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

Title	身体的な体験の共有に向けた触覚情報の符号化と伝送システムの開発
Sub Title	Haptic encoding and transmission system for sharing tactile experiences over the internet
Author	中村, 開(Nakamura, Haruki) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kouta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2018
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2018年度メディアデザイン学 第695号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002018-0695

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

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

修士論文 2018年度

身体的な体験の共有に向けた
触覚情報の符号化と伝送システムの開発

慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

中村 開

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。

中村 開

研究指導コミッティ：

南澤 孝太 准教授　(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 准教授　(主査)
加藤 朗 教授　(副査)
石戸 奈々子 教授　(副査)

修士論文 2018 年度

身体的な体験の共有に向けた
触覚情報の符号化と伝送システムの開発

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

インターネットの発展と触覚技術の普及によって触覚情報が映像や音声のように幅広い分野において一般に利用されるようになってきている．このような触覚情報を映像・音声と組み合わせたマルチメディアを触感コンテンツと定義し，この伝送によって日常に起こる触感を伴うような身体的な体験の共有の実現を目指す．本論文では触感コンテンツのフォーマットの提案と実社会における既存のネットワークインフラやハードウェアといった制限によるユースケースから最大 4ch の振動触覚を含む触感コンテンツについてフォーカスした．触感コンテンツの記録・伝送を可能とする触感共有プラットフォームの設計を行い，振動触覚の記録・再生を行う入出力ノードや触感コンテンツの伝送・蓄積と関連情報を登録するネットワークシステム，スマートフォンを用いた触感コンテンツの記録用デバイスを開発した．これらによって触感コンテンツを記録し，アップロードやダウンロードを行うことで身体的な体験をインターネット上で共有できる．触感コンテンツと触感共有プラットフォームの実装と検証を行い，デモンストレーションを通してその実現性や有効性を示した．

キーワード：

触覚，MPEG-4，MP4，触感コンテンツ，触感データベース，身体性メディア

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

中村 開

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2018

Haptic Encoding and Transmission System for Sharing Tactile Experiences over the Internet

Category: Science / Engineering

Summary

Along with the development of the internet and the emergence of haptics technology, haptic information has become commonly used in a wide range of fields. We defined "haptic contents" that combines such haptic information with video and audio information, and aims to enable sharing of daily tactile experiences over the internet. In this study, we proposed to use the mp4 file format to embody our haptic contents. Based on the current limitation of network infrastructure and hardware, we designed a use case that used 4 vibrotactile channels to create a haptic contents and developed a haptic sharing platform that enables recording and transmission of this haptic contents. This platform consists of nodes that take both vibrotactile input and output, and a network system which includes database and storage. Furthermore, we built a smartphone application that enables both uploadings and downloading of haptic contents over the internet, hence, realizing the tactile aspect of this sharing experience. In this paper, we implemented the system and verified the haptic contents. We also clarified its feasibility and effectiveness through some user tests and demonstrations.

Keywords:

Haptics, MPEG-4, MP4, Haptic Contents, Haptic Database, Embodied Media

Keio University Graduate School of Media Design

Haruki Nakamura

目　　次

第 1 章　Introduction **1**
1.1. インターネットとメディアの変容 1
1.2. 触覚技術の発展と触覚伝送 2
1.3. 研究の目的 2
1.4. 本論文の構成 3

第 2 章　Literature Review **4**
2.1. 触覚と触感の定義 4
2.2. 触覚技術 5
2.2.1　ヒトの触覚の受容器 5
2.2.2　計測と再現 5
2.3. 触覚とメディア 8
2.3.1　実社会における触覚技術の応用 8
2.3.2　触覚データの収集と解析 9
2.3.3　インターネットを用いた触覚の伝送 10
2.4. 高臨場マルチメディア 11
2.5. メディアデータの伝送と圧縮 13
2.5.1　MP4 ファイルフォーマット 13
2.5.2　オーディオ圧縮技術 15
2.6. 本章のまとめ 18

第 3 章　Concept Design **19**
3.1. コンセプト 19
3.2. ユースケース 21

3.3. 触感コンテンツのデータフォーマットの提案 22
3.3.1 MPEG-4 に準拠した触感コンテンツ 22
3.3.2 m4t（MPEG-4 Touch）の構想 23
3.3.3 振動触覚データの圧縮 24
3.4. 触感共有プラットフォームの設計要件 25
3.4.1 ハードウェアの設計要件 26
3.4.2 ネットワークシステムの設計要件 26
3.5. 本章のまとめ 27

第 4 章 Implementation & Verification 28
4.1. 構築するシステムの目的 28
4.2. 触覚入出力ノード 29
4.2.1 触覚入出力ノードの構成 29
4.3. ネットワークシステム 31
4.3.1 ネットワークシステムの構成 31
4.3.2 データベースの設計 32
4.4. モバイル端末を用いた記録用アプリケーション 34
4.4.1 ハードウェアの構成 34
4.4.2 ソフトウェアの実装 36
4.5. 遅延知覚の評価実験 37
4.5.1 実験目的 37
4.5.2 実験方法 37
4.5.3 実験結果 38
4.5.4 振動触覚の同期 41
4.6. 記録システムの遅延評価実験 42
4.6.1 実験目的 42
4.6.2 実験方法 42
4.6.3 実験結果 43
4.7. 触感コンテンツの作成と圧縮の検証 45
4.7.1 OSS を用いた触感コンテンツの作成と圧縮 45

4.7.2 考察 47
4.8. 本章のまとめ 47

第 5 章 Validation **49**
5.1. HapticTV 49
5.1.1 HapticTV の構成 49
5.1.2 HapticTV のデモ 52
5.2. 触感データベース 53
5.2.1 システムを用いた触感コンテンツの蓄積 53
5.3. デモンストレーションと対外発表 57
5.4. 考察 60
5.5. 本章のまとめ 60

第 6 章 Conclusion **62**

謝辞 **65**

参考文献 **67**

関連発表 **71**
国際会議 71
国内学会 71

図　目　次

2.1　皮下組織の触覚受容器 6
2.2　触覚受容器の振動検出閾値 6
2.3　PVDF センサ 7
2.4　TECHTILE toolkit 7
2.5　Nintendo Switch 8
2.6　Synesthesia Suit 8
2.7　Twech 10
2.8　Texplorer 10
2.9　HaptoClone 11
2.10　Model H 11
2.11　イマーシブテレプレゼンス技術 Kirari! 12
2.12　次世代型ライブビューイング B.LIVE in TOKYO 12
2.13　MP4 におけるボックス構造 14
2.14　基本的な MP4 のファイル構造 15

3.1　触感共有プラットフォームのコンセプト 20
3.2　触感コンテンツの例 20
3.3　触感共有プラットフォームの応用 21
3.4　MPEG-4 に準拠した触感コンテンツの構成 23
3.5　m4t（MPEG-4 Touch）の構造 24
3.6　触感共有プラットフォームの構成 25

4.1　触覚入出力ノード 30
4.2　触覚入出力ノードの接続図 31

4.3 ネットワークシステムの構成 32
4.4 触感情報の構造 33
4.5 触感記録用デバイス 35
4.6 カメラアプリの画面 35
4.7 デバイスを用いた触感コンテンツの記録例 37
4.8 遅延知覚実験における実験環境 38
4.9 遅延知覚実験における MOS 評価平均値 39
4.10 記録された音声と振動触覚 44
4.11 記録時の遅延計測結果（N=50） 44
4.12 触感コンテンツの記録の様子（“ごつごつしたマテリアル”） . 46
4.13 触感コンテンツのファイル構造 46
4.14 圧縮前後の信号の FFT 解析結果 47

5.1 HapticTV のシステム構成 50
5.2 コンテンツのサムネイル画像 51
5.3 HapticTV のデモンストレーション 53
5.4 裏地・芯地類標本 54
5.5 振動触覚の信号波形とスペクトログラム（ベンヒット） 55
5.6 振動触覚の信号波形とスペクトログラム（麻芯） 56
5.7 デモ展示：KMDForum2018 59
5.8 デモ展示・ポスター発表：SICE SI2018 59

表　目　次

4.1　触感情報における各要素の内容と記入方式 33
4.2　触感コンテンツにおける映像・音声と振動触覚の遅延知覚の評価尺度 38
4.3　触感コンテンツにおける映像・音声と振動触覚の遅延知覚の評価 40

第 1 章
Introduction

1.1. インターネットとメディアの変容

1960 年代にインターネットが誕生して以来，大きく発展し続け，場所や時間という制限を超えて人と人，人とモノとをつなぐ重要なインフラとなっている．インターネットが爆発的に普及したきっかけの 1 つとして 1991 年にティム・バーナーズ・リーが開発した WWW(World Wide Web) [1] がある．登場初期より電子メールなどの文字ベースのコミュニケーションに用いられてきたインターネットだったが WWW の登場によってウェブページという概念が生まれ，インターネットに画像，音声，動画といった多くのメディアが内包されていった．

今日ではスマートフォンや PC といった端末の普及や通信インフラの低コスト化によってインターネット上において日常的に膨大なメディアが世界中の人々間でリアルタイムに拡散，共有されるようになり，今後は 5G を始めとした高速通信ネットワークの実現によってより大きなデータを低遅延で送受信できることから，将来的にネットワーク上で共有されるメディアデータは今以上に多重化，肥大化することが示唆されている．実際に放送網では 4K，8K といった高解像度映像の伝送や多チャンネルオーディオを用いた高臨場コンテンツの配信といった試みが行われている．最近ではこれに VR や AR の技術が取り入れられ，VR 空間上のアバターとシンクロしてオンライン上の他者とコミュニケーションを取る，遠隔地にあるロボットを自分の身体のように自在にコントロールするといった応用がなされており，ネットワークによって人の身体が様々なモノに接続されることで，その能力や身体認知の範囲は現実世界では表せないほどの広がりを持ちつつある．

メディア論を提唱したマクルーハン [2] は晩年“メディアはマッサージである”と唱えた．まさにその言葉どおり，インターネット技術の躍進によって人の五感を直接刺激するような高度に複雑・多重化されたメディアが生み出され続けていくことだろう．

1.2. 触覚技術の発展と触覚伝送

人が対象に触れることで生み出される感覚である「触覚」は人の身体認知や実在感に大きく関わる要素として注目され，その計測と提示の技術が数多く生み出されてきた．従来，高価かつ大規模であった触覚の計測や提示を行うシステムは技術の発展によってより簡易さや利便性を持つようになった．これによって現在では AR や VR といったエンターテイメント分野においては没入感や臨場感の提示に用いられ，プロダクトにはクリック感を提示するシステムが標準で組み込まれるようになった．また，映像や音声に加えて触覚情報をインターネット上で伝送し提示することで，遠隔地のモノや人とのインタラクションを実現させるシステムの研究や社会実装が行われており，触覚情報を用いることで人が身体を能動的に動かすことによって得られる身体的な体験そのものを記録・再現できることが示唆されている．このように触覚技術が一般化しつつある一方で，既存のインフラ上で触覚情報を伝送・共有するための基盤はまだ実現しておらず，すべてのアプリケーションにおいて独自な規格や方法によって実装されている．触覚情報が現在の音声や映像といったメディアのように一般ユーザが日常的に利用するためにはその伝送と共有を行う共通基盤が必須であると考えられる．

1.3. 研究の目的

本研究では，人の身体的な体験を既存のネットワークインフラ上で伝送・共有を行うための共通基盤の確立を目指し，映像・音声に触覚が加わったマルチメディアの提案とそれらを共有する触感共有プラットフォームの開発を行う．従来の視聴覚に基づく情報に主観性を強く持つ触覚情報が加わることで，そのコンテンツ

に高い臨場感を持たせ，他者と共有することで体験そのものをインターネット越しに追体験できるようになると考えられる．また，蓄積されるデータから抽出される特徴から触覚情報に基づいた検索システムやデザインといった応用に役立てることもできる．

そこで本論文では，映像・音声・触覚情報から構成されるマルチメディアの符号化とそれらを共有するためのプラットフォームの構築を目的とし，その効果と有効性の検証を行う．

1.4. 本論文の構成

第 1 章では，インターネットの発展による人を取り巻くメディアの変容について紹介し，触覚技術の普及による従来メディアとの融合の可能性について考察し，本研究の目的を定めた．第 2 章では，触覚の計測・提示の技術を紹介し，それらの発展による社会への普及やインターネットを利用したそれらの応用，既存のメディアの伝送や圧縮について述べ，本研究のフォーカスポイントや貢献を示す．第 3 章では，本論文で提案するコンセプトやその応用，構築するシステムの設計について述べる．第 4 章では，前章にて設計に基づいて伝送システムの実装を行い，システムの動作やメディデータのフォーマットについて検証を行った．続いて第 5 章にてデモ展示によって得られたフィードバックと記録されたデータの検証から構築したシステムやデータフォーマットの効果や有効性を示し，最後に本論文の結論を示す．

第 2 章
Literature Review

本章では，触覚の計測と再現技術について述べた後，それらを用いた触覚の利用例や多重化されたマルチメディアによる高臨場感通信，それらに用いられているメディアのデータフォーマットや圧縮法について取り上げる．

2.1. 触覚と触感の定義

本論文において「触覚」と「触感」の２つの言葉を用いる．人の触覚は外部環境との接触や姿勢の変化によって起こる皮膚変形を検出し知覚される感覚である．一方で，人がモノを触ったことによって得られる感覚は触覚だけにとどまらない．例えば，飲み物の入っているマグカップを手に取る時，そのマグカップから湯気が出ていれば，人はそれを触る前に対象が熱いことを理解しやけどに気をつけてから手に取ることだろう．これは，視覚と触覚が結びつき，自身の持つもっともらしい経験（記憶）に強く紐付けられているからである．Spence ら [3] によれば，視覚・聴覚は触覚と対応付けられ相互に知覚へ影響を与えるとされており，実際にこのクロスモーダルを利用した研究 [4] [5] も行われている．このように，人の行動や体験は多くの感覚から得られる複合情報によって成り立っているためそのものを触ったことによって得られる感覚は必ずしも触覚の情報に限らないことがわかる．仲谷ら [6] はこの複合情報によってもたらされる心的なイメージを「触感」と定義し，接触時に皮膚感覚によって知覚される「触覚」と区別している．これらから，本論文における「触覚」は人の触覚の受容器より得られる生理的な感覚を示し，触覚のみならず他の感覚も含めて想起される心的なイメージを「触感」と定義した．以降で用いる「触覚」と「触感」はすべてこれに沿って使い分ける．

2.2. 触覚技術

視聴覚と触覚は，視聴覚が目や耳といった代表的な感覚器を持つ中で，触覚は受容器が身体全体に分布し，自身が能動的に探索動作を行わなければ得られない感覚である [7] という点で大きく異なっている．視聴覚を代替するイメージセンサやカメラ，マイクやスピーカーといった感覚器の機能を持った機器が早くに登場し，一般化していく中で触覚技術の普及が遅れてきた 1 つの要因である．触覚の計測と再現は特性を考慮し，数多くの研究・技術開発が行われてきた．ここではまず人の触覚受容器の特性を示し，触覚の計測と再現の技術について述べる．

2.2.1 ヒトの触覚の受容器

ヒトの触覚受容器の様子を図 2.1 に示す．前野ら [8] によると受容器は主にマイスナー小体，パチニ小体，メルケル触盤，ルフィニ終末の 4 種である．これらの機械受容器は振動の周波数に対して応答特性を持っている．人の皮膚表面に機械振動を加えた際の機械受容器の振動検出閾値を図 2.2 に示す．図 2.2 より，それぞれの機械受容器が持っている周波数に対する感度の変化に差異があることがわかる．メルケル触盤，ルフィニ小体の検出閾値は周波数 1Hz—1kHz においてフラットである一方でマイスナー小体，パチニ小体はそれぞれ異なるカットオフ周波数を持ったローパスフィルタのように振る舞う．この感度特性から，4 つの受容器それぞれが異なる周波数帯域と物理量を検出しており，ヒトが皮膚において知覚できる振動の最大周波数は 1kHz 程度であることがわかる．

2.2.2 計測と再現

2.2.1 にて示された触覚受容器の特性に基づいて，触覚の計測と再現に関する開発が数多く行われてきた．触覚を計測するためのセンサは触圧覚センサ，すべり覚センサ，硬さ覚センサ，温熱覚センサに大別され用途によって使い分けられている．これらセンサや提示手法はロボットに搭載されるような MEMS センサやモーターを用いた触覚フィードバックによる制御を始めとして多岐に渡る．

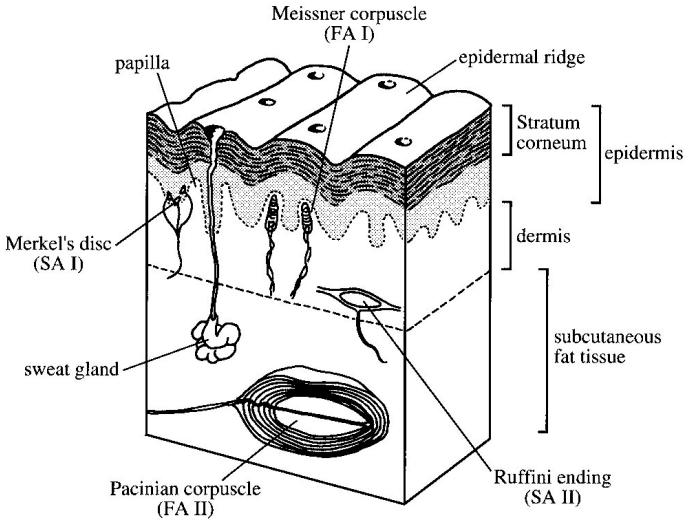


図 2.1 皮下組織の触覚受容器（ [8] より抜粋）

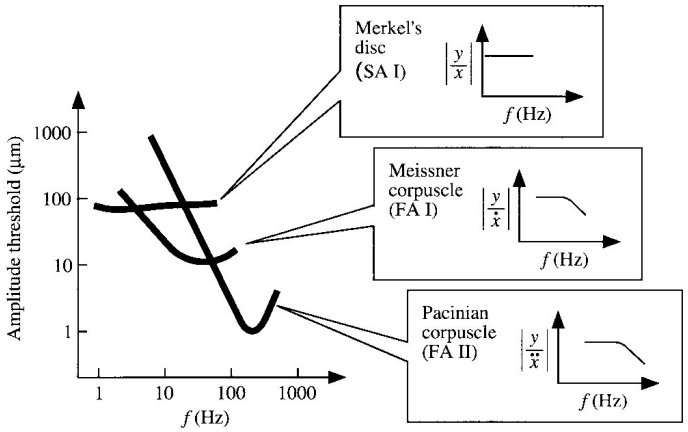


図 2.2 触覚受容器の振動検出閾値（ [8] より抜粋）

その中でも人の日常において発生する触覚の計測や提示にフォーカスした簡易かつ小規模なセンサや提示技術が発展してきている．田中ら [9] が開発した PVDF センサはパチニ小体と同様の電気的応答特性を持つ圧電材料であるポリフッ化ビニルデンを指に巻き付け，指先と接触対象との間に発生する振動触覚を計測するセンサである．このセンサは指先を覆わず，軽量であるという利点があり，計測時においても装着者が意識せずに直接対象にふれることができる．Kristantor ら [10] は爪に磁石と 3 軸のホールセンサが内蔵されたモジュールを取り付け，指先が対象に触れた際の指腹の変形を取得することで対象との間に発生した垂直力やせん断を計測している．Winfield ら [11] はスマートフォンなどの携帯端末に着目し，端末上で提供されるコンテンツやインターフェースへ触覚フィードバックを用いるためにパネル上の摩擦を増加・減少させることでテクスチャの凹凸を再現する手法を提案している．南澤ら [12] の TECTILE toolkit はコンタクトマイクロフォンによって対象をなぞることでその表面で発生した振動を記録し，アクチュエータにこれを出力することで振動触覚を再現している．このシステムは振動触覚を音響信号として扱うことで既存のインフラにおいて利用でき，マイクロフォン—アクチュエータというようなシンプルな機構で触覚の記録再現が行える手軽さから，今日まで Twech [13] や HaptI/O [14] といった研究に応用されている．

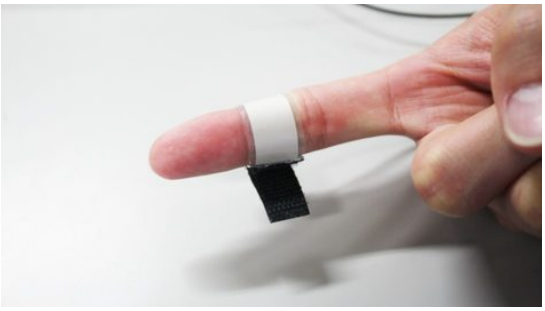


図 2.3 PVDF センサ [9]

図 2.4 TECHTILE toolkit [12]

2.3. 触覚とメディア

触覚技術の発展によって製品や研究に触感を取り入れることが一般化してきている．ここでは現在行われている触覚技術の各分野での利用例を示した後，それらの伝送による体験共有や身体拡張の実現といった応用について述べる．

2.3.1 実社会における触覚技術の応用

現在様々な分野において触覚の記録やフィードバックが利用されている．ここではいくつかの分野における触覚技術の応用例を示す．映画やゲームコンテンツを始めとしたエンターテイメント分野では早くから臨場感や没入感の向上に触覚フィードバックが利用されてきた．例えば，Nintendo より発売されている Switch（図 2.5）はコントローラに振動モータを搭載し，従来のシンプルな強弱やパターンの再現ではなく，音響信号として振動触覚を取り扱う方式を用いている．これによって，解像度の高い触覚フィードバックを行えるため，没入感を向上させるだけでなく触感を頼りに行うゲームコンテンツの開発も行われている．konishi ら [15] の Synesthesia Suit(図 2.6) は，スーツに内蔵された 26 個の振動素子によって，音楽とコンテンツに合わせた振動が再現され，プレイヤーが視覚，聴覚，触覚によってゲームを体感できる共感覚を提示するシステムを実現している．

図 2.5 Nintendo Switch [1]

図 2.6 Synesthesia Suit [2]

2.3.2 触覚データの収集と解析

触覚に関する情報をデータベースに蓄積し，それらを解析する研究が行われてきている．Hanamitsu ら [13] の Twech（図 2.7）では，スマートフォンのオーディオインターフェースを利用して既存の動画アプリを用いて動画と触覚とを同時に記録している．動画として保存されるため，Facebook や Twitter といった SNS 上でシェアすることができ，同じデバイスを持つユーザー同士で容易に触感を共有することが可能となる．触覚情報を時系列データとして解析し，類似している触感を持つマテリアルを検索するといったアプリケーションを提供している．Strese ら [16] の Texplorer（図 2.8）は複数のセンサ（圧力，加速度，カメラなど）を搭載し，マテリアルの表面をなぞったときの各センサのデータを機械学習にかけることによって触り心地を元にしたマテリアルの分類を作成している．一方で機械学習を用いて，触覚以外の情報から触覚を再現する研究も行われてきている．Yoshida ら [17] の VibVid は事前に記録したビデオ映像と同時に記録された音声，加速度センサの情報を用いて，画像と音声より加速度を推定するモデルを作成，それに基づいて音声より振動触覚を生成し提示するシステムである．これによって，複雑な計測系を組むこと無くもっともらしい振動触覚を生成することができるため，ネットワークインフラ上で映像と音声のみを伝送するだけで受信側では振動触覚が付与されたコンテンツを楽しむことができる．

1 出展：「Features – Nintendo Switch™ Official Site」，https://www.nintendo.com/switch/features/

2 出展：「Rez Infinite - Synesthesia Suit · WORKS · Rhizomatiks Research」，https://research.rhizomatiks.com/works/rez_infinite.html

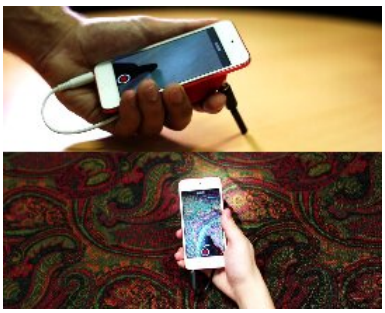


図 2.7 Twech [13]

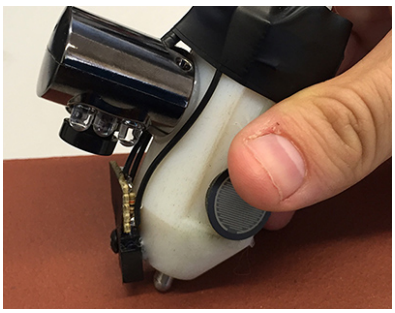


図 2.8 Texplorer [16]

2.3.3 インターネットを用いた触覚の伝送

インターネットにおける触覚の伝送は，ネットワーク技術の発展に伴って盛んに行われてきた．Asano ら [18] によって行われた初期の触覚伝送は Phantom[3]を用いてネットワークにて接続された二台のデバイスがアームを介して行われた身体動作に応じて，シンクロし動くことによって身体動作と触覚の双方を伝送していた．これを用いることによって遠隔での医療や指導といった行為を触感を伝えながら行うことができる．触覚の記録・再現の技術が進歩によるコストの低下やシステムの規模が縮小したことによってそれらのシステムはよりインタラクティブに触覚を共有できるような汎用性を持つようになった．Makino ら [19] の Haptclone（図 2.9）は視覚情報と触覚情報を伝送するシステムであり，接触力覚を超音波にて測定，それらの変位を伝送し提示することで遠隔にある 2 つのワークスペース間で触覚を共有できる．これによってワークスペース内における映像と触覚を互いに共有し，インタラクティブなコミュニケーションを取ることができる．Matsuzono ら [14] の HaptI/O はリアルタイムに触覚をノード間で共有するシステムであり，ノードは選択的に 1 対 1， 1 対多の触感伝送を実現している．これによってインターネットにおける通話や会議，ライブ配信といった多岐にわたるネットワーク上でのコミュニケーションに触覚を付与する試みを行っている．

一方で，振動触覚や力触覚のような 1 つの要素に限らず，触覚の 3 原色 [20] における圧覚・温覚・振動覚をすべて計測し，それらをリアルタイムに伝送，再現することで遠隔にあるロボットにオペレーターが憑依したかのように身体動作に

同期した操作を行えるテレイグジスタンス [21] という概念が社会に浸透しつつある．近年では 5G を利用した触覚情報のリアルタイム伝送システムの構築に関する研究 [22] も多く行われており，この低遅延性を活かしてテレイグジスタンスの社会実装が試みられている（図 2.10）．将来的には遠隔の作業だけでなく，海外へ渡航せずに観光を楽しむ，結婚式のような大事なイベントに不自由なく参加する，宇宙空間から地球を見上げるというような時間や年齢，障がいといった様々な制約を取り払い，人々の生活を向上させるシステムとして大きく注目されている．

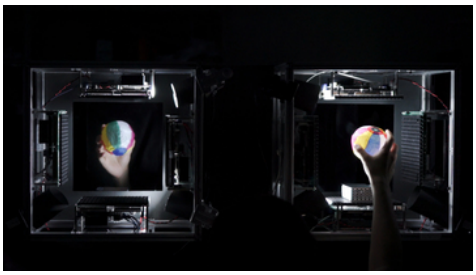


図 2.9 HaptoClone [19]

図 2.10 Model H [4]

2.4. 高臨場マルチメディア

これまでの動画，音声といったメディアの質や解像度を向上させるためにそれらの統合や多重化が行われてきた．近年では 4K，8K を始めとする高解像度映像や 22.2ch オーディオ，立体音響システムといった技術が確立されている．これらのメディアを組み合わせ，伝送することによって高い臨場感を伝える取り組みが近年多く取り組まれている．NTT はこれらの高解像度化されたマルチメディアの伝送，さらに照明などのシステムと組み合わせた高臨場マルチメディア伝送システムを開発している（図 2.11）．このシステムのコンセプトは競技空間をまるごと

3 出展：「3D Systems Phantom Premium haptic devices」，https://www.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium

4 出展：「TELEXISTENCE inc.」，https://tx-inc.com/ja/

伝送することであり，高解像度メディアを利用してあたかも眼の前で競技が行われているかのように再生する．また，Fujitsu はバスケットボールリーグの試合を映像，音声，振動のリアルタイム伝送によって高臨場感を伝える取り組みを行っている (図 2.12)．熊本県で行われた試合時の映像，音声，振動をリアルタイムに東京の開場へ伝送し，再現することで遠く離れた会場との一体感を向上させた．

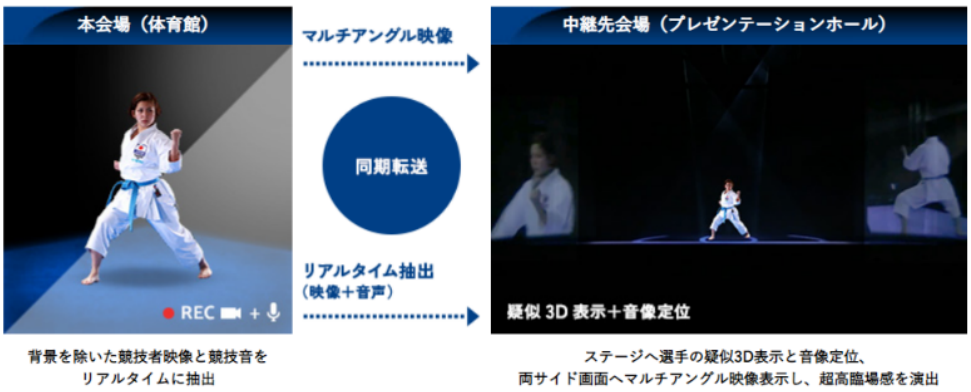


図 2.11 イマーシブテレプレゼンス技術 Kirari! [5]

図 2.12 次世代型ライブビューイング B.LIVE in TOKYO [6]

2.5. メディアデータの伝送と圧縮

このように多重化，高解像度化していくマルチメディアはデータの肥大化に反比例し，伝送時のリアルタイム性やハードウェア，ネットワークリソースの利用率が悪化していく．これらの改善はマルチメディアを利用していくにあたって必要不可欠となる．ここで必要とされるのがマルチメディアの多重化に対応したファイルフォーマットと圧縮技術である．これらを規定する規格として MPEG-4（Moving Picture Experts Group phase 4）がある．MPEG-4 は従来の MPEG-1 や MPEG-2 にて行われてきたメディアの蓄積や放送に加えて，ネットワークを用いた携帯端末のデータ通信を想定し，低速，低帯域の回線においてもメディアデータの伝送を行うために設計された．MPEG-4 の規定する技術は多岐に渡り，これらはパートごとに別れて動画や音声の符号化・圧縮方式やファイルフォーマットなどを規定している．ここでは MPEG-4 が規定するファイルフォーマットである MP4 [23] と音声圧縮技術を規定する MPEG-4 Part 3 [24] において一般に使われている圧縮技術を紹介する．

2.5.1 MP4 ファイルフォーマット

MP4 はデジタルメディアのファイルフォーマットの一つであり，ISO/IEC 14496-14:2003，ISO/IEC JTC 1 [23] にて標準化されている．現在は動画や音声の格納に使用されており，インターネットで伝送されるメディアファイルは主にこのフォーマットを利用している．MP4 フォーマットは ISO ベースメディアファイルフォーマットを元にしており，ボックス構造（図 2.13）を最小単位としている．このボックス構造を用いることで複数のメディアファイルを 1 つのファイルに格納する多重化や時刻情報といったメディアファイルに関するメタデータを別に格納することによってランダムアクセスや容易なファイル編集を可能としている．

---

5 出展 :「超高臨場感を世界の人々へ Kirari! | NTT ×イノベーション | グループ経営戦略の取り組み | NTT HOME」，http://www.ntt.co.jp/activity/jp/innovation/kirari/

6 出展 :「ライブビューイングレポート - B.LEAGUE（B リーグ）公式サイト」，https://www.bleague.jp/all-stargame2018/liveviewing_report/

このボックスから成る基本的な MP4 ファイルの構造を図 2.14 に示す．基本的にはファイルタイプボックス（'ftyp'），ムービーボックス（'moov'），メディアデータボックス（'mdat'）の 3 つのボックスから構成される．これらのボックスはそれぞれ以下の役割を担う．

- ファイルタイプボックス : MP4 ファイルの再生互換性を示すブランド情報が格納される．再生端末は，このボックスを参照してファイルの再生可否を判定する．
- ムービーボックス : データのフレームサイズや格納位置情報，それらの復号と出力時刻といったヘッダ情報を格納する
- メディアデータボックス : 復号順でフレーム単位のメディアデータが格納される．MP4 ファイルの再生時にはムービーボックスに格納されている情報から再生時刻に相当するデータフレームの格納されているアドレスを特定し，そのアドレスを用いてこのボックスよりメディアデータを取得する．

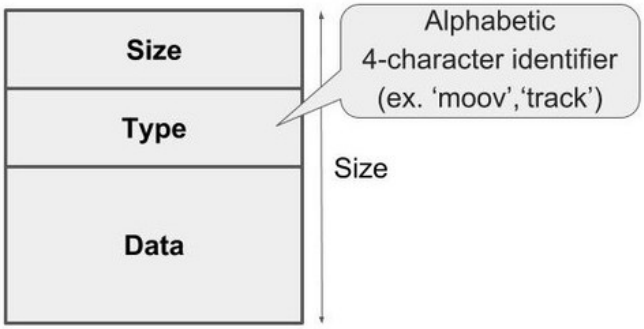


図 2.13 MP4 におけるボックス構造

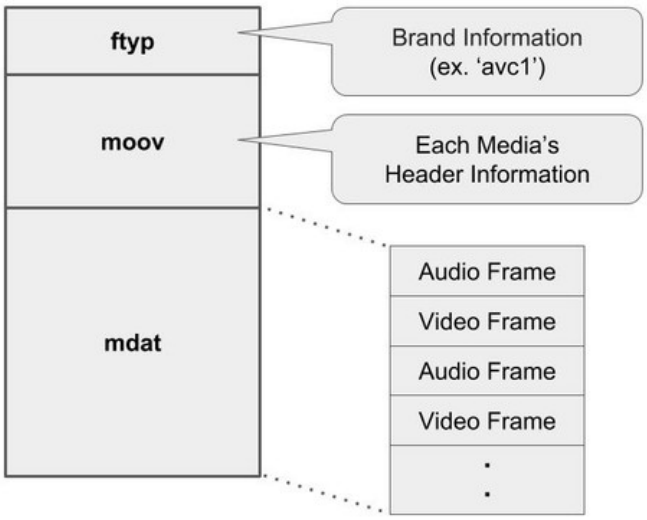


図 2.14 基本的な MP4 のファイルの構造

2.5.2 オーディオ圧縮技術

ステレオのオーディオ信号を CD などに用いられているサンプリングレートである 16bit，44100Hz において WAV 形式にて保存した場合，データレートは約 1.4Mbps 程度となる．このデータレートにおいて 1 分間の記録を行うだけで，保存されるファイルのサイズは 10MB 程度になる．これは例え信号が無音であってもサイズは変化せず，コンピュータのストレージやネットワークの帯域を圧迫することになる．そこで波形の予測や人の音響モデルに基づいてこのデータサイズを減少させるために用いられるのがオーディオの圧縮技術である．オーディオ圧縮は可逆圧縮と非可逆圧縮の二種類に大別される．非可逆圧縮は人の聴覚特性に基づいて符号化を行う圧縮法である．この圧縮法は符号化によって発生する劣化が聴感へ及ぼす影響を少なくすることで実質的にオリジナルの信号に近い音声を得られるようにしている．主な非可逆圧縮方式を以下に示す．

- MP3(MPEG-1 Audio Layer-3)
  ISO/IEC 11172-3 [25] にて規格化されている周波数ごとの人の聴覚認知レベルの違いや音響心理学に基づいた圧縮法であり，対応するサンプリングレー

トは 32 kbps − 320 kbps，最大 48kHz である．CD や PC への音声取り込みの際に用いる圧縮法として広く普及し，今日までに MP3 を再生する機器（MP3 プレイヤー）なども市販されている．

- Opus
  リアルタイム伝送に向けて開発された非可逆圧縮法であり，RFC6716 [26] にて標準化されている．対応サンプリングレートは 8k − 48kHz，6k − 510kbit/s であり，最大で 255 の音声チャンネルを含められる．このコーデックのカバーする帯域は可聴域全域におよび，変換遅延は 22ms 程度と AAC に比べて大きく下回っている．この低遅延性から Web における音楽のリアルタイム配信やライブでのリップシンクといった用途に利用されている．

- AAC(Advanced Audio Coding)：
  96KHz までのサンプリング周波数に対応し，最大で 48ch の音声チャンネルを持たせることが可能なコーデックである．ISO/IEC 14496-3, Subpart 4 [24] で標準化されており，現在では地上デジタル放送を始めとした放送網やインターネット上における音声配信などに最も多く用いられている．

可逆圧縮は信号の波形予測や統計を使い，データの持つ冗長性を除去する方式である．このような圧縮データからオリジナルの信号を完全に再生できる圧縮法はロスレス圧縮法と呼ばれる．主な可逆音声圧縮方式を以下に示す．

- ALAC(Apple Lossless Audio Codec)
  Apple 社が開発したコーデック[7]であり，対応する量子化ビット数は 16 − 32bit，サンプリング周波数は 1kHz − 384kHz，チャンネル数は最大 8ch である．エンコードされたデータは MOV ファイル (.mov) か MP4 ファイル (.m4a) に格納される．2011 年よりオープンソース化されている．

- FLAC(Free Lossless Audio Codec)
  Xiph.Org Foundation によって開発されたロスレスコーデック[8]であり，対応する量子化ビット数は 4bit - 32bit サンプリング周波数は 1Hz - 655.3kHz，チャンネル数は最大で 8ch をサポートしている．オープンソースであり，商

用利用が容易なことから近年では様々なOSやハードウェア上で利用できるようになってきている．

- MPEG-4 ALS(MPEG-4 Audio Lossless Coding)
  このコーデックはISO/IEC 14496-3 Subpart 11 [24] で定義され，32bitまでのPCM，192kHz以上のサンプリング周波数にも対応している．最大で65536チャネルの多重化データに対応し，5.1ch，7.1ch，22.2chといったサラウンドシステム用のオーディオデータを含めたマルチチャンネルオーディオを取り扱うことができる．エンコード前のオリジナルのファイルもWAVやRawを始めとして多くの形式に対応し，ランダムアクセス機能によってリアルタイム配信などにも対応できるといった特徴を持っている．また，これらの特性を活かして脳波などの生体信号のデータ圧縮に用いる例 [27] もある．

7 出展：「Apple Lossless Audio Codec」，https://macosforge.github.io/alac/

8 出展：「FLAC - documentation」，https://xiph.org/flac/documentation.html

2.6. 本章のまとめ

本章では現在までに行われてきた触覚の計測と再現に関する研究やその応用による解析や伝送といった実社会での触覚の利用例について述べ，高解像度の情報伝送による高臨場感の創出やそれらに用いられるメディアファイルフォーマット・圧縮法について紹介した．触覚技術の発展によって触覚の計測と提示が簡易に行え，それらをネットワーク上で伝送することが可能になってきている一方で，臨場感やリアリズムを創出する映像や音声といった視聴覚情報と触覚情報を組み合わせた触感情報の伝送はリアルタイム性にフォーカスしたものが多く，触感情報をデータとしてネットワークシステム上で蓄積・伝送できるような基盤は未だ開発されていない．

本論文では触感を伴う身体的な体験が記録された触感情報の符号化とそれらのインターネット上における伝送と蓄積を行い，ダウンロード・アップロードによって共有を行う触感共有プラットフォームを提案する．次章でプラットフォームのコンセプトやその検証に基づく設計要件について述べる．

第 3 章
Concept Design

3.1. コンセプト

前章で示したように高臨場感通信のような没入感や臨場感を提示するシステムでは高解像度の視聴覚情報の伝送にとどまっており，ものに触れる，身体を動かすといった主体的に動作することによって得られる体験を伝えることは難しいと考えられる．その一方で触覚技術はその発展と普及によって，VR や AR といった分野において触覚の持つ自己の主体性を強く定義づける特性を利用した没入感や臨場感の提示に多く利用されており，触覚情報そのものをインターネット上で伝送する試みも行われている．このように，触覚情報が将来的に高臨場感通信のような高解像度の視聴覚情報に付随して配信されることで，現在では伝えきれないような個々の身体動作を伴うような主体的な体験そのものをインターネット上で共有することが可能になると考えられる．

しかし，触覚情報に関するデータフォーマットや伝送システムの標準は確立されておらず，これによって現在までに多くのアプローチが行われてきたように視聴覚における入力機器であるカメラやマイク，出力機器であるディスプレイやスピーカーというような触覚における標準的な入出力機器はいまだない．データフォーマットや伝送システムの標準化が行われることによって初めて，それに準拠した機器が登場し，触覚情報の伝送やその記録が一般化されていくと考えられる．この一般化に加えて触覚情報が映像や音声といった従来のメディアデータと組み合わさることでスポーツ中継などのリアルタイム配信に触覚情報を載せることや，蓄積されていくデータによって触感に基づく商品の検索や言葉より想起される触覚の生成，一般ユーザが自らが触覚を含むコンテンツを作成して多人数間で体験す

るといった応用が期待される（図 3.3）.

そこで本論文では，映像，音声，触覚情報が一体となったマルチメディアを触感コンテンツ（図 3.2）と名付け，これに必要とされるメディアデータのフォーマットの規定を行い，既存のネットワークインフラにおいて触感コンテンツを伝送・共有するプラットフォームを構築する.

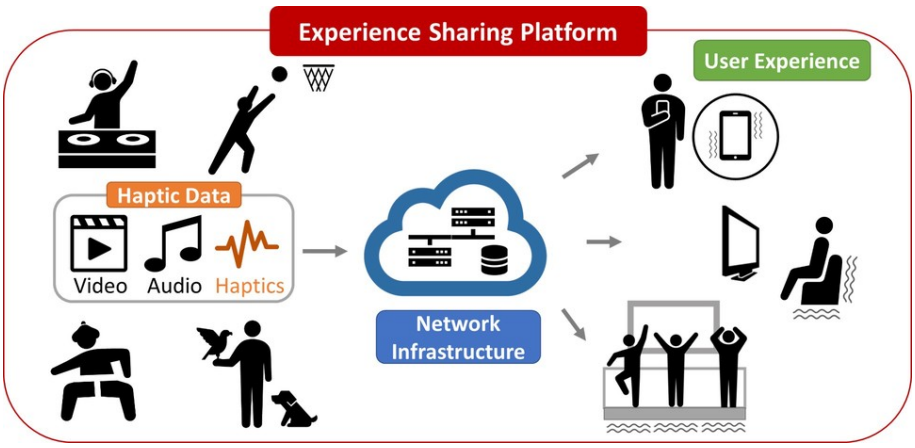


図 3.1 触感共有プラットフォームのコンセプト

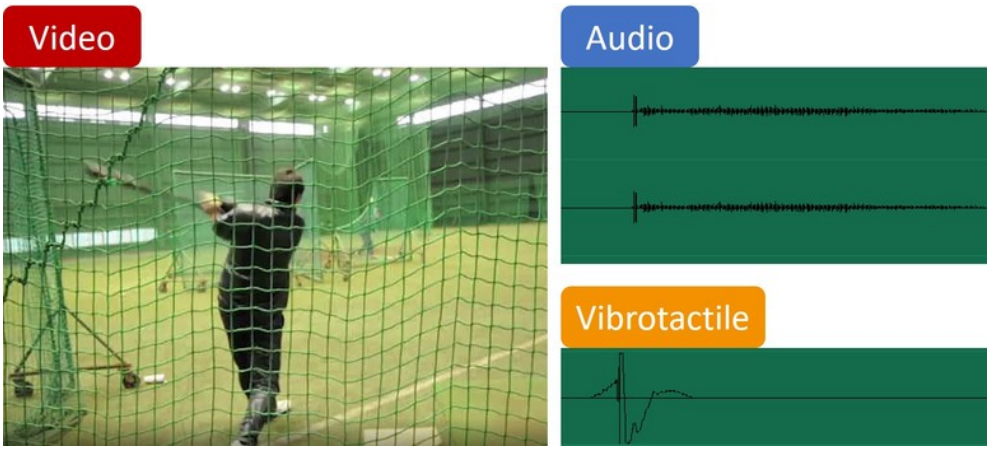


図 3.2 触感コンテンツの例

(a) 触覚が付与されたスポーツ中継

(b) さわり心地に基づく商品検索

図 3.3 触感共有プラットフォームの応用

3.2. ユースケース

触覚情報のチャンネル数は際限なく増やすことができるが，一般に広まっていくような簡便さを持たなければ普及していくことは難しいと考えられる．そこでデータフォーマットや伝送システムの設計を行っていくにあたり，実際のユースケースを考慮する必要がある．現在の PC・スマートフォンやテレビといったデバイスには触覚に関する入出力ドライバにあたるものは実装されていないため，これら単体のデバイスにおいて触覚の記録と再生を行うことは困難である．しかし，振動触覚にフォーカスすればこれらはオーディオ信号の中で多重化できるるため，5.1，7.1，22.2ch といった多チャンネルオーディオに組み込み，分離された後に振動触覚の出力機器に接続することで容易に記録・再生が可能である．両手を使用するようなゲーム機であればそのうち 2ch もあれば左右での差異を出すことができ，TV コンテンツであれば鑑賞の際に座るような椅子やクッションによって上下方向に振動触覚を提示することができる．これより，触覚の記録と再生において，最大 4ch の振動触覚が含まれることで既存のオーディオシステムを利用できるとともに上下左右の自由度を持ったコンテンツの設計が可能となる．しかし，今後標準化が行われていくなかで振動触覚専用のデータフォーマットが規定される場合，現状としてオーディオ信号に多重化できたとしても，触覚に関しては別に保存されていなければならない．

そこで，触覚情報を映像・音声に同期させつつも独立して保存しておくことで

後から出力機器側に合わせたモーダルの選択（例，出力側 : オーディオ出力 2ch のみ，映像・振動触覚を再生する場合は振動触覚を音声出力に割り当てる）といった機能を提供できるため，ハードウェアによって制約を設けるよりも柔軟性の高い触感コンテンツの利用が可能であると考えられる．

3.3. 触感コンテンツのデータフォーマットの提案

前節で考慮したユースケースより，触感コンテンツのデータフォーマットには以下が必要とされる．

- 映像，動画，音声それぞれが独立し同期している
- 最大で 4ch の振動触覚を含められる
- 既存のネットワークインフラ上での伝送

この章ではこれらを実現するデータフォーマットの検討を行う．

3.3.1 MPEG-4 に準拠した触感コンテンツ

前章に示したように視聴覚に基づく映像や音声といったメディアは MPEG-4 に準拠したデータフォーマットを採用することで，MPEG-4 が提供する多重化や圧縮といった柔軟性の高い機能を利用している．触覚情報が MPEG-4 に準拠して符号化されることで，映像・音声と同様な可用性や拡張性を持たせつつ，互いに組み合わせることが容易となる．MEPG-4 に準拠した映像・音声・触覚情報を組み合わせるファイルフォーマットとして MPEG-4 にて規定されている MP4 ファイルフォーマットがある．MP4 の持つ box 構造の 1 つに触覚（Haptics）を割り当て，そこに触覚情報を格納することで映像・音声とは互いに独立しつつも同期した記録と再生が可能となる（図 3.4）．

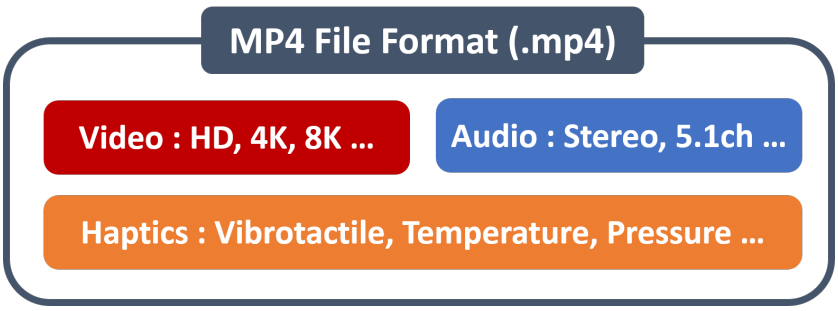


図 3.4 MPEG-4 に準拠した触感コンテンツの構成

3.3.2 m4t（MPEG-4 Touch）の構想

MPEG-4 に準拠した映像・音声・触覚の多重化を行うにあたり，課題となるのは触覚情報のデータフォーマットである．そこで，本研究では MPEG-4 の規格に準拠した触覚に関するデータフォーマットを m4t(MPEG-4 Touch) と定義する．前章の MP4 ファイルフォーマットの基本構造（図 2.14）を拡張した m4t の構造を図 3.5 に示す．MP4 によって振動触覚以外にも触覚の 3 原色 [20] に代表される温度，圧力といった時系列の触覚情報をこの中に多重化し含められ，従来のネットワークインフラにおける伝送やオープンソースソフトウェアを用いた記録や再生，編集といったの機能をユーザ端末上において容易に利用できるようになる．さらに，出力側の特性に合わせて出力するモダリティを選択的にすることもでき，5.1ch や 7.1ch のような従来のサラウンドオーディオシステムのうち音声出力として利用しない余ったチャンネルを利用して m4t に格納された振動触覚を提示することもできる．このように m4t の標準化によって，より柔軟に触覚情報を取り扱えるようになると考えられる．本研究ではその先駆けとして，振動触覚にフォーカスした m4t による触覚情報の符号化を行う．

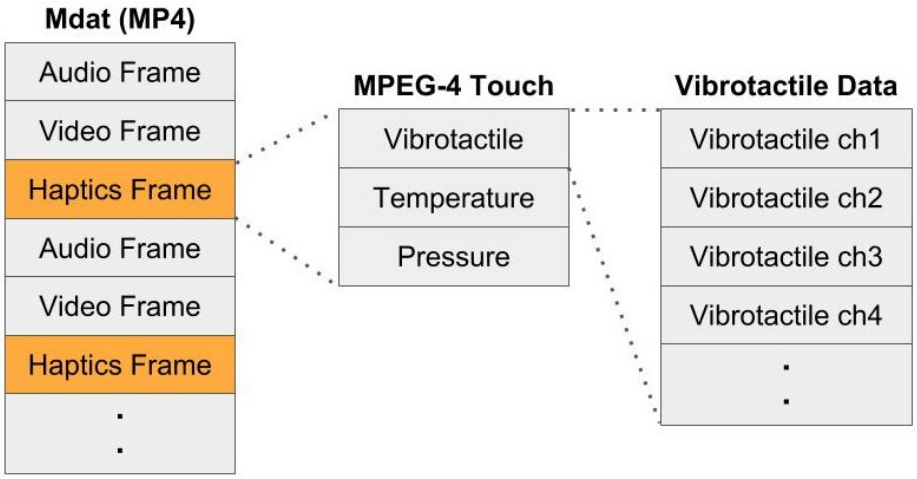


図 3.5 m4t（MPEG-4 Touch）の構造

3.3.3 振動触覚データの圧縮

データ圧縮は肥大化するメディアファイルを伝送，蓄積するにあたってリアルタイム伝送やリソースの有効利用の実現に必須となる．振動触覚はオーディオフォーマットを利用して記録，再生を行えることから，オーディオ圧縮技術を利用できる．しかし，今日で最も用いられている AAC(Advanced Audio Coding) [24] を始めとしたオーディオ用の非可逆圧縮法は人の聴覚特性に基づいて作成されているため，それが元の振動触覚を代替できるという保証はない．そこで本論文では MPEG-4 の規格に準拠し，かつ可逆可能な圧縮法である MPEG-4 ALS [24] を用いて触覚の圧縮を行う．MPEG-4 ALS は過去の複数のデータサンプルの予測や分析を行うことで多重化されたデータや高サンプリングの信号に対しても，入力信号を完全に再現することができる方式であり，入力信号のおよそ 15%－ 70%程度までデータサイズを削減できる．また，生体信号の圧縮に用いられているなど，その応用は音声信号の域に留まっていないことから，振動触覚のような時系列データも圧縮が行えると考えられ，将来的に m4t 内で振動触覚以外の触覚情報を多重化した場合でも，それらを劣化させること無く保存・伝送することが可能となる．

3.4. 触感共有プラットフォームの設計要件

ここまでで設計した触感コンテンツをネットワークインフラ上で実際に共有する触感共有プラットフォームについて設計要件をまとめる．コンセプトと想定される実用例より挙げられたプラットフォームの設計要件を以下に示す．

- 既存のネットワークインフラを用いて触感コンテンツの伝送を行うこと
- 動画・音声と同期して触覚情報が記録・再生されること
- 触感コンテンツの詳細（触り心地や素材）がデータとして保存されること

これより考案した触感共有プラットフォームの構成図を 3.6 に示す．プラットフォームを構成する主な要素として，触感コンテンツ，触感コンテンツの記録・再生を行うハードウェア，触感コンテンツの伝送・蓄積を行うネットワークシステムの３つが挙げられる．以降でこれらの具体的な設計要件を挙げていく．

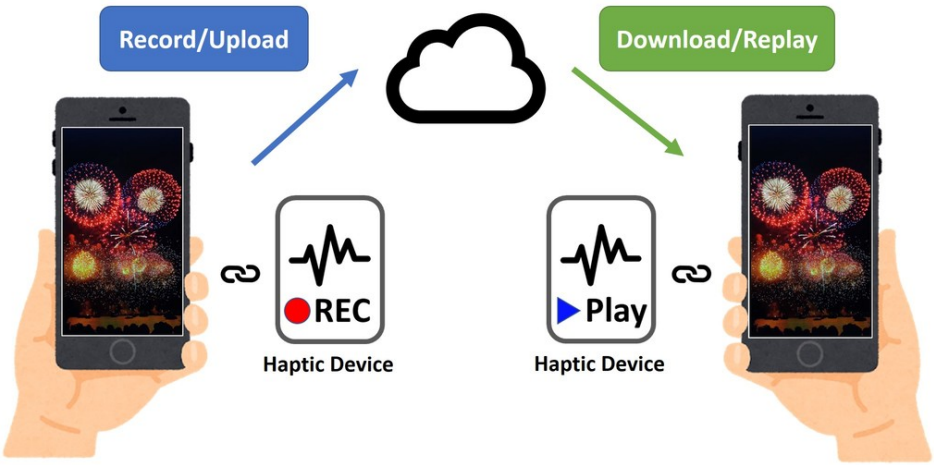


図 3.6 触感共有プラットフォームの構成

3.4.1 ハードウェアの設計要件

ハードウェアでは，映像・音声・触覚情報から成る触感道の記録と再生が行われ，このメディアファイルはアプリケーションによってネットワークシステムへ伝送，蓄積される．既存の PC やスマートフォンといったデバイスでは標準でカメラやオーディオインターフェースが搭載されており，これらを用いて動画や音声を記録することや OS 上で動作するソフトウェアによってネットワークシステム上でのファイルの伝送を容易に行える．しかし，本論文にてフォーカスしている振動触覚に関するインターフェースやドライバに相当するものは実装されていないため，端末上にて行われる録画・再生と同期して振動触覚を記録・再生するデバイスが別途必要となる．本論文ではこの触覚の記録・再生を行うデバイスを触感入出力ノードと呼ぶ．ハードウェアは PC・スマートフォンといった動画・音声の記録と再生機能を利用できる既存の端末と触感入出力ノードの 2 つで構成される設計とする．

3.4.2 ネットワークシステムの設計要件

ネットワークシステムでは，触感コンテンツの伝送と蓄積が行われる．ハードウェアからは触感コンテンツのデータストリームが伝送される想定をしているが，今後，プラットフォームを利用した類似の触感の検索や文字や映像などの別の感性情報による触感の生成といった応用に向けて，オーディオにおけるアルバム情報やタグと同様に触感コンテンツに関連する情報も取得しなければならない．特に機械学習を始めとしたアルゴリズムへ対応する場合には触感コンテンツ自体の時系列データの他にそれらに関連する触る対象の名前や詳細な素材名，その触り心地や状態などを触感コンテンツに紐づけて蓄積する必要がある．このため，ネットワークシステムは機能を外部へ提供するサーバー，触感コンテンツが蓄積されるストレージ，触感コンテンツに関連する情報を保存しておくデータベースの 3 つが構成される．サーバに各種リクエストを送ることによって，触感に関する情報のデータベースへの登録や触感コンテンツのアップロード・ダウンロードが可能となる．また，ユーザー端末より記録した触感コンテンツに紐付いた対象の情

報をデータベースに登録することでアップロードされる触感コンテンツと触った対象の情報を紐づける．

3.5. 本章のまとめ

本章では，映像・音声・触覚より構成される触感コンテンツを定義し，これをインターネット上で伝送することで身体的な体験を共有する触感共有プラットフォームのコンセプトについて述べた．幅広い分野で利用されてきた振動触覚にフォーカスし，触感コンテンツの要件を実際のユースケースに基づいて考慮し，最大で4ch の振動触覚を含めることによって，上下左右における振動触覚の提示や 4 自由度のコンテンツ作成，オーディオ信号へのリマップを行えることを要件とした．これらから，映像・音声との多重化やネットワークにおける伝送などを容易に行うために MPEG-4 に準拠した触感コンテンツを提案し，MPEG-4 が規格化しているファイルフォーマットである MP4 ファイルフォーマットを用いた触感コンテンツの格納や触覚に関するデータフォーマットである m4t を提案した．これらに基づいて触感コンテンツをインターネット越しに伝送する触感共有プラットフォームについての設計を行い，これを構成するハードウェア・ネットワークシステムの設計要件について述べた．

第 4 章
Implementation & Verification

本章では 3 章に示したユースケースベースの設計要件を元に実際に触感コンテンツの符号化や触感共有プラットフォームの構築を行う．プラットフォームを構成する各要素の設計と実装の詳細，触感コンテンツを記録・伝送するプロトタイプシステムの実装について述べる．

4.1. 構築するシステムの目的

前章で示された触感コンテンツを共有するために必要な設計要件を元にシステムの構築を行っていく．構築にあたって本研究にて構築する触感共有プラットフォームにおいて達成すべき要件を選定した．

- 触感コンテンツをスマートフォンと触覚の入出力ノードを用いて記録する
- 触り心地に関する情報を取得し，ネットワークシステム上に保存する
- 記録された触感コンテンツをサーバへアップロードする

この実装・検証を行うことで，想定しているようなアプリケーションへの利用の可能性を示唆できる．また，将来的に大規模なデータベースへの蓄積やネットワーク上でのリアルタイムストリーミングを行うといった用途にリファレンスとして貢献できると考えた．以降で，実際に構築したハードウェアとソフトウェアの詳細について述べる．

4.2. 触覚入出力ノード

前節で設計した触感入出力ノードの実装を行った．入出力ノードはスマートフォンや PC といったユーザ端末と連携して触覚動画における振動触覚を記録，再生する．このノードには以下のことが求められる．

- 動画・音声と同期した触覚の記録と再生
- ユーザー端末との連携（開始・停止，ダウンロード・アップロード）
- 既存のメディアファイルフォーマットを用いた触覚の保存

この入出力ノードが低レイヤーにおけるメディアの記録や再生といった機能を提供することで，上層のアプリケーションはそれらを考慮せずに柔軟に取り扱うことができる．本研究ではこの入出力ノードを実装を行い，実際のユーザ端末と連携して動画・音声と同期した触覚の記録と再生を試みる．

4.2.1 触覚入出力ノードの構成

実際に作成したノードを図 4.1 に，各素子との接続図を図 4.2 に示す．ノードはなるべく搭載する素子を減らし，機能をシンプルにすることで，ソフトウェア側で機能拡張を行える設計で実装した．ノードにはマイクロコントローラキット (ESP32DevkitC)，ステレオ AD コンバータ (PCM1808)，オーディオ・ステレオ DAC(PCM5012A)，SD カードコネクタが搭載されており，触感振動の入出力用のピンを用意している．大きさは基板サイズで 56x38mm である．各オーディオ素子とは I2S を用いてコミュニケーションを行う．通常，入出力の用途ではマスタークロックを利用することは無く，オーディオ素子側で他の信号からクロックを生成する機能が使われている．しかし，この方法では出力側のマイコンの影響を強く受けてしまうため再生時の遅延やブレが発生する可能性が高い．そこでこのノードでは，内部で精度の高いクロックを生成し，それをマスタークロックとして出力している．さらにそのクロックを ADC へ供給し，ADC をマスターとすることでモジュール側で発生する影響を最小限にすると共に，クロック生成に関す

る余分な素子の実装を防いでいる．入力ピンに振動触覚記録用のマイク (EM246) を接続することで最大 24bit，96kHz のサンプリングレートにて振動触覚を記録できる．また，出力ピンからは 0[V] 基準の振動触覚が出力されるため，出力ピンにデジタルアンプを介してアクチュエータを取り付けることで直接振動触覚を提示することが可能である．このノードのプログラムは ArduinoIDE を用いて開発が行えるため，このノードより得られる触覚データを活用したアプリケーションを作成することも容易である．コントローラに無線機能を持った ESP32 を用いていることから，直接インターネットに接続し，触感データのアップロード，ダウンロードやストリームの送受信を行える．基板は ESP32 に直接接続するためのピンを用意しており，外部にセンサを接続することでそのセンサ値による触覚フィードバックや他の触覚情報を同時に記録と再生が可能である．

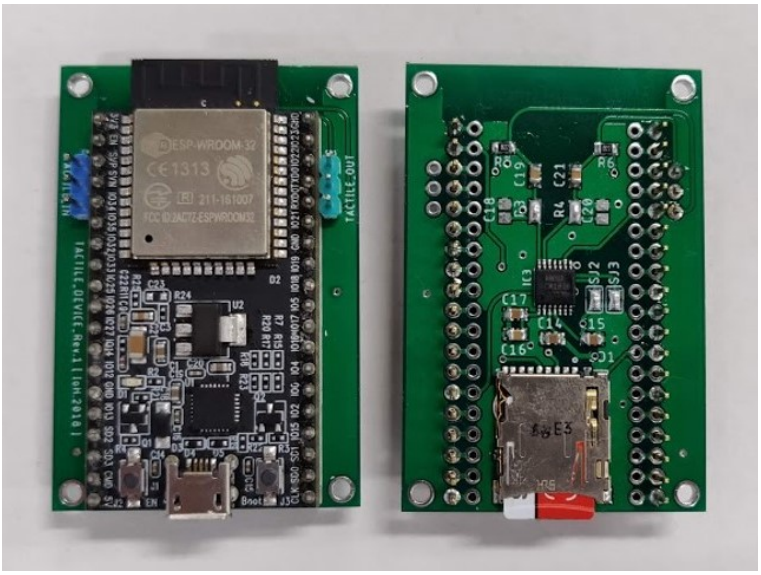


図 4.1 触覚入出力ノード

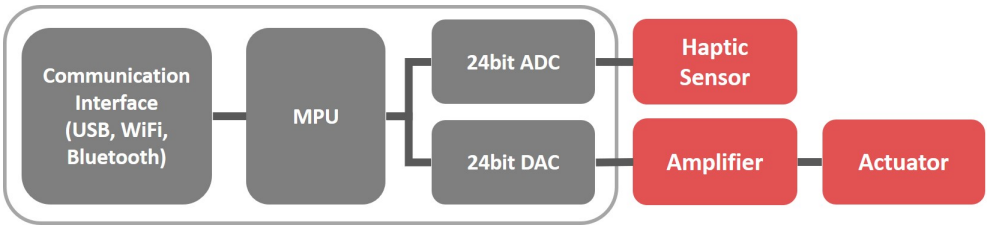


図 4.2 触覚入出力ノードの接続図

4.3. ネットワークシステム

4.3.1 ネットワークシステムの構成

実装したネットワークシステムの構成図を図 4.3 に示す．ネットワークシステムは API サーバ，データベースサーバ，ストレージサーバ（Blob サーバ）から構成されている．API サーバは Ruby on Rails を用いて実装されており RESTful な API サーバとして動作する．他のリソースへの情報取得，データの登録や削除といった様々な機能がこのサーバによって外部に提供される．クライアント側の端末は API サーバに HTTP リクエストを送る事によってデータベースやストレージへのアクセス，情報取得などが可能となる．メディアファイルのアップロード時にはこれらのメディアファイルに加えて触れた対象の質感を詳細に示す触感情報もアップロードする．この触感情報は前節で設計した触感情報を元に JSON 形式で伝送，登録される．これらの実装によって，蓄積される触感コンテンツやそれに関連する触感情報を用いたアプリケーションとの連携が従来の HTTP 通信をベースに行えるようになっている．この情報がデータベースサーバに登録されることで，API サーバを介してこの情報を取得し，これを元にして類似する触感の検索や質感と言葉の結びつきを類推するといった応用に用いることができる．また，このシステム上で用いられるメディアファイルの形式は基本的に MP4，WAVE，MPEG-4 ALS としており，この形式を用いたメディアファイルがアップロードされてくる．映像・音声・触覚が別のファイルに記録されていたとしてもファイルのアップロード時にそれらの持つ触感情報と結びつけてデータベースサーバへ登録され，関連付けられるためアップロードを行う端末側で同期や圧縮を行わない場

合でも，ダウンロード側が自由に変更，編集できるという柔軟性を持たせた．さらにこれらのサーバは Docker コンテナとして起動できるため，同じシステムを使ってインフラ（ストレージやハードウェア）を変更してもそのリソース上で稼働できるといった高い汎用性を持ったシステムとなっている．

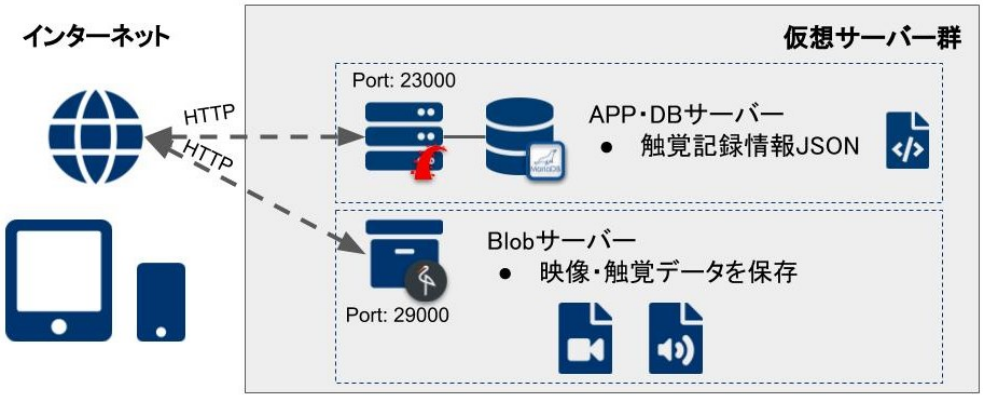


図 4.3 ネットワークシステムの構成

4.3.2 データベースの設計

図 4.3 に示されるように，このネットワークシステムでは触感コンテンツの伝送・蓄積を行うほかに，触感コンテンツに関連する触れた（触れる）対象の質感に関するデータとして触感情報がデータベースへ登録される．この触感情報は，触感コンテンツの記録時に記録者の主観を元に記述・選択されるものである．触感情報の詳しい構造を図 4.4 に示す．これらの情報の選択肢や入力される内容の詳細を表 4.1 に示す．ここで，オノマトペと形容詞は早川らの触感のオノマトペの分類 [28] より選択した．それぞれの選択肢を以下に示す．データベースに登録されるこれらのデータを解析することで類似する触感の検索といった応用に活かすことができる．

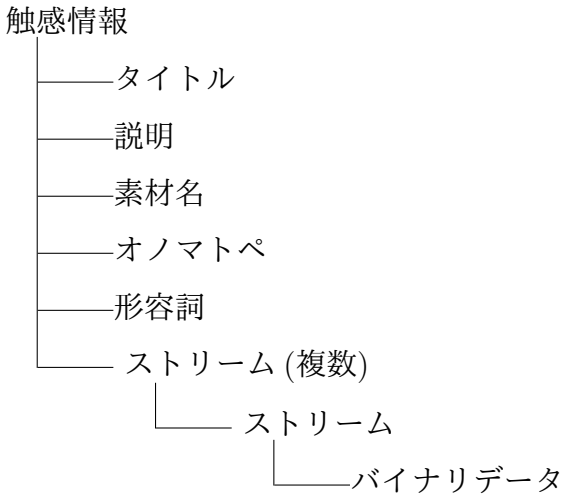


図 4.4 触感情報の構造

表 4.1 触感情報における各要素の内容と記入方式

要素名	内容	タイプ
タイトル	日付や記入者名など	自由記入
説明	記録の対象や目的の概要	自由記入
素材名	詳しい素材名	自由記入
オノマトペ	主観をもとにした質感を表すオノマトペ	1 つ選択＋自由記入
形容詞	質感を表す形容詞	複数選択

- オノマトペ：つるつる，すべすべ，かちかち，ふわふわ，もこもこ，がさがさ，ぼこぼこ，ざらざら，ごつごつ，ぷにぷに，ぺたぺた，べたべた，ねばねば，その他（自由記入）
- 形容詞：滑らか，粗い，でこぼこ，平坦，硬い，柔らかい，温かい，冷たい，つるつるした，べたべたした，湿った，乾いた

4.4. モバイル端末を用いた記録用アプリケーション

作成した入出力ノードとネットワークシステムを用いて，実際に触感コンテンツを記録するデバイスを作成した．このデバイスの詳細と触感コンテンツを記録するソフトウェアの詳細を次に示す．

4.4.1 ハードウェアの構成

触感コンテンツの記録では振動触覚の記録は入出力ノードによって行えるが，映像・音声を記録するデバイスは別途必要とされる．設計要件より日常的に使用するユーザー端末と入出力ノードの連携を想定しているため，スマートフォンを用いて映像・音声を記録し，映像・音声，振動触覚のデータをサーバへアップロードするハードウェアを作成した．図 4.5 に実装したハードウェアを示す．スマートフォンには HUAWEI P20 lite[1]を利用し，ノードは 3DCAD にて設計したスマートフォンケースに内蔵されている．スマートフォンケースには触覚記録用マイク (EM246) を取り付ける部分が突出しており，Twech [13] と同様に動画内に触っている対象と触れるポイントの双方が映り込むこと（図 4.6）によって触れ方を明示的に示し映像への没入感を向上させる意図からこのように実装した．触覚入出力ノードは 16bit，48kHz のサンプリングレートで振動触覚の記録を行い，このデータは WAVE ファイルとしてノードに搭載されている SD カードに保存される．スマートフォン側より入出力ノードに対して記録の開始・停止や記録されたファイルのアップロードをシリアル通信によるコマンドによって指定することで，それに応じた動作をノードが行う．

1 「Huawei P20 lite — 携帯電話 — HUAWEI Japan」 https://consumer.huawei.com/jp/phones/p20-lite/

図 4.5　触感記録用デバイス

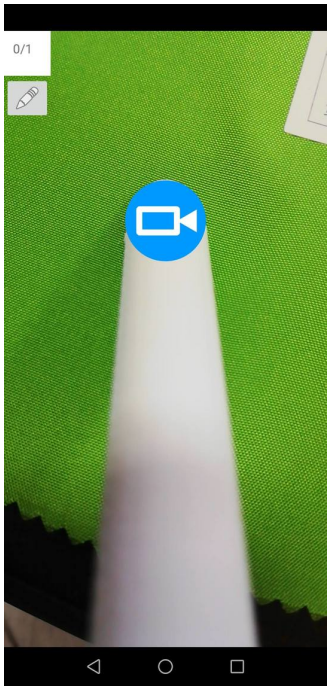
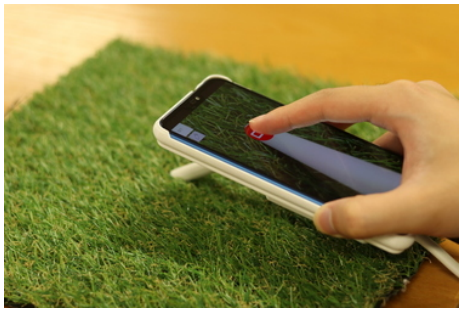


図 4.6　カメラアプリの画面

4.4.2 ソフトウェアの実装

記録用アプリケーションは AndroidStudio にて Java を用いて作成した．記録用アプリケーションでは通常の録画アプリケーションと同様に映像・音声を記録しつつ，入出力ノードと連携して同時に振動触覚の記録を行う．記録開始ボタンの他に試行回数カウンタ，設定ボタンがある．まず記録を開始するにあたって設定画面に移り，触る対象の触感情報と API サーバの URL を記入し，最後に試行回数（1 − 200 回）を選択する．これを行った後に，記録開始ボタンを長押しすることによって映像・音声の記録が開始される．実際に記録している様子を図 4.7 に示す．映像・音声の記録に合わせて，シリアル通信にてノードに記録を開始するコマンドを送信する．その後，記録開始ボタンより指を離すことにより記録が終了する．それに伴いノード側に終了を知らせるコマンドが送信され，すべての記録が停止する．これを試行回数分繰り返した後，各ファイルのアップロードを行う段階へ移行する．この時点では記録された振動触覚はノード側の SD カードに保存されているため，アプリよりノードへアップロードを開始するコマンドを送信し，指定するバイト数分をアプリ側で受信することで振動触覚ファイルを取得する．この取得した振動触覚ファイルの情報，端末に記録されている映像・音声ファイルの情報，記入した触覚情報をそれぞれ Json 形式のデータに変更し，API サーバへリクエストを送信する．この時に初めて，ファイルのアップロード先が生成されダイレクトアップロード用の URL がリクエストの返却値として取得できる．アプリではその URL へ向けて各々のファイルをアップロードする．この一連のシークエンスによって触覚情報に紐付いた触感コンテンツのアップロードを実現している．

(a) ぬいぐるみの記録



(b) 人工芝の記録

図 4.7 デバイスを用いた触感コンテンツの記録例

4.5. 遅延知覚の評価実験

4.5.1 実験目的

宮里らの映像と触覚情報の遅延知覚実験 [29] では振動触覚に対して映像の遅延が発生する場合の遅延知覚の閾値が MOS 評価において 3.5 を下回る 100ms であった．触感コンテンツは映像・音声・振動触覚の 3 つから成るが視聴覚情報に対して触覚をズレさせた場合の閾値は未だ明らかでない．ここでは宮里らの実験と同じ評価尺度を用いて，映像・音声に対して一定のズレを持つ振動触覚を提示した際の閾値を求め，現在の記録デバイスが内包する遅延が及ぼす感覚への影響の度合いを明らかにする．

4.5.2 実験方法

記録デバイスを用いて布のなぞりを記録し，この記録された触感コンテンツについて発生した遅延を波形ベースで同期を行う．この同期したオリジナルの信号を元に ±500ms の間で振動触覚のみをずらし，それぞれをステレオ信号の片側に入れ込んだ触感コンテンツを作成する．MOS 評価法に基づいて被験者はランダムに提示される遅延を持った触感コンテンツについてディスプレイとスピーカー，TECHTILE toolkit より出力される映像・音声，振動触覚について感じたズレを

5 段階評価で答える．実験環境を図 4.8 に，実験に用いる評価リストを表 4.2 に示す．この実験は約 15 分程度であり，被験者は 20 − 30 代の男性 6 名である．

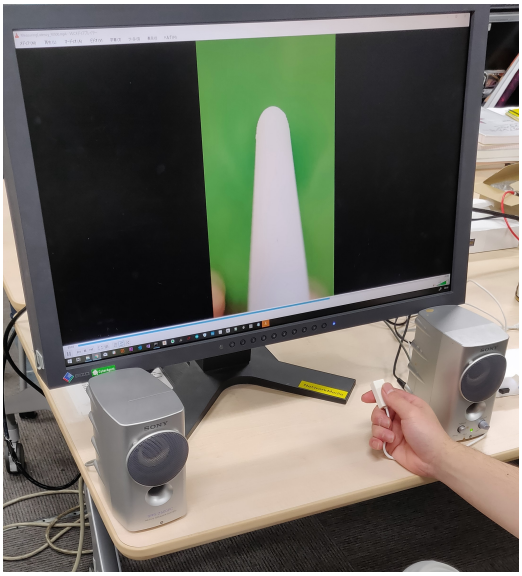


図 4.8 遅延知覚実験における実験環境

表 4.2 触感コンテンツにおける映像・音声と振動触覚の遅延知覚の評価尺度

映像・音声に対する振動触覚のずれを
５：全く感じない
４：わずかに感じるが不自然ではない
３：感じてわずかに不自然である
２：不自然である
１：非常に不自然である

4.5.3 実験結果

実験結果を表 4.3 に示し，その平均値のグラフを図 4.9．結果より，宮里らの遅延知覚実験と同様に 100ms 以降でズレに関する違和感を顕著に感じることがわか

り，ズレによる違和感を感じる閾値はMOS評価が3.5でとなる±100msであった．これは正負ともに100msにおいて3.5となっていることからそのズレの向きは特に大きな要因とならないことが明らかになった．また，MOS評価平均値が遅延0msの時の値から低下するのが±50msであったことから，今回の実験では±30msまでの遅延であれば知覚に影響を与えないことが明らかになった．一方で，70msでは正負共に遅延を感じないという結果が得られた．被験者に確認したところその点ではほとんど遅延を感じられず，更に低い値である50msと比較しても70msの方が良いと回答した．この原因として映像側の周期性が挙げられる．遅延知覚実験用に記録を行った際に一方向だけでなく繰り返してサンプルをなぞった事によって映像側に折り返しの周期性が生まれたと考えられる．このタイミングで振動触覚が発生することで違和感が感じられなかったと考えられる．しかし，この原因についてはサンプルやなぞり方をそれぞれ変更した複数の触感コンテンツを用いて追加実験を行わなければ原因の特定は難しく，システムが内包する遅延の知覚への影響を測るこの実験の趣旨から外れてしまうことからこの特定についてこの項では詳しく行わない．

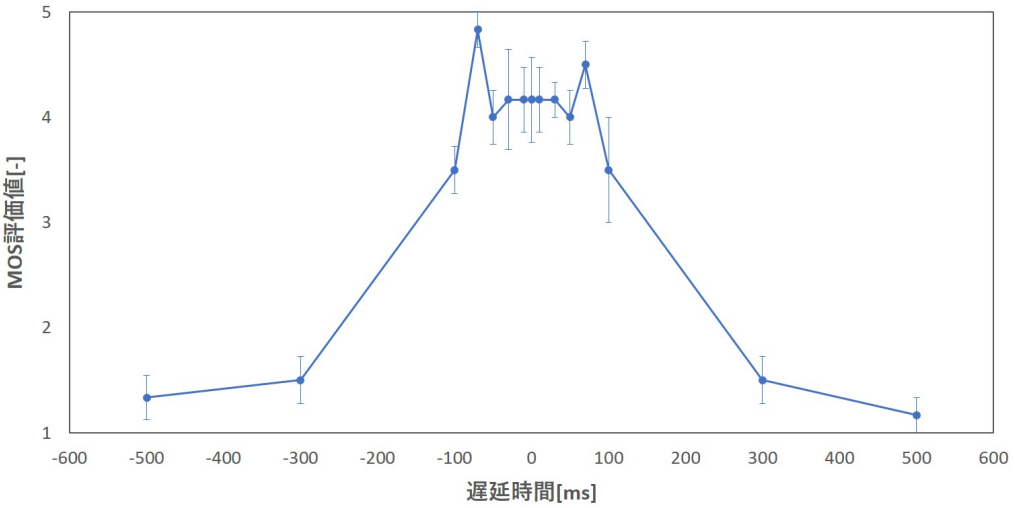


図 4.9 遅延知覚実験におけるMOS評価平均値

表 4.3 触感コンテンツにおける映像・音声と振動触覚の遅延知覚の評価

	被験者						
遅延時間 [ms]	A	B	C	D	E	F	評価平均値 [-]
500	1	1	1	1	2	1	1.17
300	2	1	1	1	2	2	1.50
100	4	4	2	5	4	2	3.50
70	4	4	4	5	5	5	4.50
50	3	4	4	4	5	4	4.00
30	4	4	4	5	4	4	4.17
10	3	5	4	4	5	4	4.17
0	3	3	5	4	5	5	4.17
-10	3	4	5	4	4	5	4.17
-30	2	4	4	5	5	5	4.17
-50	3	4	5	4	4	4	4.00
-70	4	5	5	5	5	5	4.83
-100	3	4	4	3	4	3	3.50
-300	1	1	1	2	2	2	1.50
-500	1	1	1	1	2	2	1.33

4.5.4 振動触覚の同期

記録に関するシークエンスにおいて，最も重要となるのは別々に保存される映像・音声と振動触覚の同期である．ここで，映像と音声のファイルはそれぞれすでに MP4 ファイルにおいて同期が実現しているものとし，MP4 ファイルに含まれる音声ファイルとノードよりアップロードされてくる振動触覚ファイルの定常的な差分を計測したところ信号波形ベースでの測定では 70 − 80ms 程度，音声信号が長く記録されていることが確認された．以降でこの同期ズレについて検討を行う．

ここで確認された遅延はアプリケーションにおける入出力ノードとの連携時におきるものだと考えられたため，この定常的な遅延について考察を行った．Android において音声の記録はマイク入力より得られるモノラルの信号（サンプリングレート：16bit，44.1kHz）はデフォルトの音響圧縮である AAC によって非同期にエンコードされる．AAC のエンコードでは最初に 1024 サンプルをエンコーダに入力しなければいけないため，44.1kHz においては約 23ms 程度の遅延が少なからず発生することになる．また，本アプリでは，Android における音声記録時に最初に入力信号が入力されるタイミングで，ノードに対して記録を開始するコマンドを USB シリアルによってノードへ送出するため，入出力ノードではコマンド文字列の受信処理によって Android アプリが送信したタイミングからバッファが信号で埋まるまでのタイミングにズレが生じている．記録において総じて起きるデバイス間での遅延は，遅延時間を Tl[ms]，ノードで取得される 1 サンプルあたりのバイト数を SB[byte]，サンプリングレートを Sr[kHz]，信号のビット深度を Qb[bit]，開始コマンドを受けてからノードのバッファが埋まるまでの時間を Tl_{node}[ms] とすると，以下の式で表される．

$$Tl = SB \times 8 \div Qb \div Sr + Tl_{node} \tag{4.1}$$

と表される．ノードにおけるビット深度とサンプリングレート，1 サンプルあたりのバイト数はそれぞれ 16bit，48kHz，4096Byte である．また，実機を用いて測定したところ，Android よりコマンドを受け取った後に受信バッファがいっぱい

になるまでの時間（Tl_{node}）は 32ms で一定であった．これを用いると

$$\begin{aligned} Tl &= SB \times 8 \div Qb \div Sr + Tl_{node} \\ &= 4096 \times 8 \div 16 \div 48 + 32 \\ &= 42.666... + 32 \\ &= 74.666...[ms] \end{aligned}$$

となる．

そこで，本アプリでの同期は Android 側にアップロードされてくる振動触覚が保存されている WAVE ファイルに対してここで算出された 74.6ms 程度の遅延時間分の無振動信号を入れ込むことで同期の実現を行うこととした．

4.6. 記録システムの遅延評価実験

4.6.1 実験目的

ここでは，触感コンテンツにおける各メディアファイルの遅延評価を行うため，映像・音声・振動触覚の 3 要素がそれぞれ同期され記録されているかを確認する．記録用アプリケーションでは，映像と音声は 1 つの MP4 ファイルに保存されるため，この MP4 ファイル内部において同期は行われているものとして，入出力ノードにて記録される振動触覚と動画との同期について検証を行う．

4.6.2 実験方法

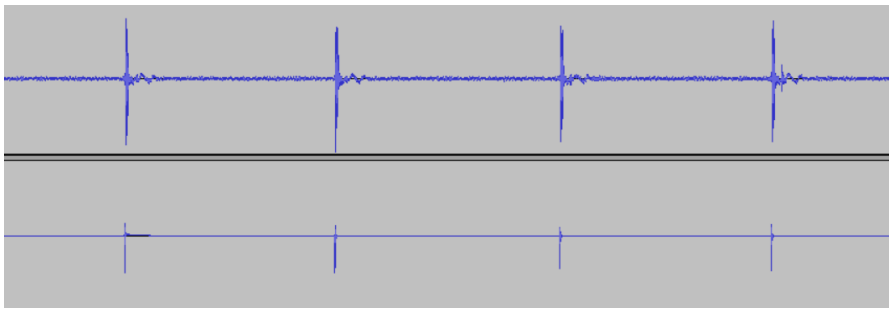
記録用アプリケーションを用いて触感コンテンツの記録を 5 回程度行い，記録された MP4 ファイルと振動触覚が記録された WAVE ファイルを取得する．記録する触感コンテンツは音声を記録する本体側のマイクと触感記録用マイクに同タイミングで波形を入れ込むために触感記録用マイクが内蔵されている部分を机にタップさせる．これによって，表面とマイク部が接触した際の振動と“ コツン ”というような音を取得し，これらの波形のずれを可視化ソフトを用いて目視にて

確認する．この計測では音声波形を基準として早く記録された場合を負，遅れて記録された場合を正とする．

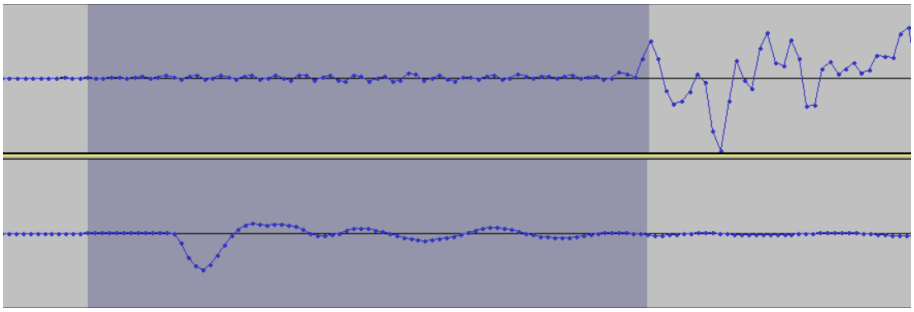
4.6.3 実験結果

実際に記録した音声と振動触覚の波形を図 4.10 に示す．図 4.10 において上が音声波形であり，下が振動触覚の波形である．ここで一部を拡大（図 4.10(b)）すると，音声と振動触覚で立ち上がりにズレが有り，その間隔においてサンプル数が 80 となっていることから約 1ms 分，振動触覚が早く記録されていることから遅延時間は-1ms となる．次に施行した 50 回分の遅延時間を図 4.11 に示す．結果より，遅延の最大値は 3.2ms であり平均値は ±1.2ms であった．この結果から，前節で明らかとなった遅延知覚への影響がない ±30ms を大きく下回っているため，本記録システムにおいても知覚に影響を及ぼさない程度に同期した触感コンテンツの記録を行えていることが明らかとなった。

この遅延は，Andorid アプリケーション側から録画コマンドを送るまでにマイク入力より得られた音声信号のバッファリングによって起こるものであると考えられる．ソフトウェア側では音声バッファリングは非同期に行われており，ソフトウェア側からは指定したバイト数のバッファを持ってくることしかできないため最初のバッファを取得したタイミングを得ることが難しい．さらに，音声の記録はデフォルトの音響圧縮である AAC によって非同期にエンコードされていくため，マイク入力のバッファ取得のタイミングがそのエンコーダの持つ符号化遅延によって揺らぐ可能性がある．実装に際してこの実験と同様に全体の遅延を計測し，74.6ms 分の無振動信号を挿入することで同期を達成していたが，多数のカメラによる撮影時に用いられるようなタイムコードのような機能を実現することでさらに精密な同期を実現できると考えられる．しかし，今回構築したプラットフォームにおいて触覚情報の双方向通信によるロボット制御などは考慮していないため，1ms を切るような同期は過度であると考えられる．以上から，この記録用デバイスが実用的な映像・音声・触覚の同期を担保していることが示された．



(a) 波形全体



(b) 遅延部分を選択（波形を一部拡大）

図 4.10 記録された音声と振動触覚

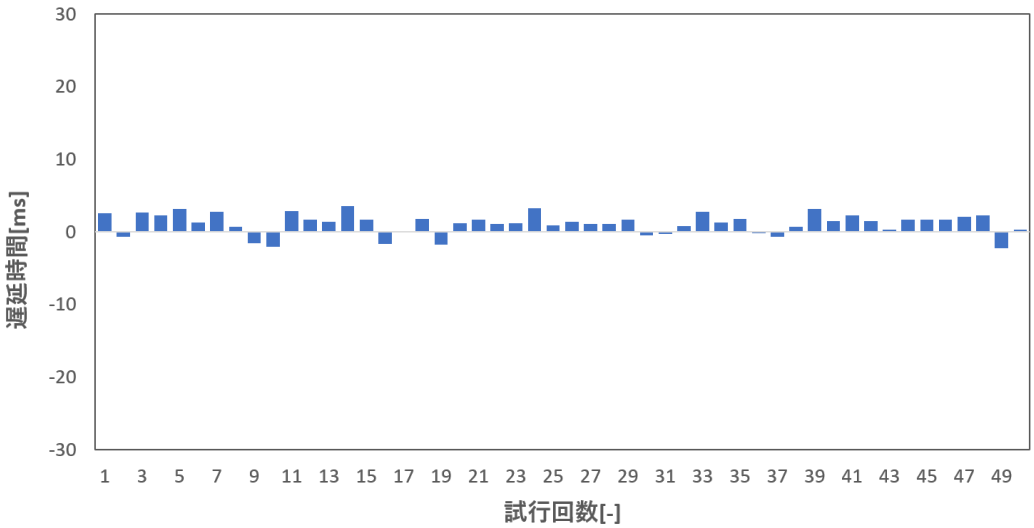


図 4.11 記録時の遅延計測結果（N=50）

4.7. 触感コンテンツの作成と圧縮の検証

4.7.1 OSS を用いた触感コンテンツの作成と圧縮

この検証では動画や音声といったメディアファイルを取り扱うデファクトスタンダードの OSS（Open Source Software）である FFmpeg[2]を用いた触感コンテンツを MP4 ファイルフォーマットによる作成と MPEG-4 ALS による振動触覚の圧縮を試みる．触感コンテンツの作成にあたり，触覚記録用マイク（EM246）を用いて実際にマテリアルの触覚を記録を行った（図 4.12）．このとき，触覚の記録と同時に手元と対象を写した動画と環境音をビデオカメラにて記録した．振動触覚は WAVE ファイルフォーマット，動画と音声は 1 つのファイルに MP4 ファイルファーマットにて保存した．ここで，ベルリン工科大学の Web サイトにて公開されているリファレンスソフトウェア[3] を用いて MPEG-4 ALS による振動触覚データの圧縮を行った．振動触覚のデータサイズは圧縮前と比較しておよそ 50%程度削減されていた（10MB → 5MB）．MPEG-4 ALS にて圧縮された振動触覚をデコードし，オリジナルの信号の FFT 解析結果と比較したグラフを図 4.14 に示す．これより，それぞれの FFT の結果が互いに重なり合っていることから，データサイズを削減しつつ，オリジナルの信号のクオリティが維持できていることが確認できた．この後，記録した映像・音声と MPEG-4 ALS にて圧縮された振動触覚をそれぞれ動画編集ソフトにて同期を行い，FFmpeg を用いてファイルを統合した．統合の際，先に示したファイル構造を実現するため，映像・音声が保存されている MP4 ファイルに触覚を格納するためのボックスを追加し，そこにメディアストリームとして追加する方式をとった．コマンドライン上で出力された触感コンテンツのファイル構造を図 4.13 に示す．出力結果から，映像，音声，触覚の順に格納されており，振動触覚に関しては MPEG-4 ALS にて圧縮されていることがわかる．

2 「FFmpeg」https://www.ffmpeg.org

3 「MPEG-4 ALS リファレンスソフトウェア」https://www.nue.tu-berlin.de/fileadmin/fg97/Forschung/Projekte/Beendete_Projekte/MPEG4_ALS/mp4alsRM23.zip

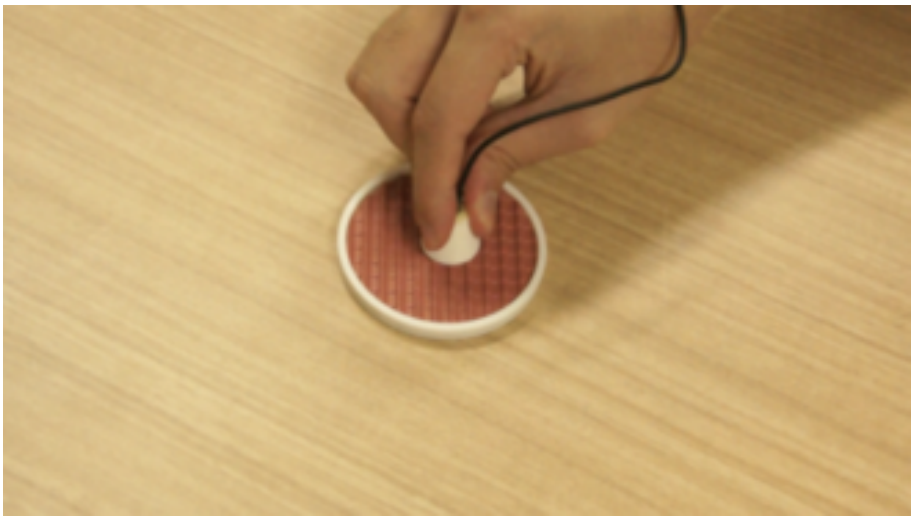


図 4.12 触感コンテンツの記録の様子（“ごつごつしたマテリアル”）

```
Input #0, mov,mp4,m4a,3gp,3g2,mj2, from 'output3.mp4':
  Metadata:
    major_brand     : isom
    minor_version   : 512
    compatible_brands: isomiso2avc1mp41
    encoder         : Lavf58.2.100
  Duration: 00:00:24.57, start: 0.000000, bitrate: 17969 kb/s
    Stream #0:0(und): Video: h264 (High) (avc1 / 0x31637661), yuv42
    Metadata:
      handler_name    : VideoHandler
    Stream #0:1(und): Audio: aac (LC) (mp4a / 0x6134706D), 48000 Hz
    Metadata:
      handler_name    : SoundHandler
    Stream #0:2(und): Audio: mp4als (mp4a / 0x6134706D), 96000 Hz,
    Metadata:
      handler_name    : Haptics
```

図 4.13 触感コンテンツのファイル構造（FFmpeg にて出力）

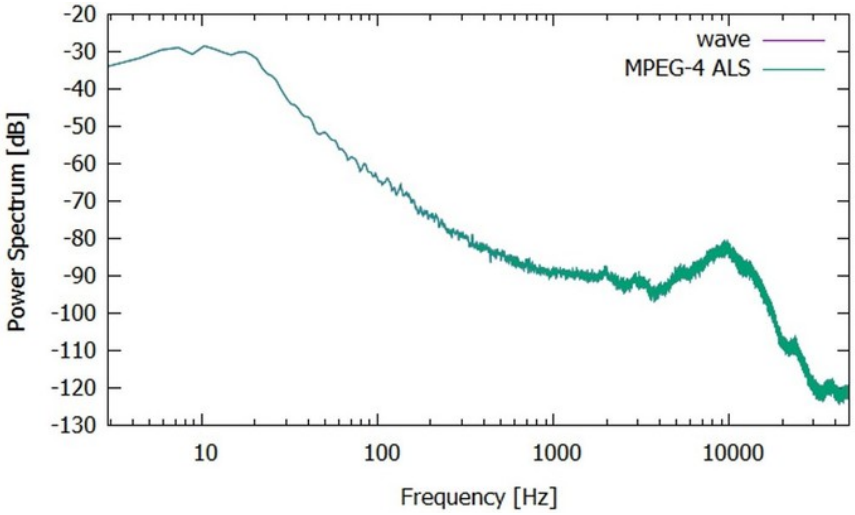


図 4.14 圧縮前後の信号の FFT 解析結果（信号は互いに重なっている）

4.7.2 考察

実験結果より，オープンソースソフトウェアを用いて MP4 ファイルフォーマットのボックスに触覚情報のデータストリーム入れ込むことができた．これによって既存のネットワークインフラ上で映像・音声・触感情報が同期したメディアファイルを伝送共有できることが示唆された．また，MPEG-4 ALS による可逆圧縮を達成しているため，今後入力される触感情報が多重化された場合でも十分にそのデータ量を削減しつつクオリティを担保できることが明らかとなった．これより，MP4 を用いて最大 4ch の振動触覚が映像・音声と同期し，多重化されたメディアファイルを作成できることが確認できた．

4.8. 本章のまとめ

本章では，前章にて示された触感共有プラットフォームの設計要件を元に 1 つの振動触覚を含む触感コンテンツを伝送するプラットフォームの構築を行い，触感コンテンツの記録と伝送・蓄積にフォーカスし検証実験を行った．

はじめにプラットフォームを構成する振動触覚の入出力を行う低レイヤーを担

うノードの構成について述べた．入出力ノードは無線・有線を問わずにスマートフォンなどのハードウェアとの連携を行え，振動触覚以外のセンサ値を入力することもできるような拡張性を持たせた．また，TECHTILE toolkit と同様の記録システムであるため，サンプリングに関するパラメータやオーディオ圧縮を行わないことからこのノードで記録された振動触覚は同様のクオリティを担保できていると考えられる．続いて，ネットワークシステムの実装について述べた．ネットワークシステムではユーザ端末においてアップロードとダウンロードを行うために API サーバ，ストレージサーバ，データベースからなるネットワークシステムの実装を行い，触感コンテンツと共に蓄積される触り心地や対象に関する情報である触感情報の設計を行った．

次に入出力ノードとスマートフォンを用いて作成した記録用デバイスのプロトタイプについて述べた．スマートフォンに装着するカバーに入出力ノードと触覚記録用マイクを内蔵し，ノードと連携することでスマートフォンにて記録される映像・音声と触覚を同時に記録するアプリケーションを実装した．デバイス上で発生する遅延について考慮し，ノードからアップロードされてくる振動触覚のデータに遅延時間分の無振動信号を入れ込むことでこれを最大で ±10ms 程度に抑えた．

遅延知覚の実験より，記録デバイス側で発生する ±10ms の遅延は出力される際にズレによる大きな違和感を与えないことから，記録・再生において実用に耐えうるシステムとして機能することが明らかとなった．

OSS を用いた触感コンテンツの作成と圧縮の検証から，振動触覚の MPEG-4 ALS による可逆圧縮と映像・音声と同期しつつ独立した振動触覚データの格納を確認した．これより，構築したプラットフォーム上において自由に振動触覚データの編集や音声ラインへの多重化を行えることが示唆された．

第 5 章
Validation

5.1. HapticTV

提案した触感コンテンツが将来的に放送網において伝送される未来を見据え，触感が加わった TV コンテンツを再生する HapticTV の制作とデモを行った．

5.1.1 HapticTV の構成

HapticTV の構成を図 5.1 に示す．HapticTV は映像と音声，触覚が一つとなったコンテンツを提供するシステムである．TV コンテンツに合わせて，ソファとクッション，リモコンにそれぞれ異なる振動が提示されるようになっている．ここで取り扱われるメディアファイルは既存の MP4 ファイル形式を用いて 5.1ch オーディオのうち 3ch に振動触覚信号を埋め込んだものである．HapticTV では実際の TV 放送と同じようにチャンネルによって異なるコンテンツが流れる．実際に用意したコンテンツと提示した振動について以下に詳細を示す．

- 花火大会中継：長岡で行われた花火大会の映像に合わせて，実際の会場で体感されるような花火の炸裂時の空気振動がそれぞれのデバイスの振動によって提示される．
- Haptic 体操：出演者のダンスに合わせた振動を提示する．このコンテンツでは振動触覚の記録用マイクを用いて手を叩く，紐を結ぶといった動作時に発生する振動を実際に記録し，これを提示している．
- 子供むけコンテンツ：キャラクターの動きに合わせて，振動が提示される．上下運動をする場面ではソファとクッションを交互に振動させている．

- 自然ドキュメンタリー：生き物の動きや鳴き声を振動として提示する．動きに合わせて振動がソファからクッション，リモコンへといった移動をするように設計されている．
- 出産ドキュメンタリー：実際のエコー映像に合わせて記録された心音を振動として提示する．あたかも腹部に存在しているような感覚を提示するために，主にクッションを振動させている．
- 空手演舞：主に床の振動をソファに提示し，選手の腕や脚が空を切る音を振動としてリモコンに提示している．

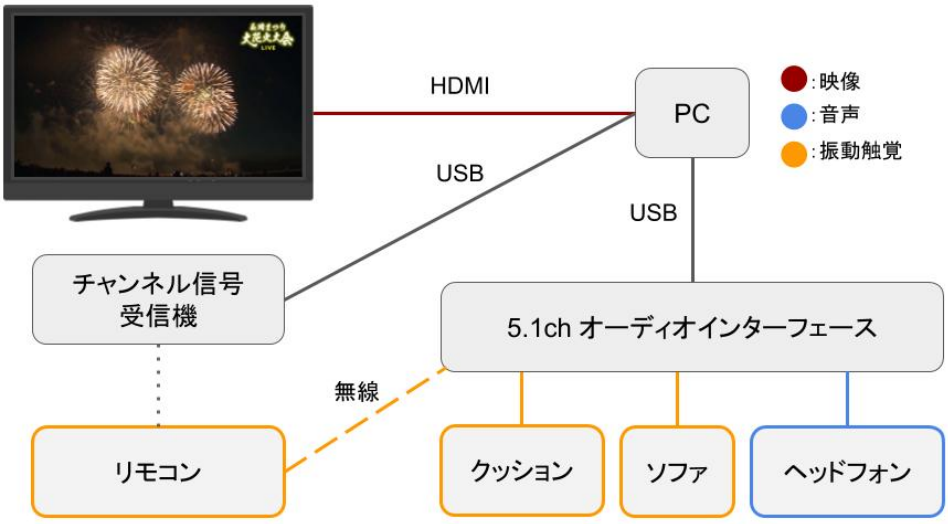


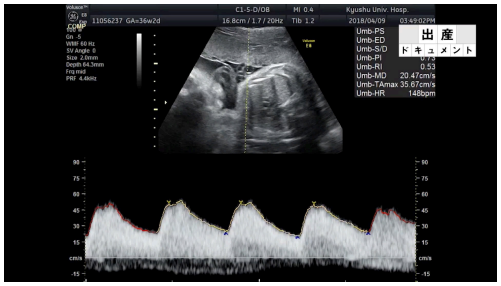
図 5.1 HapticTV のシステム構成

(a) 花火大会中継

(b) Haptic 体操

(c) 子供むけコンテンツ

(d) 自然ドキュメンタリー



(e) 出産ドキュメンタリー

(f) 空手演舞

図 5.2 コンテンツのサムネイル画像

5.1.2 HapticTV のデモ

2018 年 4 月 28，29 日に幕張メッセにて開催されたニコニコ超会議[1] の NTT ブースにて展示を行った．NTT ブースのテーマは「未来の街」であり,「触覚がコンテンツに含まれる近未来の TV 放送」をテーマとしてリビングを模したブースにてデモを行った．2 日間の来場者は延べ 16,000 名を超え，多くの来場者が HapticTV を体験した．来場者は設置されたソファに座り，クッションを膝上，リモコンを手に持った状態でチャンネルを切り替えながら 3 分程度でコンテンツを体験した．デモンストレーションにおいて体験者から，振動が提示されることで音以上に遠近感を感じ取ることができる，コンテンツに集中してしまって体験時間があっという間だったというフィードバックが得られた．これにより，振動触覚が映像と音声と同期することによって臨場感・没入感の向上やコンテキストの明瞭化といった効果を持たらすことがわかった．一方で，提示する位置によって伝わる触感やその意味が異なってしまうというフィードバックもあった．例えば出産ドキュメントのコンテンツでは手に持つクッションを強く振動させていたが，座っているソファからも振動が提示されていることで体験者は自身が胎児になっているのか，それとも胎児を抱いているのかがわかりづらいという意見があり，振動を提示する際にはその触感の意味を考慮した上で触感を提示する位置を決定しなければならないことがわかった．

1 「ニコニコ超会議 2018 公式サイト」，http://chokaigi.jp/

図 5.3 HapticTV のデモンストレーション

5.2. 触感データベース

5.2.1 システムを用いた触感コンテンツの蓄積

構築したプラットフォームと記録デバイスを用いて大量のサンプルデータを取得し，それらを解析することによって触感に基づいたマテリアルの検索や触感情報からの振動触覚の生成を行う事ができる．

その先駆けとして，教材として販売されている裏地・芯地類標本集（図 5.4）の記録を行った．この標本集には裏地として使われる代表的な 52 種類の布地サンプルが収録されており，各サンプルつき，3 往復を 3 試行程度の記録を行った．実際に記録を行ったうち，2 つのマテリアル（ベンヒット，麻芯）における振動触覚信号の波形とスペクトログラムを図 5.5 と図 5.6 に示す．2 つのスペクログラムにおいて信号強度が低い部分が周期的に現れていることから，ここでマテリアル表面上での折返しが発生しており，3 往復分が記録されていることがわかる．２つのマテリアルを比較すると互いに低い周波数成分が記録されており，1kHz 以下の周波数成分において特徴が強く出ている．音楽などの波形であれば 20Hz よりも下は減衰するように設計されているため，作成したデバイスがヒトの皮膚感覚に合

わせた記録を実現できていることがわかる．一方で，麻芯の振動触覚には他の振動と比較してかなり大きなパルス成分が記録されており，単純な周波数成分による解析を行う際にはこのパルスに含まれる周波数成分がノイズとして現れるため，機械学習などにおける教師データとしてこの波形をそのまま用いることは難しい．これを振動触覚の波形のみを用いて改善する場合には，記録者がなぞり速度をあわせる，1 つのメディアファイルには一方向分のなぞりのみを記録するといった記録時のルールを設ける必要があり，記録に対するハードルがかなり大きくなってしまうと考えられる．

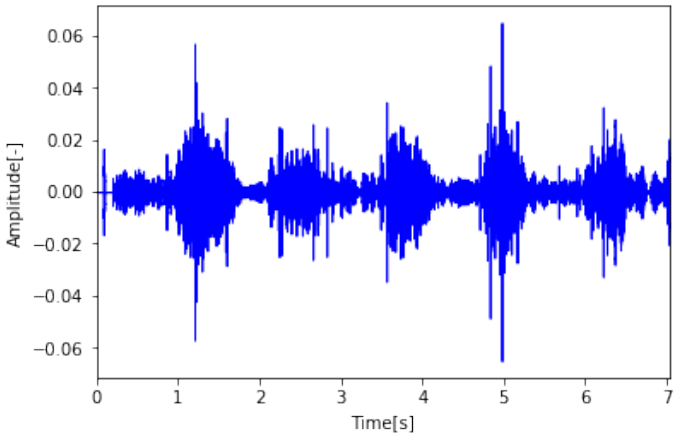
一方で，触感コンテンツは振動触覚以外に映像・音声を含んでいる．例えば映像においてピクセル単位での画面移動が発生している時刻を割り出し，振動触覚信号についてもその時間分を切り出すことによって折返し時のノイズを無視することができるようになる．振動触覚のみによるマテリアルの学習モデルよりも多くの次元を持つ触感コンテンツを用いて学習モデルを生成することで，主観性が抑えられた精度の高い検索やカテゴライズといった応用に役立てられると考えられる．

(a) 外装

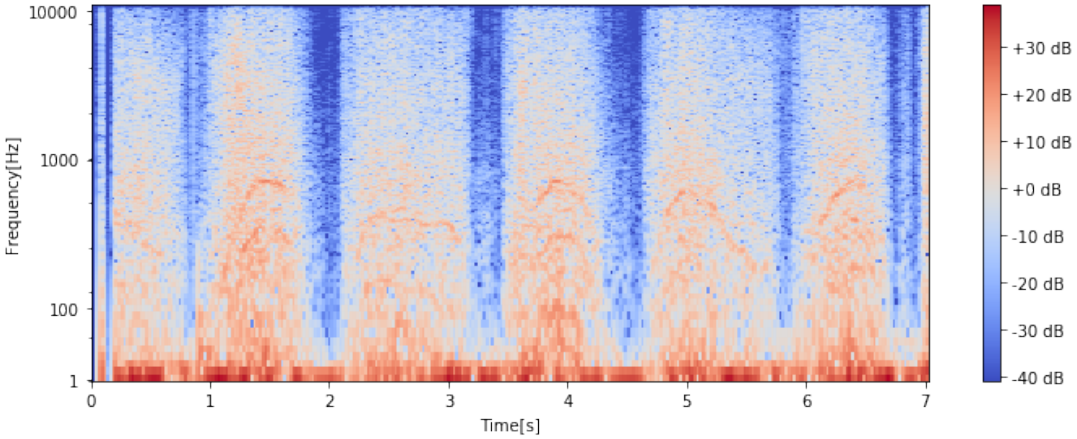
(b) サンプルの例

図 5.4 裏地・芯地類標本集[2]

2 出展：「裏地・芯地類標本集 - 文化学園ショップ」，https://www.bunka-koubai.com/shop/itemdetail.php?n=125

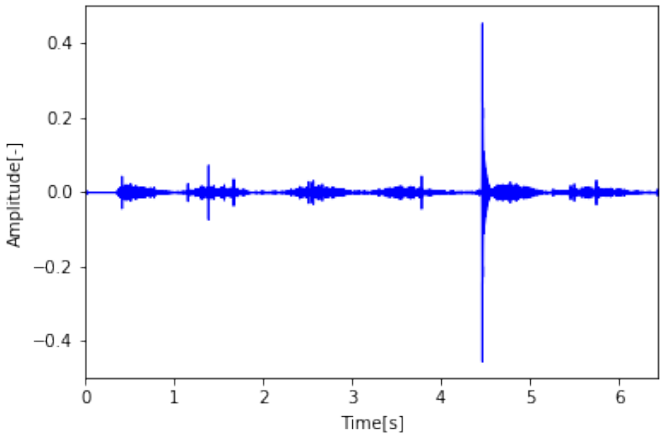


(a) 信号波形

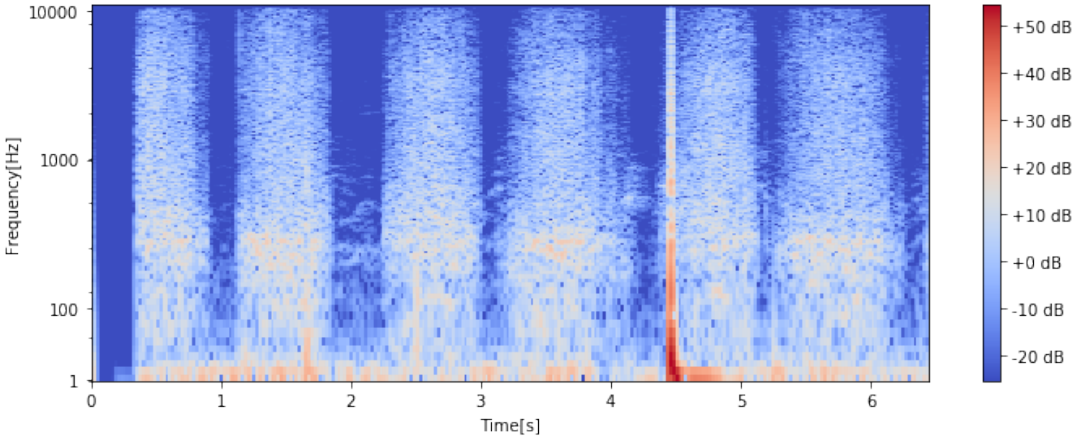


(b) スペクトログラム

図 5.5 振動触覚の信号波形とスペクトラム解析（ベンヒット）



(a) 信号波形



(b) スペクトログラム

図 5.6 振動触覚の信号波形とスペクトラム解析（麻芯）

5.3. デモンストレーションと対外発表

プラットフォームの開発に関する学会発表やデモを行った．ここではその詳細と得られたフィードバックを示す．

MP4 を用いた触感共有プラットフォーム（ポスター発表）ーUbicomp 2018

Ubicomp2018 において，このプラットフォームに関するアイディアと OSS による振動触覚のロスレス圧縮及び MP4 によるデータ統合について発表した．一般にある端末を用いた触覚情報の記録や提示に関して多数の質問を受けたが，その中で実際に IEEE[3]などで標準化に携わってきた研究の方から「これが広まるためには標準化が必須になるがどうやってそこまで持っていこうと考えているのか」といった質問を受けた．MPEG-4 に準拠したファイルフォーマットを用いていることや共同研究としてすでに標準化の動きもあるということを説明したところ，「うまく標準化まで持っていけたら一気に広まるだろう」というコメントが得られた．このポスター発表では，考案したプラットフォームやその応用に関して議論できた．

Internet of Haptics (デモ展示) ーKMD Forum 2018

KMD Forum にて先の検証で用いた HapticTV と記録用システムのデモを行った．二日間で数十名の来場者にこれらを体験していただいた．HapticTV は音や映像が出ていたため，3 歳〜小学生程度の年齢の子供が興味を持ち体験していた．動物の鳴き声や動きが振動として出るコンテンツではクッションより感じられる触感に驚き飛び跳ねるなどの大きなリアクションが見受けられた．1 歳程度の乳幼児が出産ドキュメントのコンテンツを体験した際には，それまで動き回っていたとは思えないほど落ち着いた様子でソファに座っていた．ニコニコ超会議でおこなったデモと同様に映像・音声・触覚が一体となったメディアが没入感をもたらし体験（体感）が向上することを改めて確認できた．また，記録用システムは主

3 「IEEE-SA - The IEEE Standards Association - Home」,https://standards.ieee.org/

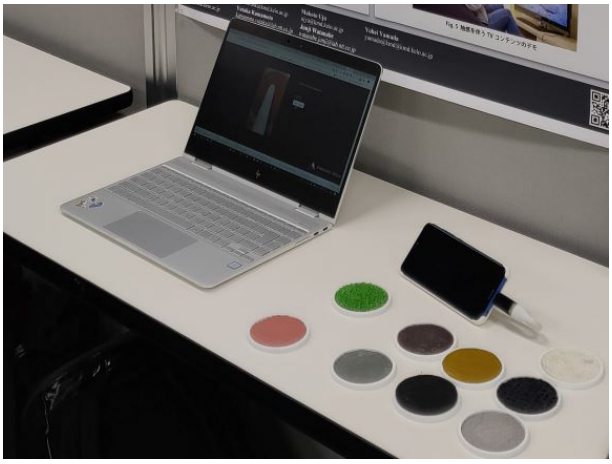
に 10 代後半以上の方に Web 上で動作する閲覧用アプリケーションを用いて，記録と再生を体験していただいた．実際に用意した触感サンプル以外にも体験者が持っていたカバンのファスナー部や自身の衣服を記録するなど，一度の説明で使い方を習得して自由にデバイスを使って触感コンテンツを記録している様子が見られた．

触覚を含むマルチメディアコンテンツを体験共有するためのプロトタイシステム (発表とデモ展示)ーSICE SI 2018

SICE SI2018 において，MP4 を用いた触感コンテンツの提案や伝送プラットフォームについての発表とそれに続いてデモ展示を行った．実際に手元の記録デバイスによる記録とアップロードを行い，それらの再生を PC にて行いシステムの概要の説明を行い，実際に記録について体験していただいた．来場者は記録デバイスに関して大きな興味を持っており，どのようにして動画・音声と別に振動触覚を記録しているのかという質問が多く見受けられた．デバイスの詳細について説明すると，このデバイスまたはシステムを販売する予定は無いのかといった反応が得られた．その一方で，なぜこのスマートフォンと一体化された形なのかといった質問もあり，今回のプロトタイプではカバーできないような映画やドラマといった映像コンテンツのように客観的な視点を含んだ触感コンテンツの作成にもフォーカスすべきだという意見もあった．

図 5.7 デモ展示：KMDForum2018

(a) ポスター発表の様子



(b) デモの様子

図 5.8 デモ展示・ポスター発表：SICE SI2018

5.4. 考察

HapticTV のデモにより振動触覚が付加された事によって TV コンテンツの臨場感や没入感の向上が見られ，5.1ch のうち，2ch をオーディオに割り振り，残った 4ch の信号ラインへ振動触覚を出力するといった触感コンテンツのデータフォーマットがもたらす効果やその柔軟な機能性を確認できた.

データベースへの応用の検証では記録者によるマテリアル上での往復や速度といった個人別に発生してしまうパラメータが純粋な波形の解析を難しくする懸念が見られた. しかし，触感コンテンツに含まれる映像・音声といった別のモダリティの情報を用いた補正や推定を行う事によって解析の精度を向上できると考えられる. いずれも，教師データや学習モデルの作成を行う場合には一定の精度やなぞり方，タグの付け方などの取り決めが必要になってしまうため，一般に利用する場合とデータベースに用いる場合との切り分けが必須となると考えられる.

触感共有プラットフォームのデモ展示や発表を通じて，MP4 を用いた触感コンテンツの構想やこれを共有するプラットフォームを対外的に示すことができた. フィードバックから，実際に普及するために必要な可用性や標準化に向けた準備といった追加実験・検証が必要な部分への指摘もある中で，依然として特殊な環境下で用いられる触覚に対してその一般化が強く望まれていることを改めて確認できた. また，コンテンツ作成にフォーカスした客観視点での触感コンテンツの記録は行えるのかというフィードバックについては MP4 を用いた触感コンテンツの標準化が行われていくなかで必要な要件に合わせたハードウェアの設計やコンテンツの作成が行えるようになっていくと考えられる.

5.5. 本章のまとめ

本章では，4 章にて確認された MPEG-4 に準拠した振動触覚を含む触感コンテンツの効果の検証と触感コンテンツの記録と共有プラットフォームを用いた応用についてデモと検証を行った. 触感コンテンツの効果の検証として触感コンテンツを放送網と融合させた振動触覚を含む TV コンテンツを再生するシステムである HapticTV を用いたデモを行った. 体験者からは，映像と音声に振動が付随する

ことでただ TV を観るよりも映像内の空間を身体で感じられる，体験時間があっという間に終わってしまうほど没入してコンテンツを楽しむことができたというフィードバックが得られ，触感コンテンツがコンテンツの没入感や臨場感を向上させるといった効果を生むことが確認できた.

続いて，蓄積される触感コンテンツによる応用の 1 つとして考えられる触感データベースの構築に向けた先駆けとして布サンプルを用いたデータの収集と学習モデル生成への検討を行った. 実際の記録データから個人や施行ごとに変わってしまうなぞりの速さや折返し時のノイズの発生を考慮しなければならないため，純粋な振動触覚波形の解析のみでは学習モデルを生成することが難しいことがわかった. 触感コンテンツに含まれる映像や音声と組み合わせて，振動触覚を切り出す，または速度を求めて主観性をできるだけ取り除くといった対策が考えられた.

次に触感コンテンツに関する提案や構想，試作したデバイスとプラットフォームについて，Ubicomp 2018，KMD Forum 2018，SICE SI 2018 にてデモ展示と対外発表を行った. この結果，触感コンテンツの構想に対するアドバイスや今後の商品化・標準化による一般での利用が待ち遠しいといった意見が得られた.

第 6 章
Conclusion

本論文では，日常における触覚を伴った身体的な体験を共有するために映像・音声・触覚によって構成されるマルチメディアを触感コンテンツと定義し，MPEG-4に準拠した触感コンテンツのフォーマットと，触感コンテンツをインターネット上で伝送・蓄積する触感共有プラットフォームを提案した．このプラットフォームの確立に向けて，1つの振動触覚を含む触感コンテンツの記録にフォーカスした触感コンテンツの記録・伝送を行うデバイスやサーバを始めとしたネットワークシステムを構築した．

第1章では，インターネットの発展によって変容してきた人を取り巻くメディアと触覚技術の進歩による従来の視聴覚に基づいたメディアデータと触覚情報との融合の可能性について示し，本研究の目的を述べた．

第2章では，本論文で述べる「触覚」と「触感」の違いについて述べ，基本的な触覚の計測・提示の技術やそれらを用いた実社会や研究領域での動向を示した．また，現在行われている高解像度の視聴覚情報の伝送による高臨場感通信やこれらの伝送において用いられているメディアデータのフォーマットやオーディオの圧縮法について紹介し，本論文で取り扱う領域を述べた．

第3章では，映像・音声・振動触覚から成るマルチメディアを触感コンテンツと定義し，MPEG-4の規格に準拠した触覚情報の符号化の提案とこれを伝送する触感共有プラットフォームのコンセプトとその応用について述べた．これらに基づいてネットワークインフラ上における触感コンテンツのユースケースを考慮し，提案する触感共有プラットフォームの設計要件を述べた．

第4章では，前章で示した要件を元に1つの振動触覚信号を含む触感コンテンツの作成とそれを共有するプラットフォームの試作を行った．はじめに，プラット

フォームの最も下のレイヤーを担う触感の入出力ノードの構成や実装について述べ，ユーザー端末を用いたアップロードやダウンロードを行う API サーバやストレージ，データベースから構成されるネットワークシステムの実装やデータベースに登録される触感情報の設計について示した．これらを用いて，1 つの振動触覚を含む触感コンテンツの記録を行うデバイスを作成し，ネットワークシステムへのアップロードが行えることを確認した．プラットフォームにおいて必須となる同期についての検証を行ったところ最大で ±10ms 程度の同期ズレが発生していることがわかった．遅延知覚実験の結果から，リアルタイムでのロボット制御といった用途でなければ体感に大きく影響しないことから十分に違和感なく提示できると考えられた．

第 5 章では MPEG-4 に準拠した振動触覚を含む触感コンテンツの効果の検証と触感共有プラットフォームを用いた応用について検証した．触感コンテンツの効果の検証として 3ch の振動触覚を含む放送網におけるコンテンツを提示する HapticTV のデモを行い，触感コンテンツがコンテンツの没入感や臨場感を向上させるといった効果を生むことを確認した．次に，蓄積される触感コンテンツによる応用の 1 つとして考えられる触感データベースの構築に向けた先駆けとして布サンプルを用いたデータの収集と学習モデル生成の検討を行った．実際の記録データから個人や施行ごとに変わってしまうなぞりの速さや折返し時のノイズの発生を考慮しなければならないため，純粋な振動触覚波形の解析のみでは学習モデルを生成することが難しいことがわかった．また，触感コンテンツに関する提案や構想，試作したデバイスとプラットフォームについて，Ubicomp 2018，KMD Forum 2018，SICE SI 2018 にてデモ展示と対外発表を行った．この結果，触感コンテンツの構想に対するアドバイスや今後の商品化・標準化による一般での利用が待ち遠しいといった意見が得られた．

本研究で実装を見送った再生側については，再生するユーザーが能動的に手や指を動かすことによってその質感が向上すると考えられることから，単に 1 つの端末が震えるだけでなくそれを再生する際に端末の動きによって動画を再生する，再生速度を変更するといった工夫が必要となることが示唆された．

また，本研究は NTT コミュニケーション科学基礎研究所と KMD との共同研究

プロジェクトの中で行われたものであり，本論文の執筆時点ですでに IEC[1]において触感コンテンツの標準化に向けて並行し進められている．今回の研究より得られた MP4 を用いた振動触覚の格納や圧縮法の知見やプラットフォームに蓄積されたデータなどはすべて標準化の材料として用いられる．今後，この標準化に沿って周辺機器やシステムの開発が行われていくため，本研究で洗い出された触覚を含むコンテンツの普及に必要な PC やスマートフォンといった端末での記録・再生を行うデバイスや同期の問題も徐々に解決されていくと考えられる．

今後の展望として，標準化が進んで行く中で今よりもさらにシステムに触覚を組み込むことが容易になれば 1 つの振動触覚だけでなく，複数の振動触覚やそれ以外の温覚や圧覚といった情報をも 1 つのマルチメディアファイルとして端末で共有することが可能となり，現在の SNS でテキストや映像をシェアするかのように気軽に触感コンテンツを互いに送り，より高い解像度の体験を共有できるようになると考えられる．

1 「IEC — International Electrotechnical Commission」，https://www.iec.ch/

謝　　辞

本研究の主指導教員であり，私が高専在学中に参加したインターンシップより約4年半に渡って，多くの研究や学会投稿の機会を頂き，その度に的確なご指導をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太准教授に心より感謝いたします．インターンシップでお会いしてからというもの，度々大学院にお邪魔させていただき，研究室という刺激的な場所で多くの先輩方や先生方と研究活動に励み，数多くのプロダクトと思い出を創れたことがこの論文を執筆するに至る大きな架け橋となりました．

入学前より研究や進路のご相談に乗っていただいたり，本論文の執筆や研究について数多くのご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．興味本位の話から研究の議論まで，幅広くお話させていただく中で多くのことを学び成長できたと感じています．

研究指導や論文投稿においてご助力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 Roshan Peiris 特任講師に心より感謝いたします．私の拙い英語での相談や議論でも答えが出るまで，親身に対応していただけたことが国際学会への参加に繋がっています．

また，共同研究として本研究を行っていく中で NTT コミュニケーション科学基礎研究所の鎌本優さん，渡邊淳司さんには大変お世話になりました．皆様のおかげで振動触覚を用いたコンテンツの可能性を示せるとともに，自身が興味を持っていた触覚の圧縮のような専門的な研究まで幅広く取り組むことができました．今回の成果が標準化に向けての一歩に役立てることを祈っています．

Embodied Media と Network Media の合同プロジェクトである Internet of Haptics プロジェクトのメンバーの加藤大弥さん，眞保ありあさん，鵜重誠さん，山田陽平さんには，本プロジェクトにおける実験や展示，実装まで多くのことに一

緒に取り組んでいただけました．

加藤大弥さんとは3年という長い期間の中で，インターネットやWebの技術に関するアドバイスや実装をお手伝いいただき，自身の進路を決めていくにあたって本当にお世話になりました．出張先で私が目覚めた時に構想していたネットワークシステムが目の前で動いていたという出来事はものづくりや技術に対する意識を劇的に変え，自身の将来に大きな影響を与えました．

鵜重誠さんには，ネットワークシステムの設計や構築を行っていただきました．鵜重さんの持つ類まれな知識や実装力によって他愛のない話ですらアイディアやアドバイス，そしてプロダクトに昇華していました．まだまだ，技術者として駆け出しの自分にとって鵜重さんは目指すべき指標であると思っています．

山田陽平さんには，アプリケーションの実装をお手伝いいただき，期限が迫るなかでお互いに全力で取り組むことができました．実装だけでなく経験に基づいた論文へのアドバイスなど，広範囲に渡ってサポートしていただけました．

眞保ありあさんには，展示に際してのものづくりや設営などをお手伝いいただきました．私が得意でない内容に進んでご助力いただけたことが研究や展示の成功に繋がっています．

皆様のお力がなければこの研究は成り立っていなかったと強く思います．プロジェクトとしては1年という短い期間だったかもしれませんが，みなさんと過ごせたこの時間を忘れることはありません．本当にありがとうございました．

研究や学生生活においてご助力いただけたEmbodied Media，Network Mediaのスタッフや学生の皆様に感謝の意を表します．最後に大学院への進学や生活面で多くをサポートしていただいた家族に心より感謝いたします．みなさま本当にありがとうございました．

参 考 文 献

[1] Tim Berners-Lee, Robert Cailliau, Jean-François Groff, and Bernd Pollermann. World-wide web: The information universe. *Internet Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 52–58, 1992.

[2] Anthony W Hodgkinson. The medium is the massage, 1967.

[3] Charles Spence, Michael ER Nicholls, Nicole Gillespie, and Jon Driver. Cross-modal links in exogenous covert spatial orienting between touch, audition, and vision. *Perception & Psychophysics*, Vol. 60, No. 4, pp. 544–557, 1998.

[4] 伴祐樹, 梶波崇, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. Pseudo-haptics を利用した形状提示のための視触力覚システムに関する基礎的検討. 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 110, No. 382, pp. 347–352, 2011.

[5] 岡崎龍太, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. 2a2-a14 触覚-聴覚間における周波数的協和性 (触覚と力覚 (2)). ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2013, pp. _2A2–A14_1. 一般社団法人 日本機械学会, 2013.

[6] 仲谷正史, 筧康明, 三原聡一郎, 南澤孝太. 触楽入門 はじめて世界に触れるときのように, 2016.

[7] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.

[8] 前野隆司. 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.

[9] Yoshihiro Tanaka, Duy Phuong Nguyen, Tomohiro Fukuda, and Akihito Sano. Wearable skin vibration sensor using a pvdf film. In *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, pp. 146–151. IEEE, 2015.

[10] Harris Kristanto, Prathamesh Sathe, Alexander Schmitz, Tito Pradhono Tomo, Sophon Somlor, and Shigeki Sugano. A wearable three-axis tactile sensor for human fingertips. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 4313–4320, 2018.

[11] Laura Winfield, John Glassmire, J Edward Colgate, and Michael Peshkin. T-pad: Tactile pattern display through variable friction reduction. In *Euro-Haptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, pp. 421–426. IEEE, 2007.

[12] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for designing haptic media. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 22. ACM, 2012.

[13] 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*, p. 10. ACM, 2015.

[14] Satoshi Matsuzono, Haruki Nakamura, Daiya Kato, Roshan Peiris, and Kouta Minamizawa. Hapti/o: Physical i/o node over the internet. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 193–203. Springer, 2018.

[15] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Benjamin Outram, Kouta Minamizawa, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, p. 20. ACM, 2016.

[16] Matti Strese, Yannik Boeck, and Eckehard Steinbach. Content-based surface material retrieval. In *World Haptics Conference (WHC), 2017 IEEE*, pp. 352–357. IEEE, 2017.

[17] Kentaro Yoshida, Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. VibVid: VIBration Estimation from VIDeo by using Neural Network. In Robert W. Lindeman, Gerd Bruder, and Daisuke Iwai, editors, *ICAT-EGVE 2017 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*. The Eurographics Association, 2017. doi:10.2312/egve.20171336.

[18] Toshio Asano, Yutaka Ishibashi, and Seiji Kameyama. Interactive haptic transmission for remote control systems. In *Multimedia and Expo, 2006 IEEE International Conference on*, pp. 2113–2116. IEEE, 2006.

[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, pp. 1980–1990, New York, NY, USA, 2016. ACM. URL: http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858481, doi:10.1145/2858036.2858481.

[20] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, T Maeda, and S Tachi. Electro-tactile display with tactile primary color approach. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 10, pp. 1–13, 2004.

[21] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Kyo Hirota, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Telesar v: Telexistence surrogate anthropomorphic robot. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, p. 23. ACM, 2012.

[22] Meryem Simsek, Adnan Aijaz, Mischa Dohler, Joachim Sachs, and Gerhard Fettweis. 5g-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in*

Communications, Vol. 34, No. 3, pp. 460–473, 2016.

[23] ISO Central Secretary. Information technology – coding of audio-visual objects – part 14: Mp4 file format. Standard ISO/IEC 14496-14:2003, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2003. URL: `https://www.iso.org/standard/38538.html`.

[24] ISO Central Secretary. Information technology – coding of audio-visual objects – part 3: Audio amendment 2: Audio lossless coding (als). Standard ISO/IEC 14496-3:2005/Amd.2 2006, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2006. URL: `https://www.iso.org/standard/50831.html`.

[25] ISO Central Secretary. Information technology – coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 mbit/s – part 3: Audio. Standard ISO/IEC 11172-3:1993, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 1993. URL: `https://www.iso.org/standard/22412.html`.

[26] JM. Valin, K. Vos, and T. Terriberry. Definition of the opus audio codec. RFC 6716, RFC Editor, September 2012.

[27] Yutaka Kamamoto, Noboru Harada, and Takehiro Moriya. Multichannel linear prediction method compliant with the mpeg-4 als. *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences*, Vol. 91, No. 3, pp. 756–762, 2008.

[28] 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司. オノマトペを利用した触り心地の分類手法 (＜特集＞ アート & エンタテインメント 2). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 487–490, 2010.

[29] 宮里勉, 岸野文郎. 視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価. テレビジョン学会誌, Vol. 49, No. 10, pp. 1353–1356, 1995.

関 連 発 表

国際会議

1. Haruki Nakamura, Nobuhisa Hanamitsu, Kouta Minamizawa, ”A(touch)ment: a smartphone extension for instantly sharing visual and tactile experience”, Augmented Human 2015, Singapore, 2015.

2. Haruki Nakamura, Daiya Kato, Roshan Peiris, Kouta Minamizawa, Yutaka Kamamoto, Junji Watanabe, ”Construction of Haptic Experience Sharing Platform”, Ubicomp 2018, Singapore, 2018.

国内学会

1. 中村 開，加藤 大弥，鵜重 誠，山田 陽平，南澤 孝太，鎌本 優，渡邊 淳司，“触覚を含むマルチメディアコンテンツを体験共有するためのプロトタイプシステム”，第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，2018，12.