch の計 6ch(5.1ch) のオーディオデバイスを設定することで、マルチチャンネルの触覚コンテンツが再生可能である。また、どの指に取り付けるかが重要であるが、Shao ら [40] によれば親指とその他の指の間で振動伝播の度合いが大きく異なるため、親指とその他の指に分けて装着するのがより巧緻動作の表現に適すると考えられる。

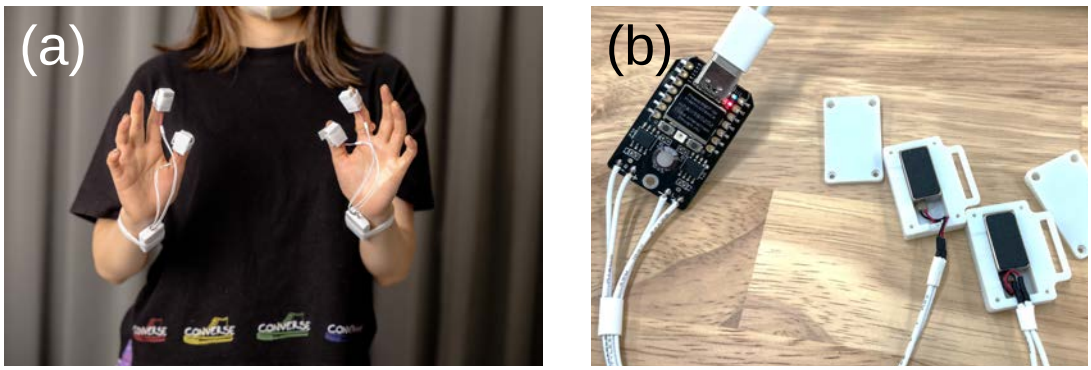
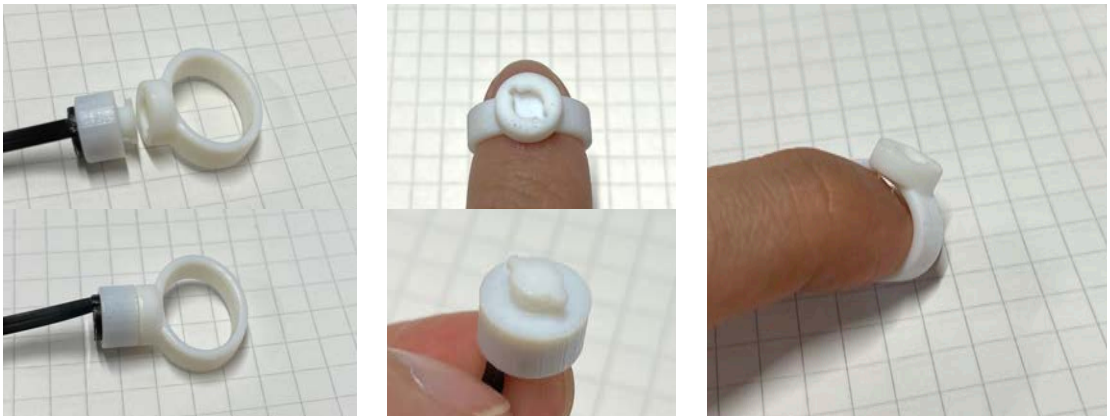


図 3.6: 指先装着型 4ch 触覚提示デバイス

3.6. 本章のまとめ

本章では、視触覚コンテンツ制作に求められるワークフローを提案した。映像や音響の既存の制作フローに触覚収録を加え、社会実装を見据えた現場でのスムーズな制作を実現する。触覚コンテンツ制作は収録、編集、再生のプロセスで構成される。収録プロセスでは、センサを使い分けてコンテンツに応じて収録する手法を提示した。編集プロセスでは、収録した触覚データをよりわかりやすく仕上げるため、場面に応じてエフェクトを駆使する手法を提案した。再生プロセスでは、既存のデバイスから実用性を考慮して開発された新たな触覚提示デバイスを提案した。これらの手順をもとに実際のシーンでの適用を実践する。



(a)アクチュエータ脱着 (b)接合部 (c)指形状への適合

図 3.7: 交換可能な指先装着具

第 4 章
Proof of Concept

4.1. 概要

本章では、前章で提案したワークフローを様々な場面に適用してその有効性を確かめる。一貫したワークフローを用いることで、映像プロダクションと協業して視触覚コンテンツ制作を円滑に進められるようにすることが目的である。前章では、既存の映像制作に触覚収録を組み込むワークフローを提案した。触覚収録も映像や音響同様に収録、編集、再生のプロセスからなることから、他のセクションと並行して制作が可能である。同様のワークフローを用いて実際に 8 種の触覚コンテンツ収録を行い、スタジオにおける触覚収録、触覚効果のアフターレコーディング、フィールドにおける触覚収録の三つに分類して考察する。コンテンツ制作において、映像制作は株式会社 DALIFILMS が担当し、触覚部分を筆者が担当した。また、制作したコンテンツはイベントにおいて展示された。

4.2. スタジオにおける触覚収録

4.2.1 道具越しの収録

道具越しの触覚のうち振動成分については、道具に生じる振動を収録しておき、道具を介して振動を提示すれば再現できるといえる。例えば、鉛筆の筆記感を再現したい場合、鉛筆を伝う振動を収録して、同様の振動を鉛筆を介して手に与えれば、実際に書く場合と同じである。そのため、触覚共有において道具越しの感覚は後述する手触り感等と比較して再現しやすいと言える。

TECHTILE Toolkit [12] をはじめとした触覚共有デバイスでは、紙コップなどの道具にセンサを直接貼付し、道具に振動アクチュエータを固定することで触覚を提示している。

道具越しの感覚として、バドミントンと茶道を収録した。バドミントンの収録は 2023 年 1 月 12 日に東京都杉並区のプラネアール荻窪スタジオにて、茶道の収録は 2023 年 1 月 11 日に東京都青梅市のプラネアール青梅スタジオにて行われた。図 4.1 に道具越しのコンテンツのサムネイル画像を、図 4.2 に収録の様子を示す。

図 4.1: 道具越しのコンテンツ

図 4.2: 道具越しの収録の様子

映像について、茶道では柄杓でお湯を注ぎ、茶筅 (茶道で抹茶を点てる道具) でお茶を点てる様子を一人称視点で 、バドミントンでは演者がシャトルを打ち上げる様子を上半身像とラケット手元の視点で収録した。触覚収録は、茶道では柄杓と茶筅 に治具によりコンタクトマイクを貼付し、バドミントンでは映像に写りにくいようラケットのグリップを改造し、内部のシャフトにコンタクトマイクを貼付して行った (図 4.2(c))。茶道では Portacapture を画面外に配置し、バドミントンでは演者のポケットに入れた F2-BT をグリップエンドのマイク端子とケーブルで接続して記録した。

編集プロセスにおいて、茶道は収録データでは音響成分が多く振動として感じにくかったため、EQ で特定の帯域をブーストした。バドミントンは 32bit float で記録したもののゲイン調整ができず波形がクリップした瞬間があったが、質感としては十分であった。

再生手法について、本来は収録に使用した道具そのものを感覚提示に用いるべきだが、今回は汎用的なデバイスで様々なシーンの再現を目指しているため、図**??** の半球形デバイスにより提示を行った。茶筅やバドミントンについては、手が握るような形状であるため、半球型デバイスでも違和感の少ない体験が可能であった。

4.2.2 手を用いたインタラクションの収録

手を用いた人や物とのインタラクションは、皮膚振動を計測、提示することで再現する。手が直接対象に触れる動作は、接触面が動作によって変化するため、対象が変化しない道具越しと比較して再現が難しいといえる。

手を用いた人や物とのインタラクションについて、箏とハンドパン、フィストバンプのコンテンツを収録した。箏の収録は 2023 年 1 月 11 日に東京都青梅市のプラネアール青梅スタジオにて、ハンドパンとフィストバンプの収録は 2023 年 2 月 9 日に東京都千代田区のライトスタジオにて行われた。図 4.3 に手を用いたインタラクションのコンテンツのサムネイル画像を図 4.4 に収録の様子を示す。

図 4.3: 手を用いたインタラクションのコンテンツ

映像について、箏の演奏の様子を演奏者全体像と手元寄りの視点で、ハンドパンの演奏の様子を演奏者全体像と頭越しの一人称視点で、フィストバンプでは演者 2 人が拳を突き合わせたりハイタッチしたりする様子を演者全体像と上半身の画で収録した。触覚収録について、箏では演奏に重要な左手中指、右手親指・人差し指・中指の箏爪や指に加速度センサ、PVDF フィルム、コンタクトマイクを

治具やテープで装着して行った。ハンドパンにおいてはセンサの数が不足したため、頻度の高い 4 つの指先に治具を用いて加速度センサを装着した。フィストバンプにおいては演者 2 名のうち片方の人差し指に加速度センサを装着し、足元においたアンプに接続した。

体験時は、2ch 把持型触覚提示デバイスを用いた。この際、映像内の手と体験者の手の動作が一致していないと違和感の原因にもなる。予測が容易な動きを映像内で提示することも重要であるが、訓練によって体感を高められる可能性がある。また箏とハンドパンに関して、4ch 指先装着型触覚提示デバイスもテストした。把持型のデバイスよりも指先の細かな動きが感じられ、演奏感が高まった。

図 4.4: 手を用いたインタラクションの収録の様子

4.2.3 手触り感の収録

手触り感の収録では素材をなぞる際の振動を計測、提示することで感触を再現する。前節のインタラクションの場合は叩いたりはじいたりする動作が主で対象物が一定であったが、手触り感の場合なぞり動作とともに接触面の分布が時々刻々と変化する。

手触り感として、数種類の皮革素材や服、陶芸を収録した。皮革素材の収録は2023年2月9日に東京都千代田区のライトスタジオにて、服の収録は2023年1月19日に東京都港区の東京ポートシティ竹芝 8F CiP 内会議室にて、陶芸の収録は2023年1月11日に東京都青梅市の高橋歩 陶芸工房にて行われた。図4.5に手を用いた手触り感のコンテンツのサムネイル画像を示す。

図 4.5: 手触り感のコンテンツ

映像について、皮革素材をなぞる様子を一人称視点で、服をなぞる様子を手元と演者着用時の上半身像で、陶芸では粘土をこねたり手びねりで整形する様子を手元の視点で収録した。触覚収録は、皮革素材では加速度センサとPVDFフィルムを、服の場合には加速度センサを、陶芸では加速度センサとコンタクトマイク

を指に装着して行った。服の収録時に加速度センサでは質感が不足したため、皮革素材の収録時に PVDF フィルムを追加した次第である。収録した素材のうち違いがわかりやすかった皮革素材、服の各 4 つずつを採用した。

触覚編集について、手触り感の再現は手を用いたインタラクション等と比較して、大幅な編集が必要であったと感じた。素材の持つ凹凸を強調するために、ゲインを上げるだけでなく EQ によって特定の周波数帯域をブーストする必要があった。また演者自身が触覚収録を行うことと、触り方のレクチャーをあまり実施できなかったことから、収録時の触感では不十分だと感じ、後述のアフレコによって補強したシーンも存在した。ただ、2 種類のセンサを用いた場合にはミキシングが行えたため、質感の調整の自由度が高かった。

4.2.4 視覚障害者の感覚の収録

視覚障害者は視覚を通して外界を把握することができないが、聴覚や触覚情報によってその機能を補っている。ここではダイバーシティ＆インクルージョン推進、多様な他者の感覚を追体験可能にすることを目的として視覚障害者の白杖の動作、ダンスやスケートボードの感覚を収録した。これらの収録は 2023 年 2 月 2 日に埼玉県所沢市の SKiP FACTORY にて行われた。図 4.6 に視覚障害者の感覚のコンテンツのサムネイル画像を、図 4.7 に収録の様子を示す。

図 4.6: 視覚障害者の感覚のコンテンツ

映像について、白杖ダンサーの白杖を使用する様子を胸元に固定した一人称視点で、白杖ダンサーのブレイクダンスの様子を引きと寄りの全身像で、ブラインドスケートボーダーがアール部分を滑って行って帰ってきたりトリックを決めたりする様子を全身像と胸元に固定したカメラで一人称視点で収録した。触覚について、白杖の手元付近に加速度センサモジュール、コンタクトマイクを固定した。ダンスではステージの床にコンタクトマイクを貼付した。

図 4.7: 視覚障害者の感覚の収録の様子

4.2.5 MWC2023 における展示

2023 年 2 月 27 日〜3 月 2 日、スペインのバルセロナで開催された MWC2023 において、上記のシーンを含んだコンテンツを人間拡張基盤に実装し、FEEL TECH の展示を行った。図 4.8 に示すように大型ディスプレイの周りにクライアント端末と触覚デバイスを 4 セット配置し、同時に 4 人体験可能であった。体験者は把持型触覚提示デバイスを首にかけてアクチュエータ部を手に持ち、人間拡張基盤にネットワーク接続したタブレット端末上で触知覚感度を測定する。そして、説明員によるリアルタイム触覚伝送を体験したのち、感度調整された視触覚コンテ

ンツを体験した。1000 人近くの方々に体験いただき、箏やバドミントンなどのコンテンツが好評であった。ここで用いたコンテンツの詳細は、付録のコンテンツ詳細を参照されたい。

図 4.8: MWC2023 における展示の様子

4.3. 触覚効果のアフターレコーディング

4.3.1 概要

映像と触覚を同時に収録して動作に基づいた感覚を記録するのが視触覚コンテンツ制作の基本である。一方で、撮影中に触覚センシングが困難であったり、撮影後に触覚のみ録り直す必要があったり、あるいは似た感覚の素材で代用したいなどの場合には、映像に合わせて触覚のみを収録することがある。音響効果 (効果音) のように触覚を後付けすることから、このような手法を触覚効果のアフレコ (アフターレコーディング) と呼び、CG 映像に触覚を当てた実践例について述べる。

4.3.2 コンテンツ制作

恐竜 (トリケラトプス) の触り心地を再現するため、NTT ドコモから提供された 3DCG の映像に対して触覚効果のアフレコを行った。このコンテンツにおいて筆者は収録を担当し、編集は株式会社アクローム 渡島氏に依頼した。トリケラトプスの質感を再現するに当たり、専門家の意見をもとに選定された素材を使用した。PVDF センサと加速度センサを指に装着し、映像内の手の動きに合わせて素材をなぞることで皮膚振動を収録した。センサはアンプ経由で TASCAM Portacapture X8 に接続され、DAW(Ableton Live 11) 上で FEEL TECH デバイスにループバックすることで触感と映像を確認しながらの収録を行った。DAW のコンピング機能 (複数のテイクを収録して良い部分を繋ぎ合わせる機能) を利用し、納得できるテイクが取れるまで収録を繰り返した。化石から想定される鱗の大きさに対して素材の大きさが足りない場合には、映像の動きに合わせて遅く動かすなどして素材の凸凹感に応じて対応した。

図 4.9 にコンテンツのサムネイル画像を、図 4.10 にシーンごとの素材収録の様子を示す。図 4.10(a) の前足の肌では、うろこが 1.5cm 程度の革素材を使用し、3〜5cm と想定される鱗の質感を再現した。図 4.10(b) の前足の爪では、市販の植木鉢の側面を使用し、爪のざらざらした質感を再現した。図 4.10(c) の角を撫でる

シーンでは、肋骨の化石を使用できたため本来の素材感を再現しやすかったが、映像の動作に対して面積が足りなかったため、円を描くようにして必要な秒数確保した。図 4.10(d) のフリルを撫でたり叩いたりするシーンでは、鱗が 5cm ほどの革素材を用いて、ゆっくりとした動きで 10cm と想定される鱗の質感を収録した。この際、ゴツゴツ感を強調するため爪を立てながらなぞったものも収録した。叩くシーンでは革素材の下に石膏を置くことで硬さを再現した。

図 4.9: 恐竜のコンテンツ

図 4.10: 各シーンに応じた素材の収録

4.3.3 恐竜コンテンツの展示

2023 年 10 月 14 日、15 日に東京スカイツリータウン 4 階スカイアリーナにて開催されたイベント「XR 絶滅動物園」に制作したコンテンツが展示された (図 4.11)。このイベントは NTT ドコモが推進する先端テクノロジーを披露する場で、テクノロジーによって復活した絶滅動物のコンテンツを楽しめるなど、子どもたちにも興味を持ってもらえるようなイベントであった。

図 4.11: 東京スカイツリーにおける展示の様子

4.4. フィールドにおける触覚収録

4.4.1 花火

2023 年 11 月 3 日〜4 日に和歌山マリーナシティで開催された花火ショーを収録した。花火の収録にあたっては、会場で流れる音楽や歓声などの影響を受けづらくかつ遠すぎない場所を確保し、映像と触覚の収録を同時に行った。10 分間の花火 1 回では収録が失敗する恐れがあるため、1 日目をテスト収録とし、2 日目に本番収録という想定で望んだ。1 日目には、花火師の方に打ち上げ場所近くにマイクをセットしていただき、収録班は 800m ほど離れた場所から撮影と触覚収録を行った。打ち上げ場所付近のマイクは想定よりノイズが多かったこと、離れた場所では音響や触覚のインパクトが薄れてしまったことから、2 日目は打ち上げ場所から 300m 程度離れた波止場のような場所から撮影収録を行った。

収録においては、Portacapture X8 付属のマイクや加速度センサを取り付けたプラコップ、ガンマイクやダイナミックマイク、パラボラマイクなどを試したが、付属マイクでも音割れせずに触覚として十分体感可能なデータを収録できた。32bit float 形式で収録しておいたため、ゲイン調整に不慣れでもある程度安心して収録を行えた。

編集に関しては加工の必要性はあまりなく、音響成分を減らすためにローパスフィルタをかける程度であった。ただし、ローパスフィルタをかけることでアタック感が損なわれてしまわないように注意する必要がある。

花火を実際に見たところ、空気が揺れるのを全身で感じたため、手以外の場所への振動提示を検討した。キンダーぶるぶるクッション [33] を抱きかかえたり、振動ベンチに座ったりしたが、体験の容易さを重視して、ベンチを採用した。FEEL TECH デバイスとベンチを併用して全身で体感できるシステムを Mac 上で構築した。

図 4.12 に収録したコンテンツのサムネイル画像を、図 4.13 に花火収録の様子を示す。

図 4.12: 花火のコンテンツ

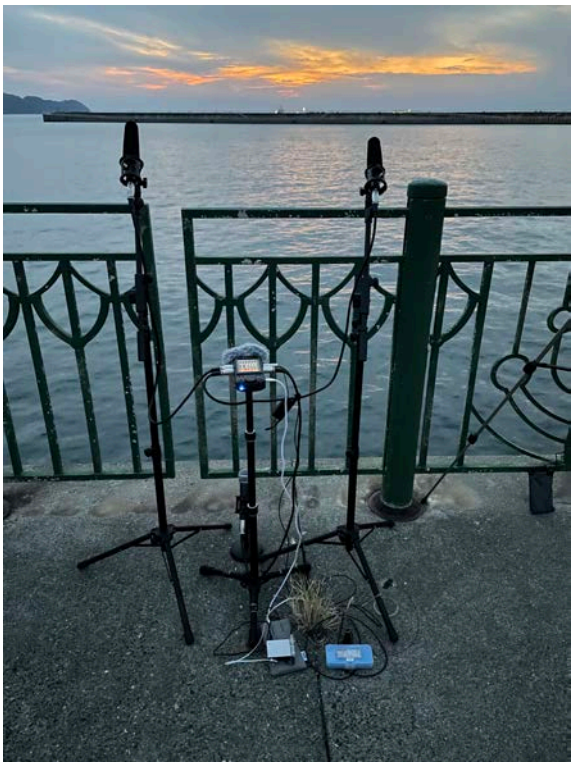


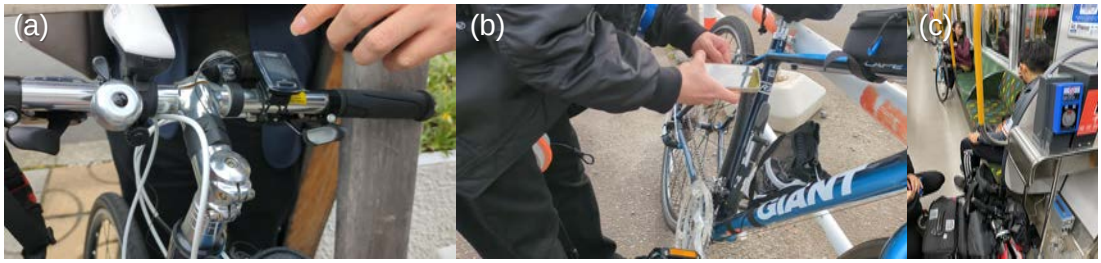
図 4.13: 花火収録の様子

4.4.2 サイクルトレイン

自転車をそのまま電車に持ち込めるサービス「きのくに線サイクルトレイン」を疑似体験可能にするため、サービス一連の自転車や電車に乗る感覚を収録した。収録は 2023 年 11 月 14 日に和歌山県西牟婁郡白浜町の白良浜周辺、JR 白浜駅〜串本駅間において行われた。自転車では手と足で伝わる感覚が異なると考えたため、ハンドル部に加速度センサを、また後輪部フレームにコンタクトマイクを固定して収録した。アンプとレコーダー (Portacapture X8) をフレームに固定されたペットボトルホルダーに収納し、スマートフォンアプリから遠隔で収録の操作を行った。電車では加速度センサとコンタクトマイクで床から伝わる振動を収録したが、編集段階において映像との同期が困難だったため、カメラ音声を編集して使用した。映像と触覚の同期においては、ファイル作成日時を基本としてコンタクトマイクで収録されたハンドクラップ音をもとに行った。

図 4.14 にサイクルトレインのコンテンツのサムネイル画像を、図 4.15 に収録の様子を示す。また、関係者で体験会を実施した際の様子を図 4.16 に示す。電車や自転車の乗り心地、ハンドルから伝わる振動を感じるため、振動子付き椅子やクッションの上に座り、FEEL TECH デバイスを手に持って体験している。

図 4.14: サイクルトレインのコンテンツ



(a) ハンドル部のセンサ取り付け (b) 後輪部のセンサ取り付けと動作確認 (c) 電車内での収録

図 4.15: サイクルトレイン収録の様子

図 4.16: サイクルトレインの再生システム

4.4.3 動物園

2023 年 11 月 15 日に和歌山県にあるテーマパーク、アドベンチャーワールドにおいて動物たちの手触り感を収録した。動物は馬、うさぎ、モルモット、キリン、サイ、アザラシ、イルカの 7 種類である。PVDF センサを基本として加速度センサやコンタクトマイクを組み合わせた。屋外を次々に移動して収録するため、収録機材をポーチに入れて飼育員の方にセンサを装着した。アザラシやイルカなどの水のかかりやすい場面では、防水のポーチに機材を入れたうえで、センサ部を防水テープで保護し水の流入対策を行った。

図 4.17 に動物のコンテンツのサムネイル画像を、図 4.18 に収録の様子を示す。このコンテンツは基本的に FEEL TECH デバイスのみで体験可能だが、イルカのジャンプシーンでは水しぶきを振動椅子で表現するなどのデザインを施している。

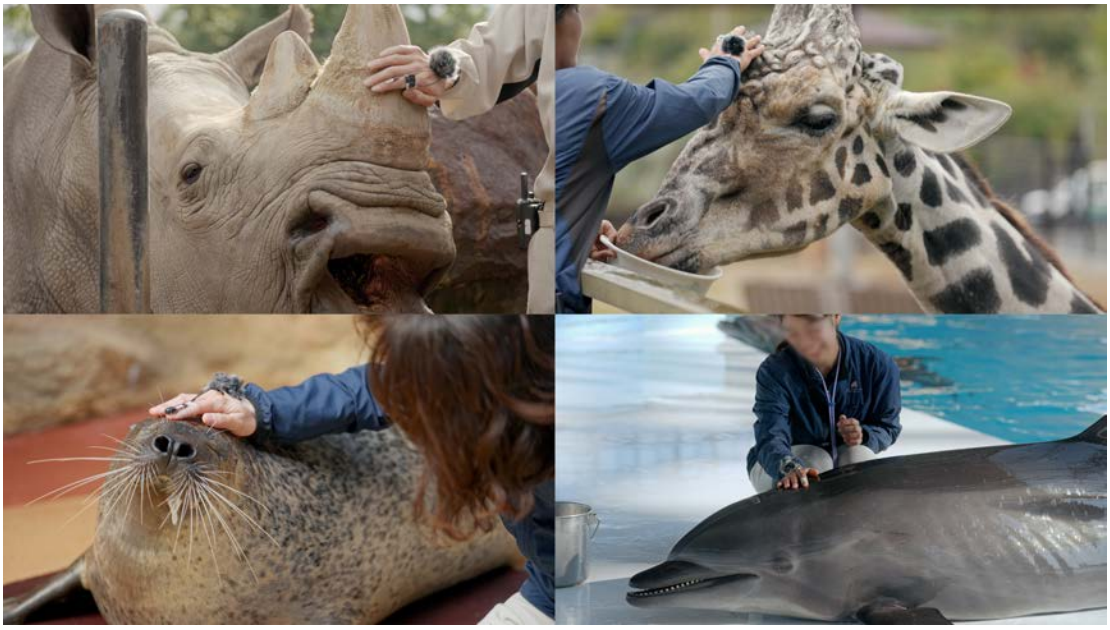


図 4.17: 動物のコンテンツ

制作したコンテンツをアドベンチャーワールドの飼育員やスタッフの方々 20 人に体験いただいたところ、次のような感想、意見をいただいた。

- (アザラシの毛並みが) わかる、「おー」となる (アザラシ飼育員)

- 毛のある動物の違いがわからない
- イルカと他の動物の違いはわかるような気がする
- 触ってる感がデバイスの形的に薄いかもしれない。もっと手のひら指先全体で撫でるような
- 振動でもこれだけ違いが出せるんだと感じた
- 普段あんなに繊細に触らない。もっとガシガシ〜って
- サイのツノはもっと痛いぐらいトゲトゲしている
- ウサギの毛が長くて深くまで触っている感じがわかった

飼育員の方は動物に触り慣れているために基本的に辛口のコメントではあったが、アザラシ飼育員の方は納得感があり、感覚的な差異が大きいと感じた。

図 4.18: 動物の収録の様子

4.4.4 JR 大阪駅における展示

2024 年 3 月 30 日 (土)、3 月 31 日 (日) の 2 日間、JR 大阪駅 (うめきたエリア) にて開催された触覚技術観光体験イベント[1]において収録したコンテンツの展示を行った。このイベントは、和歌山県にある観光スポットの魅力発信、そして触覚技術の広告的な価値の検証を目的として、西日本旅客鉄道株式会社、株式会社 JR 西日本コミュニケーションズ、株式会社 NTT ドコモ、株式会社三菱総合研究所が共同で企画、実施したもので、我々は技術協力として参画した。実施場所の JR 大阪駅インタラクティブ空間では幅 14m、高さ 3.3m のプロジェクションスクリーンが展開されており、左右に分割することで 2 つのコンテンツを並行して体験可能にした。画面左側では花火のコンテンツを、右側では動物とサイクルトレインのコンテンツを展示し、筆者は右側の展示を担当した。

図 4.19 に展示の様子を示す。

図 4.19: 大阪駅インタラクティブ空間における体験イベントの様子

1 「和歌山の観光スポットをうめきたで疑似体験～最先端の触覚技術で観光体験可能なイベントを開催～」(https://www.westjr.co.jp/press/article/items/240322_00_press_wakayama.pdf)

4.5. 映像プロダクションとの連携

映像プロダクションとの作業連携が必要な部分は主に収録後の編集時からである。収録時は、映像側のクラップ等の合図に合わせて並行して行っていたが、一つのコンテンツとして仕上げるためにデータの連携から編集までを共同で行う必要がある。ここではプロセスの試行錯誤の経緯を時系列に沿って述べる。

初期の MWC に向けたコンテンツ収録では、ピクチャーロック (尺の変更が発生しない状態) した映像ファイルをもらい、別プロジェクトファイルを立ち上げて映像ファイルのカット切り替えに応じてピンを打ち、音声データを頼りに個別に触覚データを同期させていた。この手法では、映像の差し替えのたびにピンを打ち直すなどの手戻りが発生するため作業に無駄があった。

そのため、以降の取り組みでは収録後にデータの集約を行い、編集者の双方が同じデータを持っておくようにした。この場合プロジェクトファイルを共有するだけで編集内容を反映できる。映像側で編集があった場合に触覚データも同時に動かせばズレなく済む。プロジェクト用のフォルダ内に、映像、音声、触覚データごとのフォルダを用意し、それぞれシーンごとにまとめた。そうすることで、Premiere 上で目的のシーンを素早く特定し、触覚データを挿入しやすくした。

しかし、この場合でも同期作業の負担は変わりなかった。というのも、カット編集後の動画では手動での同期がしづらいためである。なぞりの感覚など信号の時間的変化が少ないシーンでは、動画の動きに対して触覚データの位置が合わせにくい。対して、アタック感のある楽器や道具越しの感覚では、音や映像との対応が明らかであるため、動画の音声に対する同期が手動でも容易である。そのため、クラップを含む長尺の状態であらかじめ映像と合わせたのち、編集時に必要なシーンを触覚データも含めてリンクして同時にカットする。またこの場合、触覚に音声信号が含まれていなくても、ファイルの記録日時や動作を頼りに触覚データを合わせることができる。

さらに、同期の手間を改善することを目的として、ワイヤレスタイムコード同期システムを導入した。このシステムは収録に用いた Portacapture X8 や F2-BT が対応している物で、同期信号の発生器とワイヤレスでタイムコード (映像や音声を同期するためのフレームや時刻の情報) 同期を行える。wav ファイルのタグに記

録開始時刻が埋め込まれるため、編集ソフトウェアで読み込める。Premiere 上ではタイムコード同期には対応しているものの、音声のみの wav データでは複数のトラックに並べることができなかった (カメラに紐づいた音声のみ自動で並べられる) ため、Davinci Resolve 上でタイムコード同期を行ってから、Premiere プロジェクト形式に変換して Premiere 上で編集を行った。Davinci Resolve 上では任意のトラックにタイムコードを基にデータを並べることができるため、チャンネル配置が重要となる触覚データでは大いに役立った。

これらをまとめると、本稿執筆時点で最適と思われる連携フローは以下の通りである。

1. Davinci Resolve 上で収録した素材を全て読み込み、タイムコード情報により映像、音声、触覚データを同期したシーケンスを作成する。
2. 作成したプロジェクトファイルを変換して Premiere Pro に読み込み、映像素材が全て並んだシーケンスを設定する。
3. 映像担当：カット編集を行い、ピクチャーロックする。
4. 触覚担当：ピクチャーロックしたシーケンスをマルチチャンネルオーディオを設定したシーケンスにコピーする。
5. 触覚編集及び整音作業を行う。
6. (必要であれば) カラーグレーディング等映像側の変更点と触覚を含んだシーケンスをマージする。
7. 出力先に合わせてファイルを書き出す。

4.6. 考察

様々なコンテンツ収録を行うなかで、センサの種類によって適するシーンが異なることがわかった。手を用いたインタラクションやサイクルトレインなど、打撃が主である感覚は加速度センサが適していると考えられる。白杖にコンタクト

マイクと加速度センサを取り付けた際のデータを振動子で確認したところ、加速度センサのほうが納得感が高かったためである。手触り感のような繊細なテクスチャの収録においては、PVDF フィルムが適している。楽器の演奏など、振動として感じにくいが内観として存在する音の残響成分などはコンタクトマイクで収録してミキシングすることでコンテンツに対する納得感が向上する。収録時は演者にセンサを装着するが、収録の仕方によって感覚が大きく異なるため、事前に練習しておけるとクオリティの向上につながる。また、センサの固定方法についても議論の余地がある。例えば、皮膚振動の計測においては加速度センサを指に直接貼付するのが望ましいが、外れやすく装着が手間であるため、現場の運用上治具で脱着可能にしておくと収録がスムーズであった。なお、現状の触覚収録システムでは記録したデータを編集時に確認するが、収録がうまく行っていない場合があるため、リアルタイムに確認できるシステムの構築が求められる。

上記のようなセンサの特性がある一方、複数のセンサのデータを編集時に組み合わせる手法も有効であった。これにより打撃と持続したストロークの良い部分のみを取り出すことができた。実際の振動とその感じ方には差異があり、手触り感の収録においては EQ で帯域を強調する等大幅な調整が必要であった。

また、視触覚コンテンツの編集において、映像の視点に応じた触覚の調整が必要な場合があった。映像を飽きさせない工夫の一つとしてカット数を増やす事が挙げられ、今回の映像も引きや寄り、一人称視点を組み合わせて構成している。対して、触覚においては主体感が重要であるが、三人称視点の引きの画面では想起されにくく、頻繁なカット切り替えは感覚の追従を妨げる。そこで、引きの画面時には振動の強度を弱め、寄りの画面に切り替わった瞬間に強度を上げるようコンテンツをデザインした。こうすることで、引きから寄りへの変化をひとまとまりとしてシーンが次々と切り替わっていく場合でも、シームレスに追従可能であった。感覚共有を念頭に置きながら映像と触覚のトレードオフを探っていくことが重要である。

再生プロセスにおいては、体験のトレードオフを考慮して主に 2ch 把持型振動触覚提示デバイスを用いたが、大きく体験を損ねるようなコンテンツはなかった。動物とのふれあい等においては温感や圧覚提示などコンテンツの特徴に応じた手

法を検討したい。また、あらゆる展示において触覚技術に触れたことのない人に体験いただいたが、体験前にチュートリアルがあると、準備ができるのでより良い体感を得られる可能性がある。

計 8 種のコンテンツ収録について、スタジオにおける触覚収録、触覚効果のアフレコ、フィールドにおける触覚収録の 3 項目に分類し、それぞれにおいて提案手法の適用、実践を行えた。

第 5 章
Conclusion

本研究では、映像プロダクションと共同で視触覚コンテンツ制作を行うワークフローの構築を目的として、収録、編集、再生プロセスからなる触覚コンテンツ制作手法及び連携手法について提案し、様々なシーンに適用し実践した。

第一章では、感覚を共有することの意義や本研究を取り巻く社会的背景、現状の課題について述べ、触覚共有が社会的に求められていることを踏まえ、研究の目的を定めた。

第二章では、これまでの感覚共有技術について関連事例を挙げ、触覚共有の展開に必要な触覚技術について述べた。視覚や聴覚メディアの記録、再生技術は成熟してきており、触覚技術についても発展途上にあるが社会的に浸透し始めていると言え、ハプティックデザインという分野も確立に近づいているとわかった。その一方で、収録型の視触覚コンテンツに適するワークフローが確立していないということもわかった。研究室内での取り組みを飛び越えて、通信産業に触覚共有技術を含めるためには、この確立が必要不可欠である。

第三章では、FEEL TECH プロジェクトの概要とプロジェクトにおける本研究の役割、そして骨組みとなる一連のワークフローの提案を行った。制作手法の確立によってより多くの人に手軽な触覚共有を提供できると考えたためである。コンテンツ制作における触覚パートを収録、編集、再生の 3 段階に分け、既存のオーディオシステムを活用しながら触覚に適するワークフローを構築した。

第四章では、第三章で提案した一連のワークフローをもとに実践したコンテンツ制作について「スタジオにおける触覚収録」、「触覚効果のアフターレコーディング」、「フィールドにおける触覚収録」の 3 項目に分類して考察した。コンテンツによって適切な手法選択の判断が求められるが、プロセスとしては一貫してお

り筆者以外でも適用可能であると考えられる。

構築したワークフローを用いた視触覚コンテンツ制作の実践について述べた。合わせて 7 つのコンテンツを制作し、体験可能なシーンは 30 前後にも上った。これらのコンテンツの展示を日本を含めた 4 カ国で実施し、触覚研究者や一般の方、飼育員や政治関係者を含む数千人の多様な方々にご体験いただけた。これらが可能であったのは、今回のワークフローがあったからといえる。また本稿で紹介したプロジェクト以降もこのワークフローを用いた制作の取り組みも続いており、様々なシーンにおいて安定して制作を行えている。

提案手法を用いた触覚コンテンツ制作の有用性が示唆された一方で、触覚共有基盤の確立に向けては依然として様々な課題が山積している。本研究に関連したものでは、センサや編集手法の簡素化が次の課題であると認識している。現状では 3 種類のセンサを用いているが、装着や取り回しの容易さ、ミキシングのバランスなどセンサによって一長一短である。編集においては既存のシステムを活用できるとはいえ、調整方法が属人的でありまた暗黙知である部分が大きいことから、評価基準を確立したうえで、寄与度合いの高いプロセスを抽出することが求められるであろう。

今後の展望として、提案したワークフローの一般化やプラットフォームの開発が進めば、誰もが手軽に触覚共有可能になると考えられる。課題が存在する一方で、触覚のコンテンツとしての価値を期待できるような意見もいただけた。本研究を足がかりとして新たな触覚コンテンツクリエイターが登場し、触覚共有を含むコミュニケーション技術が大きく進展することを願ってやまない。

謝　　辞

本研究の指導教員であり、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (以下、KMD) の南澤孝太教授には、幅広いバックグラウンドから的確かつ熱心な研究指導と暖かい励ましや数多くのご指摘、貴重な機会を賜りました。楽しんで研究に取り組めたのは先生のおかげであり、多くのプロジェクトをスムーズにまとめあげてくださった先生の仕事に対する姿勢は密かな憧れです。御厚情に心から深謝の意を表します。

同研究科の砂原秀樹教授には、研究の論理について的確なご助言、ご指導をいただいたほか、励ましのお言葉をいただきました。同研究科の杉浦一徳教授には、研究指導や論文執筆などご助言賜りました。同研究科の堀江新特任助教には、メンターとして研究指導や論文執筆など数多くのご指導ご助言を賜り、最後まで根気強くお付き合いくださいました。自身の研究に関して気づきや新たな発見を得ることができました。同研究科の脇坂崇平特任助教には、研究指導や論文執筆だけでなく生活の相談まで乗ってくださいました。熱心にご指導くださいました皆様に、心より深く感謝申し上げます。

プロジェクトの推進剤となって、数多くの貴重な機会のみならず心温かいご助言や激励を賜りました株式会社 NTT ドコモ / 同研究科特任教授 石川博規氏に心より厚く御礼申し上げます。

第一期 FEEL TECH プロジェクトでは多くの方々にお世話になりました。株式会社 DALIFILMS 菅健太氏、稲村樹氏、シードルインタラクションデザイン株式会社 / KMD 研究員 神山洋一氏、KMD 鞠玉蘭氏、花光宣尚氏、株式会社アクローム 渡島健太氏、名古屋工業大学 田中由浩教授、北道広大氏、FCNT 株式会社 伴氏、山岸氏、劉氏、高見氏、井上氏、天野氏をはじめとするプロジェクトメンバーに心から感謝申し上げます。特に収録において菅氏、神山氏の経験や知見

なくしてはコンテンツの完成にはたどり着きませんでした。また、事前や本番と何度も収録に付き合ってくださった箏曲家であり KMD 同期の宇山氏、急な依頼にも関わらずコンテンツに快くご出演いただいた KMD 守本氏、松原氏にも改めて御礼申し上げます。皆様の尽力によりプロジェクトを滞りなく進めることができました。

触覚技術観光体験イベントプロジェクトにおいてお世話になりました、株式会社 JR 西日本コミュニケーションズ 秋友氏、垣内氏、福満氏、小川氏、株式会社三菱総合研究所の藤馬氏、藤本氏、NTT 研究所 駒﨑氏、渡邊氏をはじめとするプロジェクトメンバーに深謝申し上げます。

大学院の日常生活において支え合った同期や後輩たち、Embodied Media Project のスタッフ、先輩、OB を含む皆様に心から感謝いたします。長い学生生活の最後にとても充実した毎日を過ごすことができました。また、大学院進学を認め、生活を支えてくださった家族にも心より感謝申し上げます。

最後にこの場をお借りして、関わってくださったすべての方々に最大の感謝を重ねて申し上げます。おかげさまでこうして本稿を完成させる運びとなりました。本当にありがとうございました。

参 考 文 献

[1] 角康之, 河村竜幸. 体験メディアの構築に向けて: 体験の記録・利用の技術動向. 人工知能学会全国大会論文集, No. 0, pp. 260–260, 2006.

[2] Society 5.0 - 科学技術政策 - 内閣府. https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/. Accessed: 2024-07-29.

[3] 加藤樹子. 3gpp が掲げる 6g の最新ユースケース、「明確な傾向が見られた」と qualcomm — 日経クロステック（xtech）. https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/24/01133/. Accessed: 2024-07-29.

[4] Shunichi Kasahara and Jun Rekimoto. Jackin: integrating first-person view with out-of-body vision generation for human-human augmentation. In *Proceedings of the 5th augmented human international conference*, pp. 1–8, 2014.

[5] Henrik Møller. Fundamentals of binaural technology. *Applied acoustics*, Vol. 36, No. 3-4, pp. 171–218, 1992.

[6] 井上康之, 中郁己, 加藤史洋, 舘暲. 触原色原理に基づいた触覚提示システム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 86–94, 2020. doi:10.18974/tvrsj.25.1_86.

[7] Melika Emami, Amirhossein Bayat, Rahim Tafazolli, and Atta Quddus. A survey on haptics: Communication, sensing and feedback. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024.

[8] Yoshihiro Tanaka, Duy Phuong Nguyen, Tomohiro Fukuda, and Akihito Sano. Wearable skin vibration sensor using a pvdf film. In *2015 IEEE World*

Haptics Conference (WHC), pp. 146–151, 2015. doi:10.1109/WHC.2015.7177705.

[9] Sliman Bensmaia and Mark Hollins. Pacinian representation of fine surface texture. *Perception & psychophysics*, Vol. 67, pp. 842–54, 08 2005. doi:10.3758/BF03193537.

[10] Yoshimune Nonomura, Taku Miura, Takaaki Miyashita, Yuka Asao, Hirokazu Shirado, Yasutoshi Makino, and Takashi Maeno. How to identify water from thickener aqueous solutions by touch. *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 9, No. 71, pp. 1216–1223, 2012. URL: https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsif.2011.0577, arXiv:https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsif.2011.0577, doi:10.1098/rsif.2011.0577.

[11] Michael Wiertlewski, José Lozada, and Vincent Hayward. The spatial spectrum of tangential skin displacement can encode tactual texture. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 3, pp. 461–472, 2011. doi:10.1109/TRO.2011.2132830.

[12] 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*, VRIC '12, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery. URL: https://doi.org/10.1145/2331714.2331745, doi:10.1145/2331714.2331745.

[13] Mike Lambeta, Tingfan Wu, Ali Sengul, Victoria Rose Most, Nolan Black, Kevin Sawyer, Romeo Mercado, Haozhi Qi, Alexander Sohn, Byron Taylor, Norb Tydingco, Gregg Kammerer, Dave Stroud, Jake Khatha, Kurt Jenkins, Kyle Most, Neal Stein, Ricardo Chavira, Thomas Craven-Bartle, Eric Sanchez, Yitian Ding, Jitendra Malik, and Roberto Calandra. Dig-

itizing touch with an artificial multimodal fingertip, 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2411.02479, arXiv:2411.02479.

[14] 加藤史洋, 井上康之, 舘暲. テレイグジスタンスの研究 (第 98 報)-telesar vi ハンド指先のための力・加速度・温度センシングシステムの開発—. 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回テレイグジスタンス研究会研究報告 (ISSN 1343-0572), Vol. 25, pp. 11–14, 2020.

[15] Adilzhan Adilkhanov, Matteo Rubagotti, and Zhanat Kappassov. Haptic devices: Wearability-based taxonomy and literature review. *IEEE Access*, Vol. PP, pp. 1–1, 01 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3202986.

[16] 田島優輝, 加藤史洋, 井上康之, 舘暲. 力・振動・温度を触原色とする触感提示デバイスにおける触感再現手法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 125–135, 2019.

[17] 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. Chicago, IL, 1994.

[18] Jun Murayama, Laroussi Bougrila, YanLin Luo, Katsuhito Akahane, Shoichi Hasegawa, Béat Hirsbrunner, and Makoto Sato. Spidar g&g: a two-handed haptic interface for bimanual vr interaction. In *Proceedings of EuroHaptics*, Vol. 2004, pp. 138–146, 2004.

[19] Yasutoshi Makino, Yoshikazu Furuyama, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptoclone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1980–1990, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: https://doi.org/10.1145/2858036.2858481, doi:10.1145/2858036.2858481.

[20] 「リアルな触覚再現技術」で触覚を「共有」へ 触覚を... — プレスリリース・研究成果 — 東北大学 -tohoku university-. https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2024/03/press20240308-04-MEMS.html. Accessed: 2025-02-03.

[21] 早川裕彦, 神山洋一, 松園敏志, 徐萌芸, 田中培仁, 本山拓人, 鈴木規之, 南澤孝太. 触覚伝送を伴うバスケットボールのライブフィーリングの実践. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 第 23 巻, p. 34E–6, 2018.

[22] Tadatoshi Kurogi, Masano Nakayama, Katsunari Sato, Sho Kamuro, Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Haptic transmission system to recognize differences in surface textures of objects for telexistence. In *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 137–138. IEEE, 2013.

[23] Satoshi Matsuzono, Haruki Nakamura, Daiya Kato, Roshan Peiris, and Kouta Minamizawa. Hapti/o: physical i/o node over the internet. In *Haptics: Science, Technology, and Applications: 11th International Conference, EuroHaptics 2018, Pisa, Italy, June 13-16, 2018, Proceedings, Part II 11*, pp. 193–203. Springer, 2018.

[24] 早川裕彦, 大脇理智, 石川琢也, 南澤孝太, 田中由浩, 駒﨑掲, 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.

[25] 駒﨑掲, 渡邊淳司. 触覚伝送による “リモートハイタッチ”: アスリートの家族間コミュニケーションや聴覚障がい者との観戦検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 27, No. 1, pp. 2–5, 2022.

[26] Masahiro Furukawa, Hiroyuki Kajimoto, and Susumu Tachi. Kusuguri: a shared tactile interface for bidirectional tickling. In *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, AH '12, New York, NY, USA,

2012. Association for Computing Machinery. URL: https://doi.org/10.1145/2160125.2160134, doi:10.1145/2160125.2160134.

[27] Haruki Nakamura, Daiya Kato, Roshan Peiris, Kouta Minamizawa, Yutaka Kamamoto, and Junji Watanabe. Construction of haptic experience sharing platform. In *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*, UbiComp '18, p. 174–177, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery. URL: https://doi.org/10.1145/3267305.3267600, doi:10.1145/3267305.3267600.

[28] Mario J Enriquez and Karon E MacLean. The hapticon editor: a tool in support of haptic communication research. In *11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings.*, pp. 356–362. IEEE, 2003.

[29] Shaoyu Cai, Lu Zhao, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yue Liu, and Kening Zhu. Gan-based image-to-friction generation for tactile simulation of fabric material. *Comput. Graph.*, Vol. 102, No. C, p. 460–473, February 2022. URL: https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.09.007, doi:10.1016/j.cag.2021.09.007.

[30] Kosuke Yamaguchi, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro. Sensory equivalence conversion of high-frequency vibrotactile signals using intensity segment modulation method for enhancing audiovisual experience. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 674–679, July 2021. doi:10.1109/WHC49131.2021.9517147.

[31] 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*, SIGGRAPH '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Comput-

ing Machinery. URL: https://doi.org/10.1145/2929490.2932629, doi:10.1145/2929490.2932629.

[32] Nobuhisa Hanamitsu, Haruki Nakamura, Masashi Nakatani, and Kouta Minamizawa. Twech: a mobile platform to search and share visuo-tactile experiences. In *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*, pp. 1–3. 2015.

[33] 柴崎美奈, 神山洋一, 小幡光一, 若元友輔, 岸啓補, 長谷川隆行, 土屋新九郎, 松田壮一郎, 南澤孝太. 絵本の読み聞かせにおける触覚提示による興味喚起. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 28, No. 4, pp. 349–359, 2023. doi:10.18974/tvrsj.28.4_349.

[34] Haptic design. https://hapticdesign.org/. Accessed: 2024-07-23.

[35] Junpoco. ［cedec 2023］サウンドチームがコントローラの振動要素を制作するメリットとは？　音と振動の関係を知ることで，振動を活用した新たなゲーム体験を生み出せる. https://www.4gamer.net/games/999/G999905/20230829052/. Accessed: 2024-07-28.

[36] じーくどらむす. ゲームの振動は誰が、どのように作るべきか？――『forspoken』開発者やサウンドディレクターら 4 名が“現代の触覚デザイン”を徹底討論【sig-audio 2024 vol.03 レポート】｜ゲームメーカーズ. https://gamemakers.jp/article/2024_06_06_68711/. Accessed: 2024-07-28.

[37] 仕事を読み解くキーワード：同じ建物で開発するメリット｜採用情報｜任天堂. https://www.nintendo.co.jp/jobs/keyword/29.html. Accessed: 2025-02-03.

[38] 映像制作の工程/流れ — 映像制作会社デキサ（東京）. https://www.dxa.co.jp/flow/. Accessed: 2024-07-23.

[39] 映像制作の流れとは？ 各工程のポイントから担当者まで徹底解説｜記事｜mx テレビ映像学院｜ tokyo mx. https://s.mxtv.jp/mxeizogakuin/article/

2022122601/, 2022. Accessed: 2024-07-23.

[40] Yitian Shao, Vincent Hayward, and Yon Visell. Spatial patterns of cutaneous vibration during whole-hand haptic interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 113, No. 15, pp. 4188–4193, 2016. URL: https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1520866113, arXiv:https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1520866113, doi:10.1073/pnas.1520866113.

関 連 発 表

国際学会

1. Harunobu Taguchi, Yulan Ju, Youichi Kamiyama, Kouta Kitamichi, Kenta Kan, Kenta Watashima, Hironori Ishikawa, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, “A Personalized Haptic Sharing Platform over the Internet”, World Haptics Conference 2023 Work in Progress, July 2023

2. Harunobu Taguchi, Youichi Kamiyama, Kenta Kan, Yulan Ju, Arata Horie, Yoshihiro Tanaka, Hironori Ishikawa, Kouta Minamizawa, “Multichannel Haptic Communication Platform with Wearable Sensing and Display”, SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies, Australia, November 2023

国内学会

1. 田口 晴信、鞠 玉蘭、神山 洋一、菅 健太、堀江 新、田中 由浩、石川 博規、南澤 孝太、「ウェアラブルな多チャンネル触覚計測・提示による触覚共有基盤」、第 28 回バーチャルリアリティ学会大会、2023 年 9 月

展示・メディア

1. docomo Open House’23
   会期：2023 年 2 月 2 日〜3 日
   開催場所：東京都港区 赤坂インターシティコンファレンス

2. MWC Barcelona 2023
   会期：2023 年 02 月 27 日〜03 月 02 日
   開催場所：Fira de Barcelona (Gran Via), Spain

3. World Haptics Conference 2023 Hands-on Demo
   展示日：2023 年 7 月 13 日
   開催場所：Delft University of Technology, the Netherlands

4. 第 28 回バーチャルリアリティ学会大会
   展示日：2023 年 9 月 14 日
   開催場所：東京都八王子市 東京たま未来メッセ

5. LOST ANIMAL PLANET XR 絶滅動物園 presented by NTT ドコモ
   会期：2023 年 10 月 14 日〜15 日
   開催場所：東京都墨田区 東京ソラマチ 4F スカイアリーナ

6. SIGGRAPH Asia 2023
   展示日：2023 年 12 月 13 日〜15 日
   開催場所：ICC Sydney, Australia

7. 触覚技術観光体験イベント
   会期：2024 年 3 月 30 日〜3 月 31 日
   開催場所：大阪府大阪市 JR 大阪駅 (うめきたエリア)

8. NHK E テレ「ザ・バックヤード 知の迷宮の裏側探訪」(2023 年 10 月 11 日放映)

9. TBS「東大王」（2023 年 11 月 22 日放映）

特許

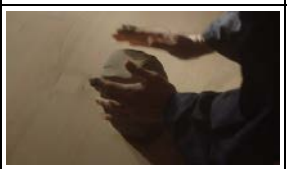
1. 特願 2023-209439、「脱着可能な触覚インターフェース」、石川博規、南澤孝太、堀江新、神山洋一、田口晴信

付　　録

A. FEEL TECH コンテンツ詳細

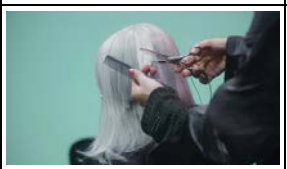
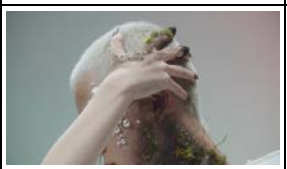
docomo Open House'23 及び MWC Barcelona 2023 において展示した 3 パターンのコンテンツについて、シーン説明や触覚収録手法などの詳細をカットごとに記す。開始〜終了時間については、分: 秒: フレーム数 (mm:ss:ff) の形式で表す。撮影時の都合上、フレームレートは Open House 版では 24 fps 、MWC 版では 23.976 fps となっている。

docomo Open House 版コンテンツ詳細

No.	開始～終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
1	00:00:00 ～ 00:02:15		陶芸家が川辺を歩いている	なし
2	00:02:15 ～ 00:04:17		石を石で叩く	地面に置かれた石の裏に加速度センサを貼付
3	00:04:18 ～ 00:05:21		陶芸家工房が乳鉢で土と水を混ぜる（引き）	乳鉢にコンタクトマイクを固定
4	00:05:22 ～ 00:08:15		陶芸家工房が乳鉢で土と水を混ぜる（寄り）	同上
5	00:08:16 ～ 00:12:06		陶芸家が粘土を叩いたりこねたりする	机や指にコンタクトマイクを固定し、指に固定した加速度センサと合わせて編集時にミックス
6	00:12:07 ～ 00:15:04		陶芸家がろくろの上で粘土を器状に形作る	指に加速度センサを装着し、コンタクトマイクで粘土を押さえて離すときのペタペタ感等を収録し、編集時にミックス
7	00:15:05 ～ 00:17:11		陶芸家が完成した器を触る	指にコンタクトマイクと加速度センサを装着し、マイクで収録音した音も合わせて編集時にミックス

No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
8	00:17:12 ～ 00:22:01		茶碗にお湯を注ぐ	柄杓にコンタクトマイクを固定し、マイクで収録音した音も合わせて編集時にミックス
9	00:22:02 ～ 00:28:00		茶筅でお茶を点てる	茶筅にコンタクトマイクを固定
10	00:28:01 ～ 00:33:09		箏の演奏（寄り）	演奏でよく使う左手中指、右手親指・人差し指・中指に加速度センサやコンタクトマイク、PVDF フィルムを取り付け、弦を弾いたりなぞったりする際の振動を収録。右手・左手それぞれの収録振動をミックスして編集
11	00:39:10 ～ 00:42:07		箏の演奏（引き）→暗転	
12	00:42:07 ～ 00:46:08		(暗転から)スーツの男性が上着を脱ぎ、冷蔵庫まで向かう	収録ではなく、床を靴で歩く既存の効果音を左右に割り振ってミックス
13	00:42:08 ～ 00:48:02		瓶ビールを栓抜きで開ける	瓶や栓抜きにコンタクトマイクを固定し編集時にミックス
14	00:48:03 ～ 00:52:19		ジョッキにビールを注ぐ	ジョッキにコンタクトマイクを固定し収録振動と、収録音を編集時にミックス
15	00:52:20 ～ 00:57:23		男性がビールを飲む	加速度センサを喉に固定し、ビールを飲む際の喉越しの振動を収録

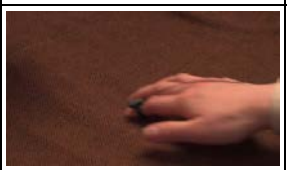
No.	開始〜終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
16	00:58:00 〜 00:59:16		リモコンでテレビを点ける (トランジション)	なし
17	00:59:17 〜 01:00:23		女性がパソコンの通販サイトで服の触り心地を感じている	なし
18	01:01:00 〜 01:02:23		着物をなでる	加速度センサを指に装着（編集時に布を直接センサでなぞった触覚データと合わせてミックス）
19	01:03:00 〜 01:05:01		服(Supreme)をなでる	同上
20	01:05:02 〜 01:07:04		服(迷彩)をなでる	同上
21	01:07:05 〜 01:11:08		服(コーデュロイ)をなでる	加速度センサを指に装着
22	01:11:09 〜 01:15:23		女性が服を着て手触りを確かめる	同上
23	01:16:00 〜 01:19:06		女性が服の手触りを確かめる（寄り）	同上

No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
24	01:19:07 ～ 01:21:06		ラケットでシャトルを打つ（引き）	ラケットにコンタクトマイクを埋め込み
25	01:21:07 ～ 01:23:22		ラケットでシャトルを打つ（寄り）	同上
26	01:23:23 ～ 01:25:15		スマッシュを決める →(チルトダウンするトランジション)	同上
27	01:25:15 ～ 01:28:05		(チルトダウンから)美容師がカメラに向かってハサミを動かす	コンタクトマイクと加速度センサでハサミの振動を収録したが、最終版コンテンツでは不使用
28	01:28:06 ～ 01:30:20		髪（ウィッグ）をすきバサミでカットする	ハサミにコンタクトマイクと加速度センサを貼付。
29	01:30:21 ～ 01:36:16		バリカンで髪を剃る	バリカンにコンタクトマイクを貼付。
30	01:36:17 ～ 01:49:06		女性が特殊メイクをつけて頭から肩を通って腕まで撫でる	「想像上の触覚」を演出するため、加速度センサを指につけているが、別の効果音や振動データを当て込み編集
31	01:49:07 ～ 01:57:11		女性が腕を 3 回軽く叩き、胸まで手を持っていく	同上

No.	開始〜 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
32	01:57:12 〜 02:01:18		心拍を感じる	同上
33	02:01:19 〜 02:04:17		docomo ロゴ（ending）	なし

MWC 版コンテンツ A 詳細

No.	開始～終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
1	00:00:00 ～ 00:07:18		(暗転から) 富士山と桜の映像による導入 (箏の音が流れ始める)	なし
2	00:07:19 ～ 00:11:19		(暗転から襖が開き)箏の演奏（引き）	演奏でよく使う左手中指、右手親指・人差し指・中指に加速度センサやコンタクトマイク、PVDF フィルムを取り付け、弦を弾いたりなぞったりする際の振動を収録。右手・左手それぞれの収録振動をミックスして編集
3	00:11:20 ～ 00:23:23		箏の演奏（寄り）	
4	00:24:00 ～ 00:28:12		茶碗にお湯を注ぐ	柄杓にコンタクトマイクを固定し、マイクで収録した音も合わせて編集時にミックス
5	00:28:13 ～ 00:33:03		茶筅でお茶を点てる	茶筅にコンタクトマイクを固定
6	00:33:04 ～ 00:34:20		男性がリモコンでテレビを点ける → (トランジション)	なし
7	00:34:21 ～ 00:36:03		女性がパソコンの通販サイトで服の触り心地を感じている	なし

No.	開始〜終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
8	00:36:04 〜 00:38:03		着物をなでる	加速度センサを指に装着（編集時に布を直接センサでなぞった触覚データと合わせてミックス）
9	00:38:04 〜 00:40:05		服(Supreme)をなでる	同上
10	00:40:06 〜 00:42:08		服(迷彩)をなでる	同上
11	00:42:09 〜 00:44:15		服(コーデュロイ)をなでる	加速度センサを指に装着
12	00:44:16 〜 00:46:15		ラケットでシャトルを打つ（引き）	ラケットにコンタクトマイクを埋め込み
13	00:46:16 〜 00:49:07		ラケットでシャトルを打つ（寄り）	同上
14	00:49:08 〜 00:49:22		スマッシュを決める →(チルトダウンするトランジション)	同上
15	00:49:23 〜 00:53:17		(手元からズームアウトして)白杖ダンサーが体験を紹介する	なし

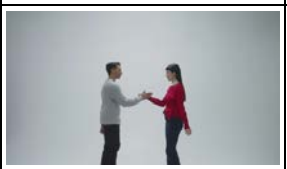
No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
16	00:53:18 ～ 01:10:22		(白杖ダンサーが説明しながら)地面や段差を白杖で滑らせたり叩いたりする	白杖にコンタクトマイクと加速度センサを貼付。
17	01:10:23 ～ 01:20:11		(白杖ダンサーが説明しながら)白杖を使って階段を上る	同上
18	01:20:12 ～ 01:26:03		白杖ダンサーがブレイクダンスをする（引き）	ダンサーの立つステージの振動をコンタクトマイク(ステレオ)で収録
19	01:26:04 ～ 01:35:06		白杖ダンサーがブレイクダンスをする（回り込み・寄り）	同上
20	01:35:07 ～ 01:37:10		お母さんが赤ちゃんを触る	指に装着した加速度センサで収録していたが使用せず、編集時に服をなでた触感データや心拍の効果音を当て込み。
21	01:37:11 ～ 01:39:16		医者が遠隔から診察する	同上
22	01:39:17 ～ 01:42:16		遠隔診察の様子（左右分割）	同上
23	01:42:17 ～ 01:46:17		赤ちゃんの胸を触り鼓動を感じる	同上

No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
24	01:46:18 ～ 01:49:16		遠隔診察の様子（同じ場所で診察しているイメージ）	同上
25	01:49:17 ～ 01:57:06		男女 2 人がハンドシェイクをする（引き）	右手の人差指に加速度センサを取り付け、ハイタッチや背中をなでたときの振動を収録
26	01:57:07 ～ 02:05:19		男女 2 人がハンドシェイクをする（寄り）	同上
27	02:05:20 ～ 02:08:04		docomo ロゴ (ending)	なし

MWC 版コンテンツ B 詳細

No.	開始～終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
1	00:00:00 ～ 00:02:15		陶芸家が川辺を歩いている	なし
2	00:02:16 ～ 00:04:17		石を石で叩く	地面に置かれた石の裏に加速度センサを貼付
3	00:04:18 ～ 00:05:21		陶芸家工房が乳鉢で土と水を混ぜる（引き）	乳鉢に固定したコンタクトマイクで、乳棒が土や乳鉢の壁に当たる振動を収録
4	00:05:22 ～ 00:08:15		陶芸家工房が乳鉢で土と水を混ぜる（寄り）	同上
5	00:08:16 ～ 00:12:06		陶芸家が粘土を叩いたりこねたりする	机や指に固定したコンタクトマイクや指に固定した加速度センサなどで叩く際の振動を収録
6	00:12:07 ～ 00:15:04		陶芸家がろくろの上で粘土を器状に形作る	指に装着した加速度センサやコンタクトマイクで粘土を押さえて離すときのペタペタ感等を収録
7	00:15:05 ～ 00:17:11		陶芸家が完成した器を触る	コンタクトマイクや加速度センサから陶器の手触りを収録(コンテンツでは音声から生成した)

No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
8	00:17:12 ～ 00:22:00		茶碗にお湯を注ぐ	柄杓にコンタクトマイクを固定し、お湯が流れる際の振動や音を収録
9	00:22:01 ～ 00:25:04		茶筅でお茶を点てる	茶筅にコンタクトマイクを固定し、茶筅がお湯を切ったりお椀に当たったりする際の振動を収録
10	00:25:05 ～ 00:27:17		革素材をなでる（牛革）	加速度センサと PVDF センサを指に装着　（編集時に革を直接センサでなぞった触覚データと合わせてミックス）
11	00:27:18 ～ 00:30:10		同上（ワニ革）	同上
12	00:30:11 ～ 00:32:19		同上（柔らかい牛革）	同上
13	00:32:20 ～ 00:34:16		同上（ベルベット素材）	同上
14	00:34:17 ～ 00:40:19		ハンドパンの演奏（引き）	右手親指・薬指、左手親指・人差し指に加速度センサ・PVDF フィルムを装着(センサのついていない指の振動やうまく録られていなかった部分は編集時に当て込み)
15	00:40:20 ～ 00:54:09		ハンドパンの演奏（寄り）	

No.	開始～ 終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
16	00:54:10 ～ 00:58:02		(手元からズームアウトして)白杖ダンサーが体験を紹介する	なし
17	00:58:03 ～ 01:15:07		(白杖ダンサーが説明しながら)地面や段差を白杖で滑らせたり叩いたりする	白杖にコンタクトマイクと加速度センサを貼付。
18	01:15:08 ～ 01:24:20		(白杖ダンサーが説明しながら)白杖を使って階段を上る	同上
19	01:24:21 ～ 01:28:01		白杖スケートボーダー（引き）	なし
20	01:28:02 ～ 01:31:10		白杖スケートボーダー（寄り）	スケートボードの裏側に加速度センサを取り付け、走行等のボードに伝わる振動を収録
21	01:31:11 ～ 01:36:23		白杖スケートボーダー（一人称視点）	白杖にコンタクトマイクとレコーダーを取り付け
22	01:37:00 ～ 01:41:17		白杖スケートボーダー（トリック）	同上。加えて、段差のある床にもコンタクトマイクを取り付けてボードが段に乗って滑ったときの振動を収録
23	01:41:18 ～ 01:47:06		男女２人がハンドシェイクをする（引き）	右手の人差指に加速度センサを取り付け、ハイタッチや背中をなでたときの振動を収録

No.	開始〜終了時間 (mm:ss:ff)	サムネイル	シーン説明	触覚収録方法
24	01:47:07 〜 01:55:19		男女２人がハンドシェイクをする（寄り）	同上
25	01:55:20 〜 01:57:23		お母さんが赤ちゃんを触る	指に装着した加速度センサで収録していたが使用せず、編集時に服をなでた触感データや心拍の効果音を当て込み。
26	01:58:00 〜 02:00:05		医者が遠隔から診察する	同上
27	02:00:06 〜 02:03:05		遠隔診察の様子（左右分割）	同上
28	02:03:06 〜 02:07:07		赤ちゃんの胸を触り鼓動を感じる	同上
29	02:07:08 〜 02:10:01		遠隔診察の様子（同じ場所で診察しているイメージ）	同上
30	02:10:02 〜 02:12:09		docomo ロゴ (ending)	なし