

Title	Haptl/O : IP伝送技術を用いた触覚伝送ノードの開発
Sub Title	Haptl/O : physical node for the Internet of Haptics
Author	松園, 敏志(Matsuzono Satoshi) 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	2017
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2017年度メディアデザイン学 第618号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002017-0618

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 2017年度（平成29年度）

HaptI/O: IP 伝送技術を用いた
触覚伝送ノードの開発

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

松園 敏志

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。

松園 敏志

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

加藤 朗 教授 (副査)

中村 伊知哉 教授 (副査)

修士論文 2017年度（平成29年度）

HaptI/O: IP 伝送技術を用いた 触覚伝送ノードの開発

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

情報技術と触覚技術の発展に伴い、人の触体験をネットワーク越しに共有することが可能となってきた。このようなネットワーク上における触覚を用いた身体的経験の共有システムの概念を Internet of Haptics (IoH) と名付け、本論文では触体験の共有における触覚伝送のプラットフォームの確立を行う。本概念を確立するため、触覚情報を伝送するプラットフォームまた、身体や有体物の触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード「HaptI/O」を開発した。複数の HaptI/O がサーバーに接続され、1つのノードから複数のノードまた、1対1の相互接続を提供することで、HaptI/O を使用して他者の身体的経験の中で得られる触体験を共有することができる。HaptI/O のシステムを実装し、検証実験、デモンストレーションを実施することで本システムの有効性を示した。

キーワード：

触覚，インターネット，触覚伝送，I/O デバイス，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

松園 敏志

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2017

HaptI/O: Physical Node for the Internet of Haptics

Category: Science / Engineering

Summary

Along with the development of information technology and tactile technology, it has become possible to share human haptic experiences via the Internet. We propose the concept of the “Internet of Haptics” (IoH) that enables sharing experiences of others with the sense of touch. IoH allows to multicast haptic sensation from one Sensor-Node to multiple Actuator-Node and to multicast from multiple Sensor-Node to multiple Actuator-Node via the Internet. As a proof of concept, we developed the “HaptI/O” device which is a physical network node that can perform as a gateway to input or output the haptic information to/from the human body or tangible objects. Multiple HaptI/O would be connected on the IoH server and transmit the haptic information from one node to multiple nodes as well as one to one mutual connection so that HaptI/O enables us to share our experiences with the sense of touch. We implemented the system of HaptI/O, demonstrated the effectiveness of this system by carrying out verification experiment and demonstration.

Keywords:

Haptics, Internet, Haptic Transmission, I/O Device, Embodied Media

Keio University Graduate School of Media Design

Satoshi Matsuzono

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. 触覚情報のネットワーク化	2
1.3. 本研究の目的	3
1.4. 本論文の構成	4
第 2 章 関連研究	5
2.1. 高臨場感通信	5
2.2. マルチキャスト技術	7
2.3. 触覚伝送技術	9
2.4. Haptic over the Internet	11
2.5. 本章のまとめ	14
第 3 章 Internet of Haptics の提案	15
3.1. IoH のコンセプト	15
3.2. HaptI/O の提案	18
3.2.1 ハードウェアデザインと設計要件	18
3.2.2 ネットワークシステムデザイン	19
3.2.3 HaptI/O 利用のシナリオ	20
3.3. 本章のまとめ	21
第 4 章 HaptI/O の実装と評価	22
4.1. HaptI/O のハードウェア実装	22
4.1.1 ハードウェアの構成	22

4.1.2	システム構成	25
4.2.	ネットワーク実装	26
4.3.	ソフトウェア実装	27
4.3.1	各デバイス間のシステム実装	27
4.3.2	HaptI/O のユーザーインターフェース (UI)	29
4.4.	触覚伝送速度の検証実験	31
4.4.1	実験目的	31
4.4.2	実験方法	31
4.4.3	実験結果	31
4.5.	粗さ弁別実験	35
4.5.1	実験目的	35
4.5.2	実験内容	35
4.5.3	実験結果	36
4.6.	触感伝送後の品質検証	37
4.6.1	実験目的	37
4.6.2	実験方法	37
4.6.3	実験結果	38
4.7.	デモンストレーション	43
4.8.	考察	44
4.9.	本章のまとめ	47
第5章 結論		48
謝辞		51
参考文献		53
関連発表		58
国際会議		58
国内学会		58

目 次

1.1	5G 触覚伝送コンテンツ	2
2.1	高臨場感システムの応用例	6
2.2	次世代型ライブビューイングのイメージ	7
2.3	Skype	8
2.4	Skyway	8
2.5	Wi-Fi マルチキャスト	9
2.6	InTouch	10
2.7	TECHTILE toolkit	10
2.8	インターネット越しの触覚伝送の課題	11
2.9	Tele-cLINK	13
2.10	inFORM	13
2.11	Twech	13
2.12	Huggy Pajama	13
3.1	IoH のアプリケーション例	16
3.2	IoH のコンセプト図	17
3.3	HaptI/O の概念図	19
3.4	ネットワークシステムデザイン	20
4.1	ハードウェアデザイン	23
4.2	HaptI/O に含まれる各素子の接続図	24
4.3	製作した4つのHaptI/O デバイス	24
4.4	HaptI/O のシステム構成図	25

4.5	実装したネットワーク構成図	27
4.6	Web 常に登録されている IP アドレス	30
4.7	送受信ノード選択画面	30
4.8	触覚伝送速度実験の実験構成図	32
4.9	触覚伝送速度実験の実験環境	32
4.10	触覚伝送速度検証結果	34
4.11	粗さ弁別実験の様子	36
4.12	粗さ弁別実験結果	37
4.13	触感の品質評価実験で使用したマテリアル	38
4.14	触感の品質評価実験結果	39
4.15	フーリエ解析結果 (ごつごつ)	40
4.16	フーリエ解析結果 (じよりじより)	40
4.17	フーリエ解析結果 (ふわふわ)	41
4.18	フーリエ解析結果 (つるつる)	41
4.19	フーリエ解析結果 (さらさら)	42
4.20	フーリエ解析結果 (ざらざら)	42
4.21	VRSJ の展示の様子	44
4.22	UIST の展示の様子	45
4.23	KMD Forum2017 の展示の様子 1	46
4.24	KMD Forum2017 の展示の様子 2	46
4.25	KMD Forum2017 の展示の様子 3	46

表 目 次

4.1	触覚伝送速度の検証結果	33
4.2	触感の品質評価実験結果	39

第1章 序

論

1.1. はじめに

1990年代からインターネットサービスが普及して以来、今日に至るまで情報化技術は日々進歩を遂げている。インターネットに接続される端末は、安価で小型かつ高性能になっており、今では1人が複数の端末を所持する時代となった。また、2000年代から普及し始めたスマートフォンやタブレットにより、全世界の人がインターネットを使用する環境が整い、いつでもどこでもインターネットサービスを使用することが可能となった。端末の使われ方も変化を遂げ、昔はwebブラウジングや、メールの送受信等でしか使用されなかったが、現在ではネットショッピングやオンラインゲーム、教育のツールとして使用されている。最近では、LINEやFacebook、Instagramのようなソーシャルネットワーキングサービス(SNS)を用いて自身の日常における様々な体験を映像や音声、文字で表現し沢山の人と共有することができるようになっている。

一方触覚技術の進歩は、人々が自身の身体を通じて得る様々な経験を再現できるようになっている。”触覚とは人の身体と環境の直接的接触によって生み出される感覚” [1]である。特にバーチャルリアリティ(VR)やエンタテインメントの分野において、視聴覚を主とした現実感の再現に加えて、VR空間にある物体を実際に「触った感じ(触感)」が得られる「触覚フィードバック」を付加することで、より臨場感や現実感の増した身体的体験を提示することが試みられている。VRへの没入感を高める上で重要な触覚技術は、今後VR体験をより一般化し、VRを使ったビジネスを発展させていくと考えられる。

最近では、5Gのような次世代インターネットをはじめとした高速ネットワーク

インフラストラクチャーと低コスト化によって、大容量のデータ情報の伝送や収集、解析技術が発展してきている。将来的に、次世代インターネット通信 5G は、遠隔地のユーザーとリアルタイムで触覚コミュニケーションを行う事を可能にできると考えられる [2] [3] [4]。

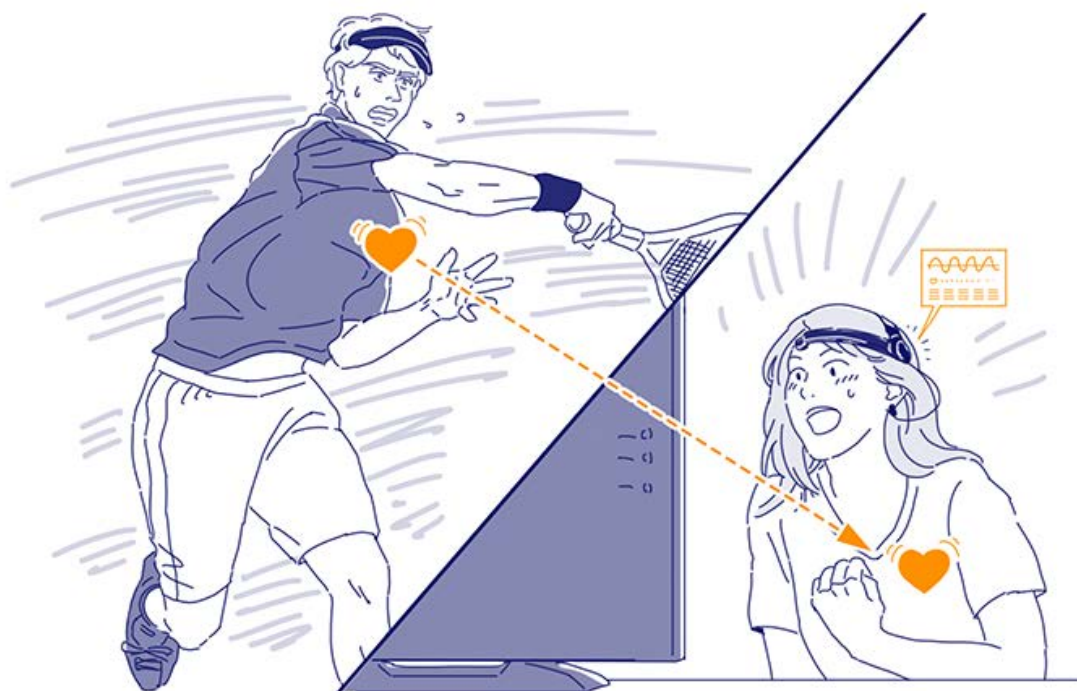


図 1.1: 5G 触覚伝送コンテンツ¹

1.2. 触覚情報のネットワーク化

センサネットワークや高速ネットワークインフラ、モバイル技術の発展に伴い、Internet of Things の概念の普及し、文字や音声、映像、環境情報等におけるネッ

1 出展：「au 5G: 新しい日々を。5G と。」, <http://www.officegamespot.com/quarterbackchallenge-2009.htm>

トワークを経由した多様な情報の収集と分析，共有の技術は飛躍的に伸びており，実社会における活用が進みつつある．これらの情報は第三者的な観測が比較的容易な客観的情報であり，環境内に設置したセンサ等によって計測可能である．

一方で前節でも述べたように，触覚とは人の身体と環境の直接的接触によって生み出される感覚である．Rubber Hand Illusion [5] の心理学実験が示す通り触覚は，自己と相反する境界を含む身体と密接に関連していることが知られている．そのため，触覚情報は，環境側から観測が極めて困難な主観的情報である．その結果，従来の触覚を記録し再生するデバイス [16] [17] [19] は，体験の記録，再生にとどまっておりネットワーク上での収集と分析，共有の基盤は構築されていない．この情報を伝達するプラットフォーム技術が構築されれば，インターネット越しに自身の身体的経験の中で得られる触体験を共有することが可能になると考えられる．

1.3. 本研究の目的

このようなネットワーク上における触覚を用いた身体的経験の共有システムの概念を Internet of Haptics (IoH) と名付け，本論文では触体験の共有における触覚伝送のプラットフォームの確立を行う．

映像や音声と同様に触覚情報においても，インターネット越しに世界の人々と自身の身体的経験の中で得られる触体験を共有することができれば，映像や音声だけでは伝えることが困難な臨場感を伝えることができ，遠隔地間の人々とテレビ電話越しに触れ合うことができるようになると考えられる．また，スポーツ中継のような多人数での体験共有を行う事も可能であると考えられる．

そこで本論文では，インターネットを介して触覚情報を 1 対 1 また 1 対多へ伝送し，人々の日常の様々な触体験を共有するシステムを構築することを目的とし有効性を示す．

1.4. 本論文の構成

第1章では、インターネットと触覚技術の進歩について紹介した。そして今後のインターネットと触覚の関係性を述べ、本研究の目的を定めた。第2章では関連研究として、情報技術における、高臨場感を与える研究や多人数に情報を伝達する技術、触覚伝送技術について紹介し、本論文の立ち位置や貢献を示す。第3章では、本論文で提案するコンセプトやシステムの設計要件について述べる。続いて第4章では提案手法に基づき実際に実装を行い、触体験を共有するシステムの有効性を検証した。続いて、本研究における考察を示し、最後に本論文の結論を示す。

第2章

関連研究

本章では，本研究に関連する研究を取り上げる．関連研究について，大きく分けて高臨場感通信，マルチキャスト技術，触覚伝送技術，インターネット越しの触覚伝送の4分野を取り上げる．

2.1. 高臨場感通信

映像ディスプレイ，サラウンド音声，五感通信などの高臨場感に関する技術によって，遠く離れた場所からでも同じ空間を共有し，互いにその場にいるような自然でリアルな対話や作業が可能 [6] となってきた．

日本電信電話公社（NTT）の並木ら [7] は高精細大画面による等身大の自然な人物映像表示，発話者の位置までわかる音声，高品質な HDTV 映像伝送，および一体感をかもし出す臨場感の高い会議環境の要素を取り入れお互いの距離を意識することなく，3地点間の自然で円滑な対話が可能な会議環境を実現している．榎並ら [8] は，電子ホログラフィ技術を中心とした立体映像・音響技術の研究と，認知メカニズムの解析などによって人間にとって最適化された臨場感コミュニケーションを実現する研究を行っている．また，立体映像技術，立体音響技術，映像や音だけでなく触覚や香りを伝達する五感インタフェース技術の研究開発 [9] も進められている．

近年では安価で高性能なヘッドマウントディスプレイ (HMD) の登場により，スポーツの 360 度映像で高臨場感を観戦者に与えている取り組みなどもある．例として，様々な競技をまるで自分が競技しているかの様な視点で 360 度閲覧できる



図 2.1: 高臨場感システムの応用例 (今後の超臨場感にかかわる研究はどこを目指すべきか [6] から抜粋)

SPORTS VR¹ やプロアメリカンフットボール NFL の試合を 360 度見渡すことができる NFL Virtual Reality², アメリカンフットボールの攻撃の司令塔であるクォーターバックの視点でコンピューターグラフィックスのフットボールを体験することができる Quarterback Challenge³ などが挙げられる。NTT は、新たな視聴体験として、高精細な映像番組を低遅延で一斉同報配信できる Wi-Fi マルチキャストシステムを日本で初めてスタジアムに本格導入し、スマートフォンで目の前の試合に連動した映像番組の視聴や見逃した視聴をアプリ上で楽しむことを可能にしたり、VR 技術を用いてあたかも自身がピッチに立つ GK になったかのような目線で選手のシュートを体験できるシステム⁴ を提供している。富士通株式会社は、

1 出展:「SPORTS VR web ページ」, <https://www.panoplaza.com/movie/sportsvr/sports-vr/>

2 出展:「NFL Virtual Reality」, <http://www.nfl.com/videos/nflnext/0ap3000000543135/NFL-NEXT-The-VRfan-experience>

3 出展:「Quarterback Challenge」, <https://www.au.com/mobile/area/5g/>

4 出展:「NTT Web ページ」: <http://www.ntt.co.jp/activity/jp/b2b2x/smart-stadium/>

AR 技術や高圧縮・リアルタイム映像伝送技術などの最先端テクノロジーを活用して、熊本で開催されるプロバスケットボールの試合を東京にいる人々に、ドリブル音や足音，選手の動きと連動して再現される試合会場の高臨場感を伝える取り組み [10] を現在行っている。



図 2.2: 次世代型ライブビューイングのイメージ (参考文献 [10] から抜粋)

2.2. マルチキャスト技術

マルチキャストとは、ネットワークで特定の複数のノードに対して、1つのデータを同時に送信することがある。送信するパケットが1つでよい上にデータを受信したい特定のグループのホストだけが受信できるので、ユニキャストやブロードキャスト伝送による問題も発生しない利点がある。

一般的なネットワーク上でのマルチキャストで、Deering Stephen らが開発した IP マルチキャスト [11] が挙げられる。IP マルチキャストは IP ネットワーク上で 1 対多，および多対多のリアルタイム通信を実現する方法である。受信者が誰であるか，また受信者の数を事前に知る必要がないため，多数の受信者に宛てた通信に適している。また多数の受信者に転送する必要がある場合でも，源となる送信者は 1 度だけパケットを送信すれば済むため，ネットワークを効率的に利用できる。

ブラウザでリアルタイムなコミュニケーションを可能にする WebRTC [12] は、プラグイン無しでウェブブラウザ間のボイスチャット、ビデオチャット、ファイル共有が1対1から1対多人数間のできる。WebRTC 技術を応用して作られたサービスとして Skype⁵ が挙げられる。また、WebRTC 技術を利用した Web 上でのリアルタイムコミュニケーションプラットフォームとしてサービス化されている Skyway⁶ がある。SkyWay を利用すれば、WebRTC に必要なサーバを構築・運用することなく、手軽にビデオ・音声通話，データ通信を利用でき，エンドユーザーでも利用が可能となった。

最近では，スタジアムやライブなどでスマートフォンを利用して選手の動きを目の前の試合に連動した映像で視聴できたり，多人数間で情報を受信することができる Wi-Fi マルチキャスト技術⁷ がある。Wi-Fi マルチキャストは，無線 LAN の電波を使って放送のようにデータを一齐配信をする技術である。基本的には Wi-Fi 対応のスマートフォンやタブレットがあればハードウェア的にはそのまま受信することができる。一齐配信であるため，多くの端末が同時に受信しても帯域が混雑しないという利点がある。



図 2.3: Skype⁵



図 2.4: Skyway⁶

5 出展：「Microsoft Skype web ページ」，<https://www.skype.com/ja/new/>

6 出展：「NTT communications Skyway web ページ」，<https://webrtc.ecl.ntt.com/>

7 出展：「NTT Data Web ページ」，<http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/trend-keyword/2015111201.html>

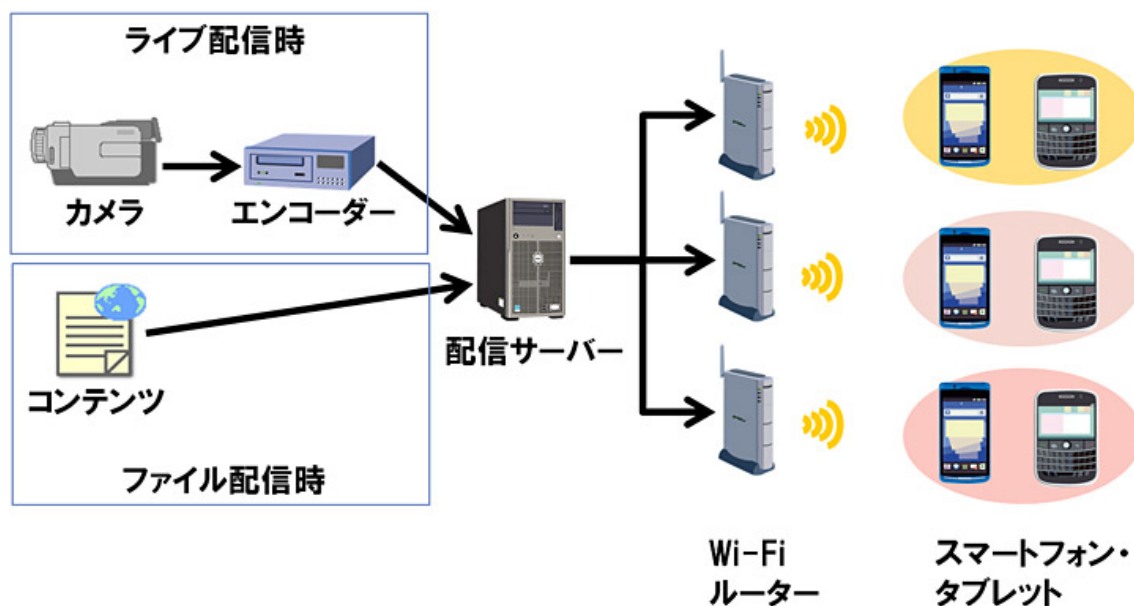


図 2.5: Wi-Fi マルチキャスト⁷

2.3. 触覚伝送技術

触覚技術の進歩は、昔に比べ安価かつ高性能、小型になっており、人々が自身の身体を通じて得る様々な感覚をセンサで記録し、アクチュエータで再生することで再現できるようになっている。

inTouch [13] は、遠く離れた人と棒の回転を共有し、遠隔地間の対人コミュニケーションを実現している。RobotPhone [14] は、遠隔地に置かれた複数のロボットの形状、動作等を同期させることによりロボットを介してコミュニケーションを行うことができる。ディスプレイに表示された電子的なアバターとは異なり、実際に人に触れて力を伝えることや、物を動かして作業を行うといったことも可能となる。Haptic Video [15] 熟練者の作業を記録し、それを力覚提示装置で動的に再生することで、物理的なスキルを伝えることができる。コンタクトマイクロフォンで音響信号を触感として記録、再生し、触感を共有することを可能にしている研究はTECHTILE toolkit [16] がある。従来の振動モーター等を使用した単一的な振動触覚とは違い、リアルタイム性と振動の分解能が高まったことで、触覚の再現の分野への応用が期待されている。StereoHaptics [17] は、振動を発生させるアクチュ

エーターを手のひらに装着することで、振動触覚に移動感をもたせ、ビデオゲームにおける攻撃の発生感や映像コンテンツにおけるモノの動き等を提示することが可能となっている。Haptoclone [18] は、触覚情報と視覚情報の3次元的な「クローン」によってインタラクショシ、離れた場所にいる二人が、素手・裸眼でお互いに触れ合うことができるシステムである。皮膚振動センサとモバイルプラットフォームを用いて指先の感覚を共有できる研究として、HapticAid [19] がある。このような触感共有をスポーツへ応用した試みとして、Fongらはテニスラケットでボールを打つ際に生じる感覚を、振動を用いて再現するラケット型触覚ディスプレイ [20] の開発を行った。宮下らのVibroTracker [21] では、レーザードップラー振動計とサッカードミラーを利用した1ms オートパン・チルトシステムを用い、高速に動く対象を追跡しながら、非接触かつ高精度の振動計測をリアルタイムに行うことを達成し、プレーヤーが感じる振動触覚を複数のユーザーで共有することが可能となるシステムを開発した。また、スポーツ選手の身体情報をテレビやスタジアムで観戦している観衆に伝え、従来の受動的なスポーツ観戦から能動的なスポーツ観戦を実現しているSmash [22] や Interactive Instant Replay [23] がある。



図 2.6: InTouch [13]



図 2.7: TECHTILE toolkit [16]

2.4. Haptic over the Internet

近年では、高速ネットワークインフラストラクチャーが整い、触覚情報をインターネットに接続し他者の経験を共有することが可能となっている。インターネット越しの触覚伝送には図 2.8 に示すように、触覚の入出力デバイスや遅延、音声や映像との同期等の課題が挙げられる [24]。本節では、ネットワーク越しの触覚伝送技術を紹介し、このような課題をどのように解決しているかについて述べる。

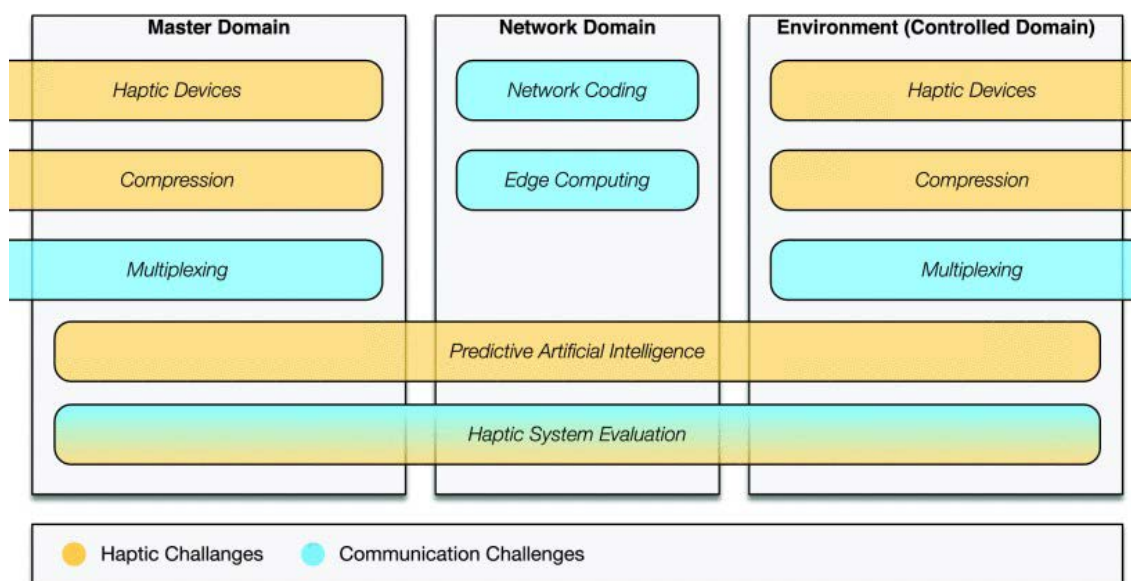


図 2.8: インターネット越しの触覚伝送の課題 (参考文献 [24] から抜粋)

石原らの Tele-cLINK [25] は、コップに触覚提示のアタッチメントを装着し、サーバーを介した通信を行い遠隔地間で杯を打ち付けたような乾杯を実現している。M2M や IoT に適している、は MQTT 通信を使用して、相互通信をするときの遅延をできる限り少なくし、乾杯の同時性の維持をしている。また、映像と触覚フィードバックとの差を知覚させないため、乾杯の瞬間に映像を数秒間、他の画像に切り替え、相手の映像を見えなくする方法で映像と同期を行っている。触感をコンピュータの操作などで使われるコピーアンドペーストの考え方をうい、触覚コンテンツの作成、共有がブラウザ上でできるオンラインプラットフォーム

TouchCast [27]の開発, 研究も行われている. Daniel Leithinger らの inFORM [28] は, テーブルから飛び出す無数の突起を制御することでそのテーブル上のものを物理的に動かし, 遠隔地の通話に物理的な行動を伝送することが可能なデバイスである. Fernando らが開発した TELESAR V [29] に搭載されているロボットハンドは, 物体に触れると指先のセンサで触覚情報を検出してユーザーに触覚提示する. 通信プロトコルでは UDP マルチキャストで触覚情報や関節の動作のデータを送信している. 情報の同期や伝送遅延を減らすため映像の解像度を落とすことで実現している. 結果として, ユーザーとロボットの身体動作と各種感覚のフィードバックが行われることで, ユーザーの身体が遠隔地のロボットに憑依したような現象を生み出すことを可能としている.

また, スマートフォンやタブレットの移動体通信機の普及に伴い, モバイル技術が年々発展しており, ハプティックモダリティは遠く離れたユーザー間同士円滑なマルチモーダルと感情コミュニケーションの手段を提供することができるようになってきている.

中村らの開発した A(touch)ment [30], 後継機である花光らの Twech [26] は, iPodTouch に取り付ける触感記録再生デバイスを利用することで, 触感が含まれた動画を記録することができ, 記録された動画は, 新しい動画アプリケーションを必要とせずに再生と共有が行えるため, SNS 上にそのままアップロードし, 触り心地を共有することが可能となっている. HapticAid [19] もモバイルプラットフォーム技術を利用して, 他者の指先の触体験を共有する取り組みを行っている. James Keng Soon Teh らの Huggy Pajama [31] は, インターネットを介して接続された抱き合うインターフェースデバイスと着用可能な抱擁を再現するパジャマである. インターネット越しに, お互いを抱き合わせ, 親と子の遠隔コミュニケーションにおける身体的なやりとりを促進することを目的としたシステムを提案している.



図 2.9: Tele-cLINK [25]

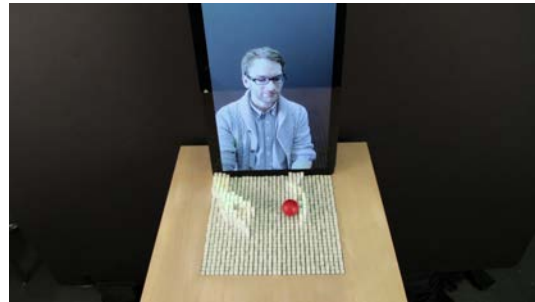


図 2.10: inFORM [28]

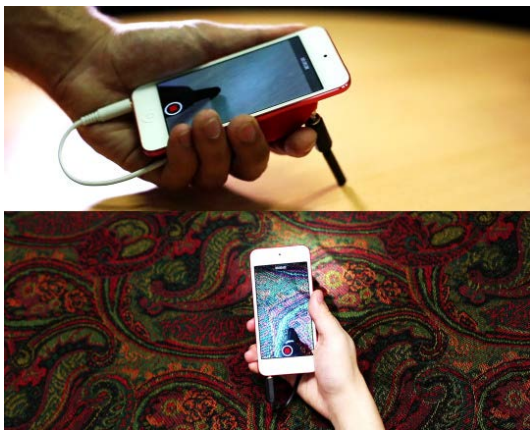


図 2.11: Twech [26]

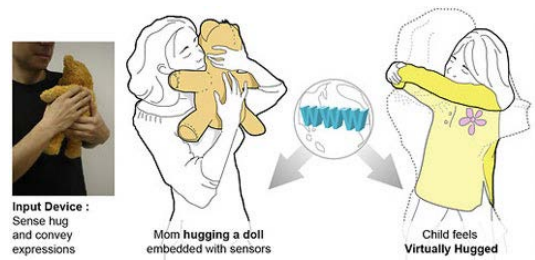


図 2.12: Huggy Pajama [31]

2.5. 本章のまとめ

本章では、映像や音声，五感を用いた高臨場感通信，多人数間に情報を伝達するマルチキャスト技術，最後に触覚伝送技術の先行研究を紹介した．高臨場感通信では，実際の技術を利用して，ライブやスポーツ観戦へ応用し，観衆に高臨場感を与える取り組みを行っているが，他者の身体情報を多人数間に伝え高臨場感を届ける取り組みには，未解決な課題が多い．触覚技術においては，個人の触体験の記録と再生までしか行われておらず，ネットワークの特性を生かした多人数間での触体験の共有を可能とするシステムになっていない．以上のことから，本論文では，ネットワーク越しに多人数間に触覚情報を伝送し，他者の身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムの提案を行う．次章以降に，具体的なコンセプト，提案手法，設計要件について述べる．

第3章

Internet of Haptics の提案

本章では IoH のコンセプトについて説明し、提案する HaptI/O の実現方法について述べる。

3.1. IoH のコンセプト

映像や音声のように触覚情報においても同様に、インターネット越しに世界の人々と自身の身体的経験の中で得られる触体験を共有することができれば、映像や音声だけでは伝えることが困難な臨場感を伝えることができたり、遠隔地間の人々とテレビ電話越しに触れ合うことができるようになると思われる。また、主観的な触感情報を用いた技能の伝達、そしてスポーツ中継のような多人数での体験共有 (図 3.1) と言った用途が想定される。

このような触覚を用いた身体的経験の共有システムとして Internet of Haptics (IoH) の概念を提案する。これらの要素を実現するための要件として触感データのフォーマット、共有のシステム触感の再現記録を行うデバイスの3つが挙げられるが、これらの具体的な策定はなされていない。そのため2章で述べたように、従来の触覚共有システムは、個人の触体験の記録と再生までしか行われてなかったり、選択的に送り先を指定して個人の触覚体験を多人数の人に共有することは困難であった。また使用するデバイスも大掛かりなモノであった。

そこで本論文では、ネットワーク越しの触覚伝送に着目し、触覚情報を1対1 または1対多へ選択的に伝送し、人々の日常の様々な身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムを実現する。

本概念を確立するため、インターネット越しに触覚情報を伝送するプラットフォーム

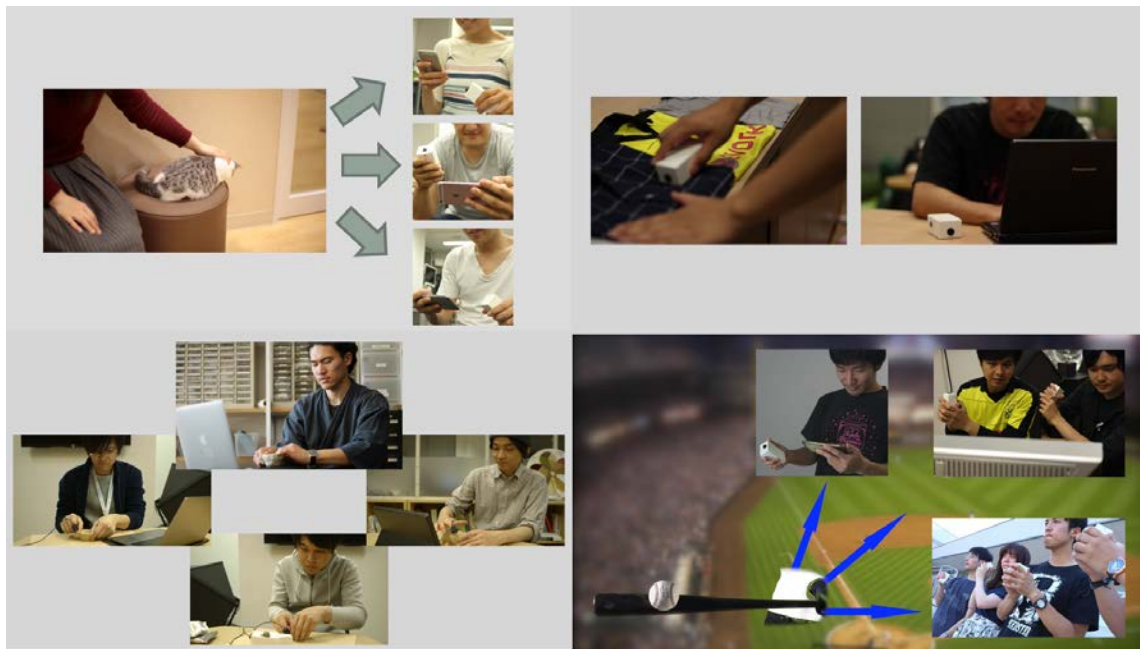


図 3.1: IoH のアプリケーション例

ム及び身体や有体物の触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード HaptI/O の開発を行う。複数の HaptI/O がサーバーに接続し、1対1の相互接続、また1つのノードから複数のノード（図 3.2）へ触覚情報を伝送する事で、他者の触体験を分かち合う事ができる。また、多人数間での触体験を共有するアプリケーションでは、送受信デバイスは同一サブネットを共有していることが多いので、本論文では、ローカルネットワーク環境でのシステムを構築する。以上のことから、提案する HaptI/O の実現に向けて以下の要件を満たす必要がある。

- 1対1の相互通信、また1対多へ触覚情報をネットワーク越しに伝送することが可能なこと
- 自身の触体験を共有したい他者に選択的に送受信できること
- 一つの HaptI/O で触覚を入出力できること

これらの要件を持たすため、コンピュータネットワークにおいて、決められた

特定の複数のネットワーク端末に対して、同時にパケットを送信するマルチキャストを実現する必要がある。複数の HaptI/O デバイスは、それぞれ独自の IP アドレスを持ちネットワーク上で制御されることで、1対1の相互接続や1つのノードから複数のノードへのマルチキャストによって触覚伝送を行えるネットワーク構築を行う。ユーザには、接続したいセンサノードとアクチュエータノードを、Webブラウザを利用してデバイス間接続を行い、選択的に他者の触体験を得ることができる環境構築を行う。次節以降に具体的な物理ネットワークノード、HaptI/O の提案について述べる。

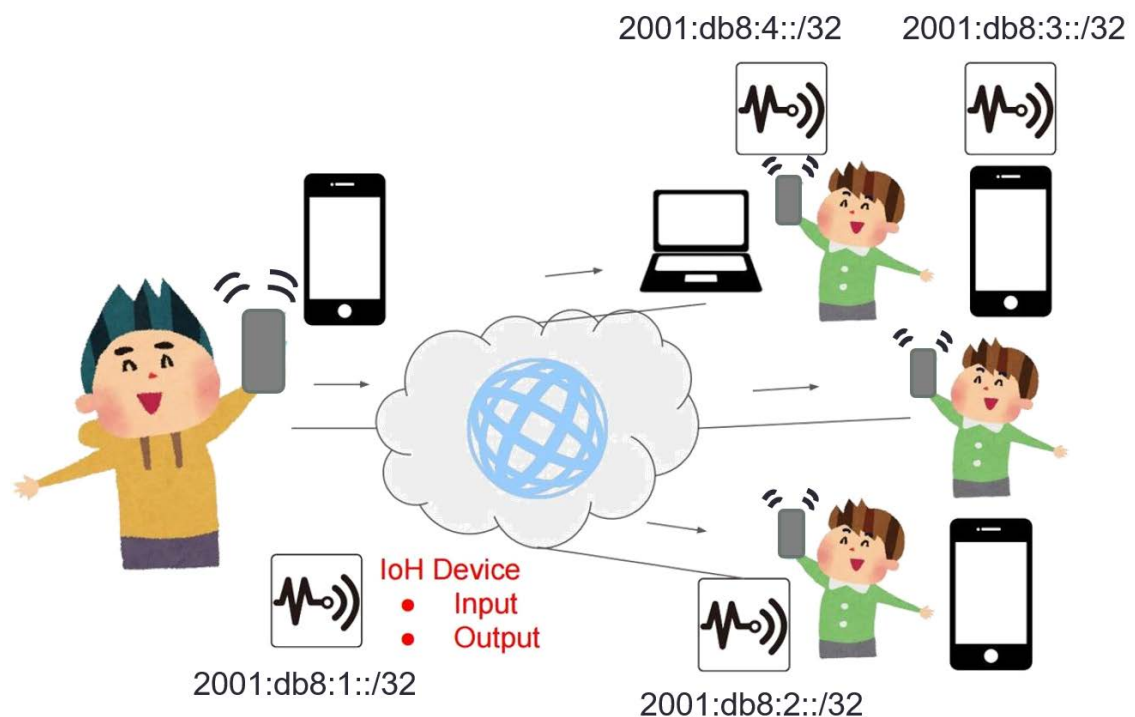


図 3.2: IoH のコンセプト図

3.2. HaptI/O の提案

本節では，触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード HaptI/O の，デバイス設計について述べる．

3.2.1 ハードウェアデザインと設計要件

HaptI/O は人の触体験をネットワーク越しに多人数で共有するシステムである(図 3.3)．そのため，HaptI/O デバイスは複数個製作する必要がある．各モジュールには，人の触体験を記録するセンサ，その取得した触覚情報に対して信号処理をし，ネットワーク越しに伝送を行うプロセッサ，伝送された触覚情報を受信し，触体験を再生するアクチュエータが含まれる．センサとアクチュエータは，触感を提示するため，低周波数帯域を強調して出力できる素子を選定する必要がある．触体験を共有することは，触り心地を記録再生したり，リアルタイムに触覚情報を送受信する必要がある．このように，ネットワーク越しに，触体験を共有するためには Wifi モジュールを内蔵したプロセッサが必要である．センサで記録，アクチュエータで再生される際の触覚情報はアナログデータである．しかし，触覚の伝送を行う際にはデジタルのデータに変換しなければならないため，触覚情報を A/D, D/A 変換するための処理が必要である．

さらに人が触体験を得るときは常に能動的な身体動作が伴うため，HaptI/O は触体験の記録に適したコンパクトな形で実現を行う．本論文では，スマートフォンや携帯電話のように，人の手のひらに収まるサイズを目標に実装を行う．そのため，選定する素子は，すべて小型のものを使用，バッテリー駆動で動かす必要がある．

また，自身の触体験の共有を行うために HaptI/O を同士の接続をするための UI が必要である．この UI は同一サブネット上にいる人すべてが操作を行える設定にするため，Web ブラウザ上で構築を行う必要がある．複数の HaptI/O の識別には IP アドレスを各ノードに割り振り識別を行う．次節に触覚のマルチキャスト通信を実現するための，具体的な形成するネットワークシステムデザインについて述べる．

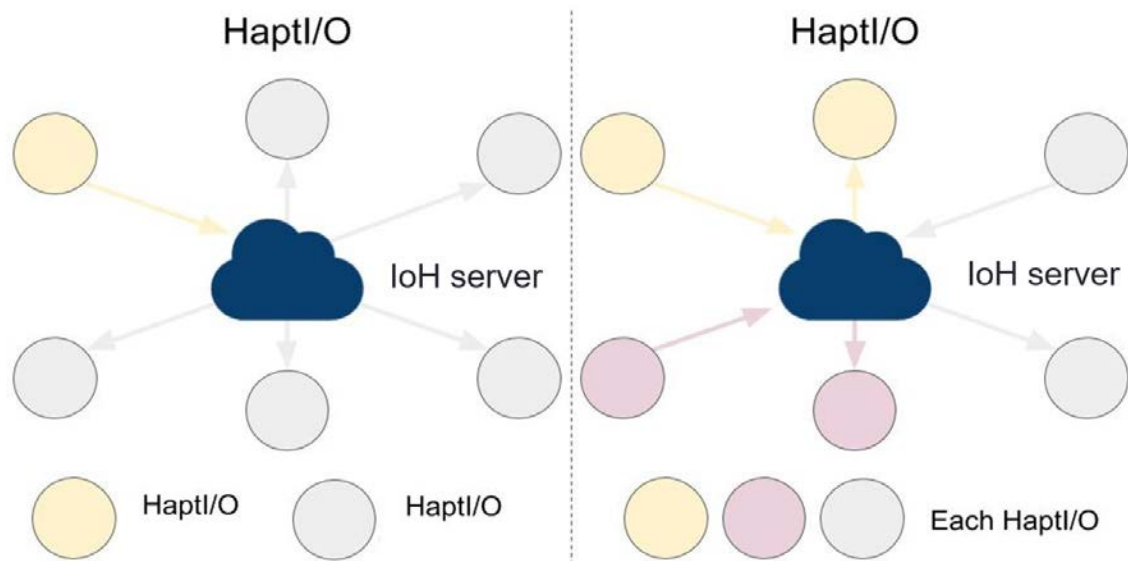


図 3.3: HaptI/O の概念図

3.2.2 ネットワークシステムデザイン

インターネットを用いてセンサノードとアクチュエータノードの通信を行うために IP マルチキャストプロトコルを用いて実現する。IP マルチキャストは IP ネットワーク上で 1 対多、および多対多のリアルタイム通信を実現する方法である。受信者が誰であるか、また受信者の数を事前に知る必要がないため、多数の受信者に宛てた通信に適している。また多数の受信者に転送する必要がある場合でも、ソースとなる送信者は 1 度だけパケットを送信すれば済むため、ネットワークを効率的に利用できる。

ユーザーは Web ブラウザから接続したいアクチュエータノードとセンサノードとして機能する HaptI/O デバイスを選択することで、触覚情報を得ることができる。各ノードは IPv4 または IPv6 が割り振られており、IoH サーバーに接続される。次にセンサノードとして機能する HaptI/O デバイスがデータパケットの宛先 IP アドレス (マルチキャストアドレス) を指定し、パケットを送信する。アクチュエータノードとして機能する HaptI/O デバイスは指定されたマルチキャストアドレスを選択することでパケットを受信することができ、通信が開始される。結果

として、センサノードとアクチュエータノードがマルチキャストアドレス上でコネクションされ、触覚情報の伝送が可能となる。また、同様の操作を別のアクチュエータノードで行うことで、1対多のマルチキャストを実現する (図 3.4)。

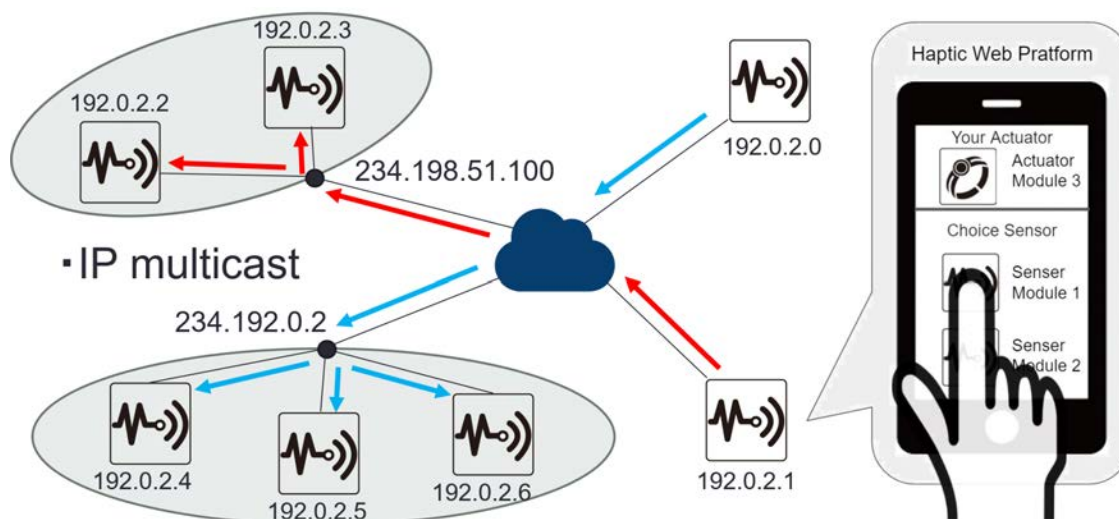


図 3.4: ネットワークシステムデザイン

3.2.3 HaptI/O 利用のシナリオ

HaptI/O は同一サブネット上の触覚マルチキャストを実現するため、スポーツ観戦やライブ等のパブリックビューイングでの使用が想定される。ここではスポーツ観戦の野球を例として、使用時の具体的なシナリオを述べる。

センサノードとして機能する HaptI/O デバイスは選手が使用するバットやグローブに内蔵される。次にアクチュエータノードとして機能する HaptI/O デバイスはスタジアムの観衆全員が所持している。バットでヒットを打ったり、ピッチャーが投げたボールをキャッチャーが補給した時、その衝撃がスタジアムの観衆が保持している HaptI/O デバイスにマルチキャストされる。その結果、選手とキャッチボールをする感覚を得られたり、好きな選手をより近くに感じれるようになると思われる。また、従来のスポーツ観戦よりも能動的に観戦ができるようになり、パブリックビューイングの拡張につながると考えられる。

3.3. 本章のまとめ

本章では、IoH のコンセプトについて述べ、ネットワーク越しの触覚伝送に着目し日常の様々な身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムを提案した。そのためネットワークを通じた多人数間での触覚伝送のプラットフォームを実現するため、触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード HaptI/O を提案した。HaptI/O の具体的なデバイス設計、構築するネットワークシステムデザインを述べた。

第4章

HaptI/Oの実装と評価

本章では、第3章で提案したHaptI/Oのシステムを元の実装を行った。具体的なハードウェア実装、ネットワーク実装、ソフトウェア実装内容、性能の評価実験を行った結果について述べる。そして実装したシステムの展示を行った。

4.1. HaptI/Oのハードウェア実装

本節は3章で提案したHaptI/Oの設計要件を元に行った、ハードウェアの実装内容について述べる。

4.1.1 ハードウェアの構成

HaptI/Oは小型かつシンプルに実装を行い、触覚情報を入出力する必要がある。そのため図4.1に示すように、HaptI/Oは1つのモジュールに、センサ(プリモ社, EM246U100B1), アクチュエータ(Alps Electronics, Haptic Reactor tough type), 通信モジュール(Intel株式会社, Edison), バッテリー(ULTRALIFE, リチウムイオンバッテリー, 3.7V, 900mAh), オーディオインターフェース(BUFFALO, BSHSAU01BK), アンプ(TECHTILE Amplifier)が内蔵されている。センサとアンプは、低周波数帯域を強調して出力できるTECHTILE toolkitで使用されているものと同様の物を使用した。アクチュエータは、応答性が早く周波数によって様々な触感を生成することが可能なボイスコイル型のアクチュエータ Haptic Reactor tough typeを選定した。通信モジュールは、小型でのRAM:1GB 802.11n Wireless LANを有しているIntel Edisonを使用した。このIntel Edisonは他のIoTデバイ

スに比べ低消費電力であり、無線に関しても最大通信速度 600Mbps の 802.11n を有しているため通信速度の面でも要件を満たしている。

図 4.2 に素子の接続図を示す。センサはオーディオインターフェースのマイク入力端子にアクチュエータはアンプを介してオーディオ出力端子に接続した。そしてオーディオインターフェースと通信モジュールを接続した。

IP アドレスのみで HaptI/O の識別を行うのはわかりづらいため、フルカラー LED を用いてマルチキャストグループごとに LED の光で視覚的に識別できるようにした。データを送信するセンサノードとして機能する場合には LED を点滅、データを受信するアクチュエータノードとして機能する場合には LED を点灯の状態に設定した。また、Intel Edison の GPIO 出力ピンは 1.8[V] 電圧しか出力されず、LED を点灯させるための電圧値には充分ではない。そのため、PNP トランジスタを用いてスイッチング回路を構成し LED に供給する電圧値を昇圧した。

以上のすべてのデバイスが収まるケースは 3D CAD で作成し、これを 3D プリンタで出力した。このモジュールサイズは約 $45 \times 90 \times 35$ [mm] であり人間の手のひらにフィットする大きさである。HaptI/O を使用するユーザーは触覚情報を送受信することが可能である。なお本論文で HaptI/O デバイスは 4 つ製作した (図 4.3)。

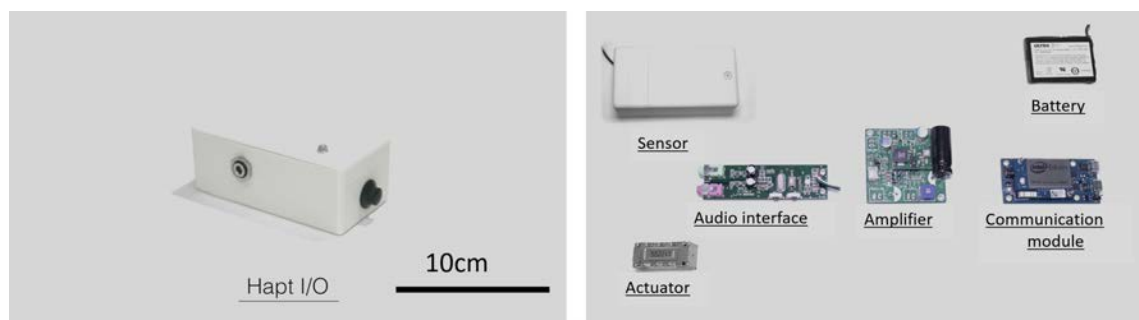


図 4.1: ハードウェアデザイン

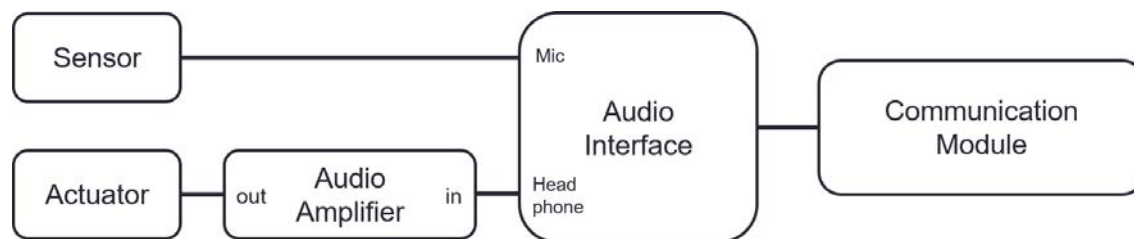


図 4.2: HaptI/O に含まれる各素子の接続図



図 4.3: 製作した4つのHaptI/Oデバイス

4.1.2 システム構成

システムの動作として、図 4.4 で示すようにセンサで取得した触覚情報は、オーディオインターフェース、通信モジュールを通じてサーバーに伝送される。次に他の接続している HaptI/O の通信モジュールに触覚情報が送られる。その後、オーディオインターフェース、アンプ、アクチュエータの順に触覚情報が伝送される。

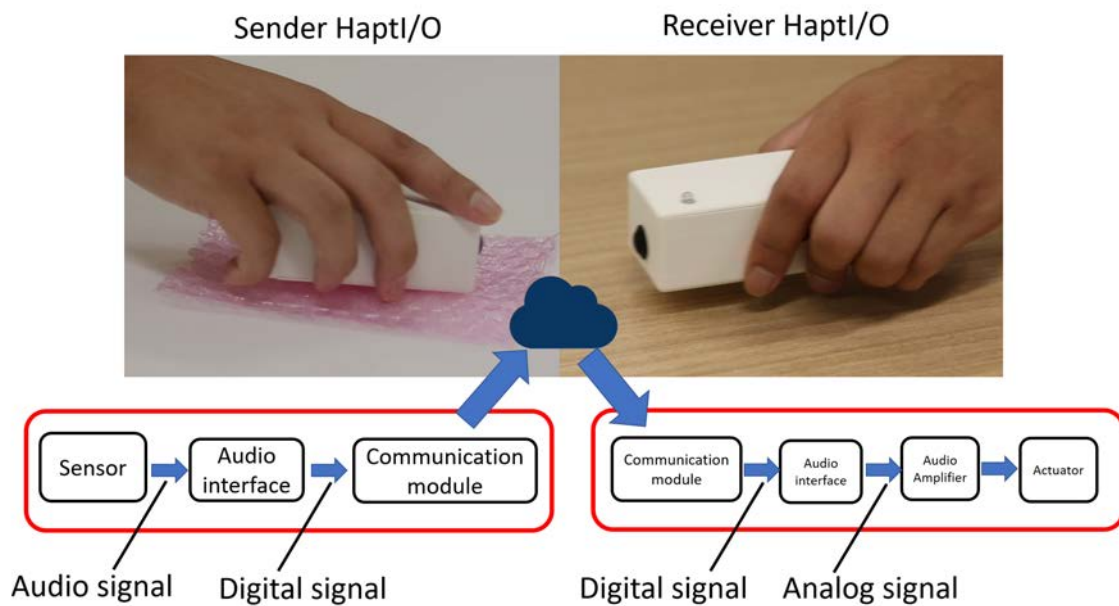


図 4.4: HaptI/O のシステム構成図

4.2. ネットワーク実装

触覚伝送方法は第3章で提案したIPマルチキャストプロトコルを用いて実現した。図4.5に実装したネットワーク構成図を示す。今回の実装では、ローカルネットワーク環境で構築しており、各HaptI/Oデバイスの判別を行うためDHCPサーバーからIPアドレスを割り振った。ネットワーク通信の管理に関してはNodejsを用いて構築した。

HaptI/Oが起動すると、サーバーにHaptI/OのIPアドレスが登録される。Webブラウザからサーバーに向かう通信としては、ブラウザから選択したセンサノードとして機能するHaptI/OのIPアドレス、アクチュエータノードとして機能するHaptI/OのIPアドレス、マルチキャストグループのデータがサーバーに送信される。この時のデータの形式としてJSON形式を利用した。JSONはテキストベースのデータフォーマットであり、JavaScript専用のデータ形式では決してなく、様々なソフトウェアやプログラミング言語間におけるデータの受け渡しに使えるよう設計されている。送信されたデータはサーバーで処理され、接続するHaptI/Oのセンサノードとアクチュエータノードを識別し、マルチキャストグループを確定する。

次にサーバーからHaptI/Oへ向かう通信では、サーバーで処理された、識別されたHaptI/Oのモード、マルチキャストグループのデータがJSON形式で送信される。各HaptI/Oには {192.0.2.4: Sender, Group: 234.192.0.2, Color: Green}, {192.0.2.3: Receiver, Group: 234.192.0.2, Color: Green} といったパケットが受信される。そして各HaptI/Oは、自身のIPアドレスに紐づいた送受信モード、マルチキャストグループを参照し、センサノードとして機能するHaptI/Oは、センシングした触覚情報をマルチキャストグループにデータをUser Datagram Protocol (UDP)で送信する。同様にアクチュエータノードとして機能するHaptI/Oは、マルチキャストグループIPアドレスにアクセスすることで、センサノードから送信される触覚情報のデータを受信することができる。以上のネットワークルーティングで触覚マルチキャストを実現した。なお振動の元となる音声信号のコーデッ

クはマルチメディアフレームワークの Gstreamer¹ を使用した。

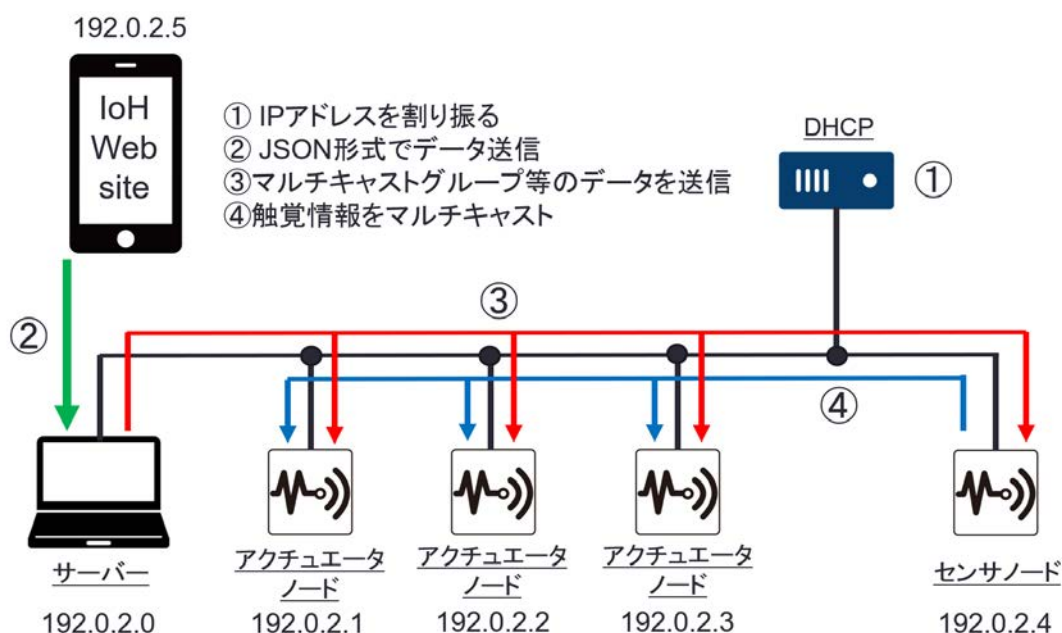


図 4.5: 実装したネットワーク構成図

4.3. ソフトウェア実装

本節では、具体的な HaptI/O のソフトウェア実装の内容について述べる。各デバイスで行われる処理内容の要件を明記し、その実現方法を示す。また HaptI/O を操作するためのユーザーインターフェース (UI) の実装内容についても述べる。

4.3.1 各デバイス間のシステム実装

4.2 節で示したネットワークルーティングを元に各デバイス間で行われる処理内容を明記し、実装した内容を示す。

¹ Gstreamer web ページ, <https://gstreamer.freedesktop.org/>

Web ブラウザサイド

IoH のサーバーが立ち上がると、同一サブネット上に「192.0.2.0(任意の IP アドレス):8888」で IoH Web サイトが表示される。この Web サイトは各 HaptI/O のモード (センサノードとアクチュエータノード) とマルチキャストグループ、グループの色 (フルカラー LED の色) 情報をユーザーが決定し設定する役割を担う。Web サイト上から各項目を設定するとサーバーに {192.0.2.4: Sender, Color: Green}, {192.0.2.3: Receiver, Color: Green}, {192.0.2.2: Receiver, Color: Green}, {192.0.2.1: Receiver, Color: Green} といったパケットが送信される。

サーバーサイド

サーバーは Web サイトから送られてきたパケットを受信し、各 HaptI/O デバイスに自身のモードとマルチキャストグループ、グループの色を教える役割を担う。

サーバーが立ち上がり続いて HaptI/O が起動すると、サーバーに HaptI/O の IP アドレスが登録され、HaptI/O にあなたの IP アドレスは登録されましたと伝える。次に Web サイトから送られてきたパケットをサーバーが受信すると Javascript で書かれた Nodejs のプログラムがこれを処理する。その後、処理されたデータをもとに、各 HaptI/O デバイスに {ip:192.0.2.4, mode: Sender, Color: Green}, {ip:192.0.2.3, mode: Receiver, Color: Green}, {ip:192.0.2.2, mode: Receiver, Color: Green}, {ip:192.0.2.1, mode: Receiver, Color: Green} といったパケットが送信される。

HaptI/O サイド

HaptI/O サイドでは、サーバーから送られてきたパケットを元に触覚のマルチキャスト通信を行う。

サーバーから送られてきたパケットをサーバーが受信すると Javascript で書かれた Nodejs のプログラムがこれを処理する。プログラムの処理として、パケットに明記されている自身の IP アドレスを参照し、モードとマルチキャストグルー

プを確定させる。モードを確定すると Gstreamer のオーディオコーデックが開始され、マルチキャストグループ IP アドレスを指定し、触覚情報を伝送する。センサノード側でも同様にマルチキャストグループ IP アドレスを指定し、オーディオコーデック開始することで触覚情報を受信することができる。

また LED の色の識別は、サーバーから送られてきたパケットの mode と Color を参照し識別を行う。mode が Sender の場合、LED を点滅させ、Receiver の場合は LED を点灯させ、送受信ノードの識別を行った。

4.3.2 HaptI/O のユーザーインターフェース (UI)

本システムは、ネットワーク上で HaptI/O の接続を行うため Web サイト上から操作を行う設計にした。Web サイトの UI は Html と Javascript, CSS を用いて構築した。サーバーが立ち上がると、Web ブラウザは自動的に同一サブネット上に公開される。HaptI/O の触覚マルチキャスト通信を実現するための UI には以下の項目を選択するタブを設定する必要がある。

- マルチキャストグループ
- HaptI/O のモード
- 設定を決定するボタン

前節で述べた通りマルチキャストを実現する方法として IP マルチキャストプロトコルを用いるため、マルチキャストグループを赤、緑、青の 3 色で識別を行った。グループアドレスが 234.192.0.2 なら赤、234.198.51.100 なら緑、234.203.0.113 なら青のように色でわかりやすく識別できるようにデザインした。

IP アドレスが割り振られた HaptI/O がサーバー上に登録されると Web ブラウザ上には、登録された HaptI/O の IP アドレスが記入されている。HaptI/O のモード選択を行うために、本システムでは送受信選択バーから各ノードに割り振られている IP アドレスを選択することで実現した。

以上のマルチキャストグループ HaptI/O のモードの3項目を選択し決定ボタンである「Save Changes」を押すとサーバーにパケットが送信される。設計したUIのデザインを図4.6, 4.7に示す。

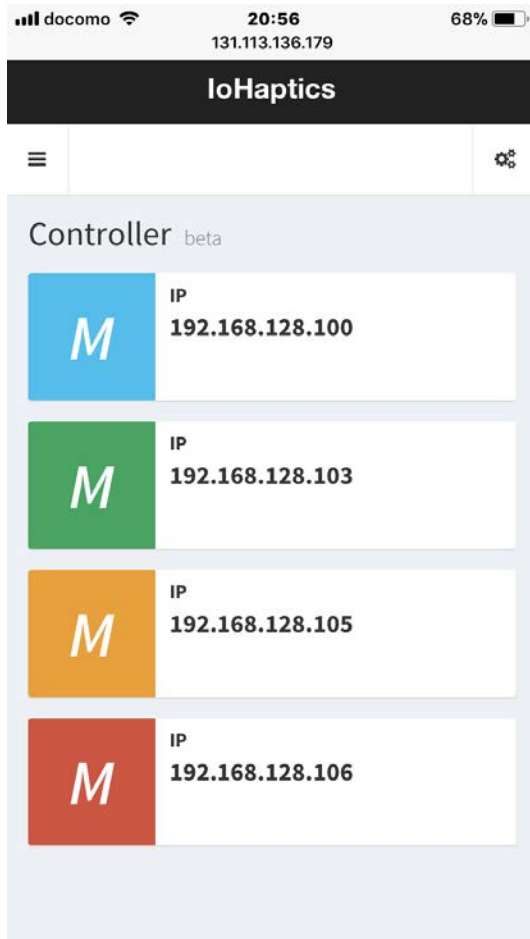


図 4.6: Web 常に登録されている IP アドレス

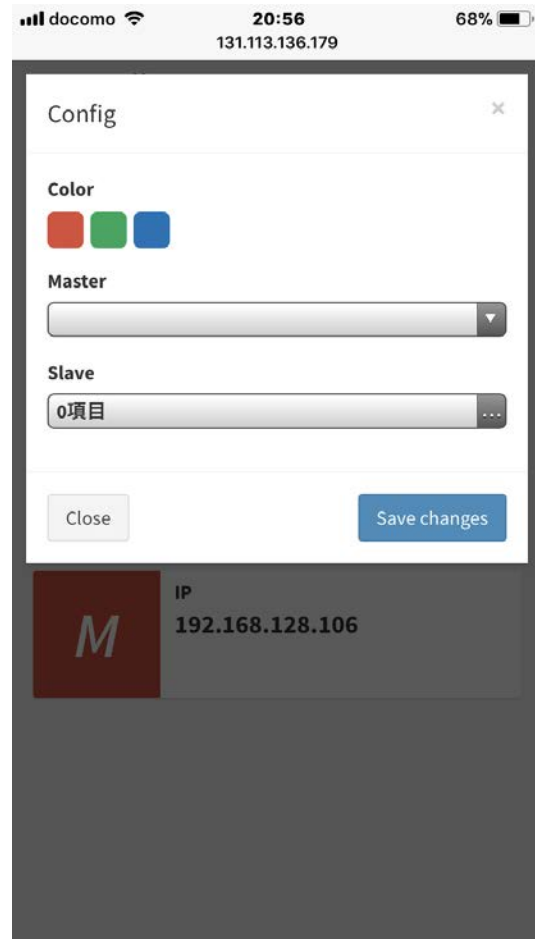


図 4.7: 送受信ノード選択画面

4.4. 触覚伝送速度の検証実験

4.4.1 実験目的

本実験はリアルタイムに伝送される触覚情報の伝送速度の測定を行う。Rank, M [32]らの心理物理学の研究から設定された触覚提示システムにおける遅延知覚は50msから200ms以内である。リアルタイム映像より200ms以上の遅延を計測してしまうと人間は大きく遅延を認知してしまう。そのため本実験で、HaptI/Oの触覚伝送速度を計測し200ms以下の伝送遅延を目指す。

4.4.2 実験方法

本実験の実験構成図を以下の図4.8に示す。触覚の伝送スピードを計測するため触覚を受信するアクチュエータノードと送信するセンサノードにオシロスコープを用いて測定した。オシロスコープのCh.1をアクチュエータノードとして機能するHaptI/Oデバイスのaudio interfaceの出力端子に接続し、Ch.2をセンサノードとして機能するHaptI/OデバイスのAudio interface入力端子に接続して測定を行った。本実験で計測する伝送速度は触覚情報のエンコーディングからデータ転送、デコーディングの時間である。実験条件は有線と無線接続のローカル環境でノード間距離30cm以内で行った。ルータは最大データ転送速度800MbpsのRT-AC85 routerでIEEE802.11n規格の無線LANを使用した。なお実験は1対1から1対3までのマルチキャスト通信のレイテンシーの測定を行った。実際の実験環境の様子を図4.9に示す。

4.4.3 実験結果

表4.1と図4.10に有線と無線接続で触覚伝送速度を測定した結果を示す。図4.10のグラフは縦軸に触覚伝送速度、横軸にノードの接続台数を示している。計15回測定を行った平均値を示し、エラーバーは伝送速度の最大最小値を示す。

測定したレイテンシーの速度は有線接続の場合、最小値が152から154ms、最大値が188msから192msとなり平均値が約170から176ms、無線接続の場合、最

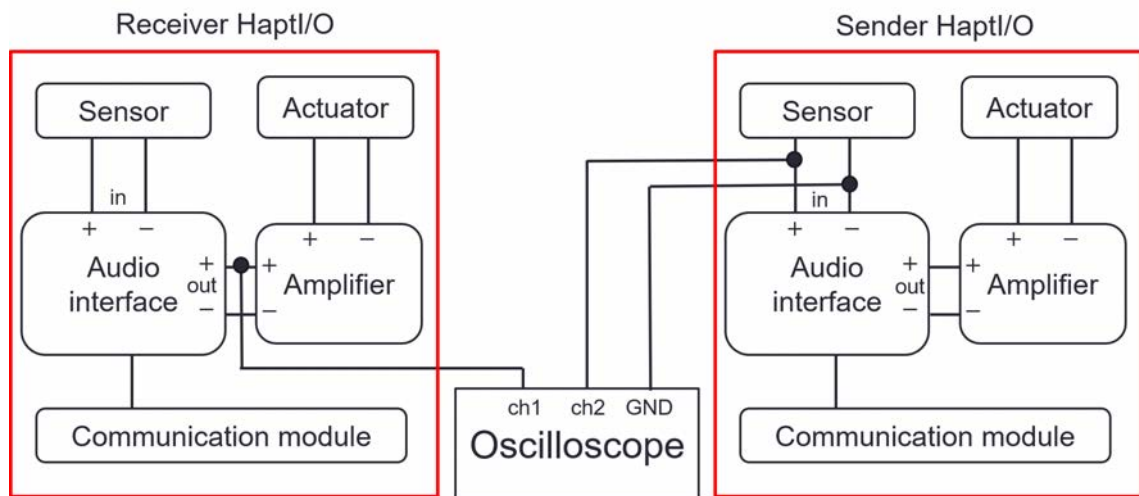


図 4.8: 触覚伝送速度実験の実験構成図

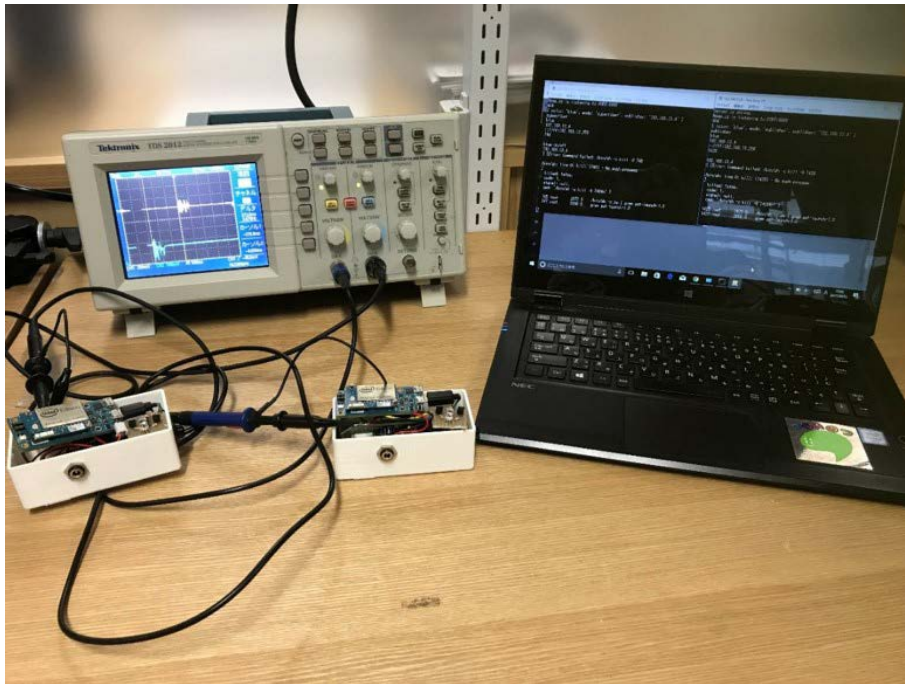


図 4.9: 触覚伝送速度実験の実験環境

小値が 180 から 200ms, 最大値が 240ms から 280ms となり平均値が約 210 から 230ms のレイテンシーを計測することができた。

無線接続で行った結果では, 前述した遅延知覚の数値である 50ms から 200ms よりも大きい結果となった。考えられる原因として, 本研究で使用した通信モジュール (Intel Edison) の内部クロック周波数は 600MHz と低い値であるため, エンコーディング, デコーディングに時間がかかってしまったと考えられる。そのため有線接続の場合でも 150ms 以上の伝送遅延が計測されてしまったと考えられる。

表 4.1: 触覚伝送速度の検証結果

回数	接続台数					
	1		2		3	
	有線 [ms]	無線 [ms]	有線 [ms]	無線 [ms]	有線 [ms]	無線 [ms]
1	160	224	174	256	188	236
2	188	248	192	244	172	228
3	180	220	192	200	190	204
4	164	224	168	232	192	224
5	164	244	160	252	172	224
6	184	216	172	216	180	236
7	184	240	176	232	188	228
8	168	236	180	216	178	232
9	156	200	164	236	150	220
10	180	228	172	196	170	252
11	180	184	148	224	168	248
12	168	248	152	208	164	212
13	156	248	192	212	190	200
14	152	240	188	244	154	280
15	164	228	176	256	190	228
平均値	169	213	174	228	176	230

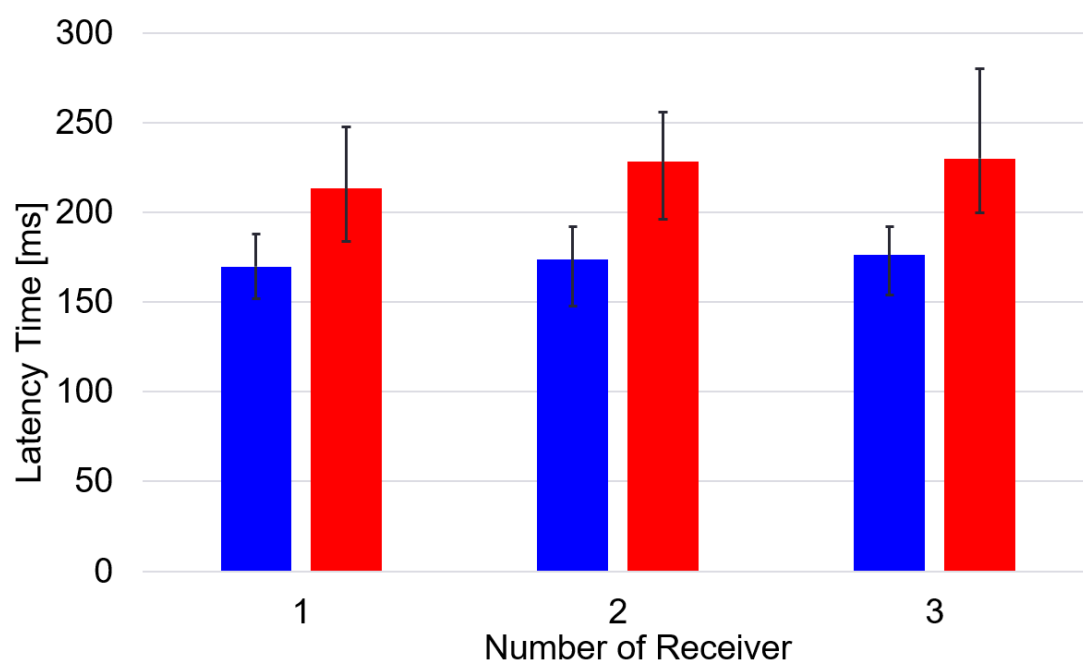


図 4.10: 触覚伝送速度検証結果

4.5. 粗さ弁別実験

4.5.1 実験目的

製作した HaptI/O を用いて、視聴覚情報に加えて触覚情報を提示することで、遠隔コミュニケーションにおけるユーザーの情報認知が向上するか検証する。紙やすりの粗さ弁別の心理実験を行い、HaptI/O を使用することでマテリアルのテクスチャの違いを判別できるか検証を行う。

4.5.2 実験内容

本実験では、実際の遠隔コミュニケーションを再現するため離れた二つの部屋を用意した。部屋同士のコミュニケーションでは、Skype のテレビ通話を使用して行った。HaptI/O の通信は同一サブネット上で行われた。使用したルータは最大データ転送速度 800Mbps の RT-AC85 router を使用した。マテリアルのテクスチャは粗さが異なる 4 種類の鑢 (240, 320, 400, 600) を使用した。はじめに別室のユーザーに粗さが異なる 2 種類の鑢をランダムに提示し目視のみでどちらが粗いか回答してもらう。提示する際の PC のカメラとマテリアルの距離は約 30 の距離に定めた。同様に他の 2 種類の組み合わせ (240 and 320, 240 and 400, 240 and 600, 320 and 400, 320 and 600, 400 and 600) すべてをランダム提示し回答を行う。次に別室にいるユーザーに Actuator Node の HaptI/O を持たせ、粗さが異なる 2 種類の鑢をカメラで映しながら Sensor Node の HaptI/O で 3 回ずつなぞり、どちらが粗いか回答してもらう。この時、ユーザーには、相手のなぞる動作と同様の動作を行ってもらう。同様に他の 2 種類の組み合わせすべてをランダムに提示し回答を行う。各鑢の組み合わせで、視聴覚情報のみと触覚情報を加えた場合の回答率を比較し検証を行った。なお本実験は、20 代の男女 12 目に協力のもと行われた。実験の様子を図 4.11 に示す。



図 4.11: 粗さ弁別実験の様子

4.5.3 実験結果

本実験の結果を図 4.12 に示す。この図は、縦軸に回答率、横軸に 2 種類のマテリアルの組み合わせを示している。図 4.12 の結果から、視聴覚情報に加え触覚情報を提示することで情報の認識度が向上することが確認できた。特に粗さが大きく異なる 240 と 600 の組み合わせでは顕著に違いが認められた。この結果から、HaptI/O は粗い滑らかなの違いをセンシングし提示できることが確認できた。しかし、400 と 600 の組み合わせでは、触覚提示なしの条件の方が回答率が良い結果となった。これは、やすりの粗さの番目が高くなるにつれて触覚の周波数成分は高周波成分を多く含んでいるため、センシングが困難であるためだと考えられる。

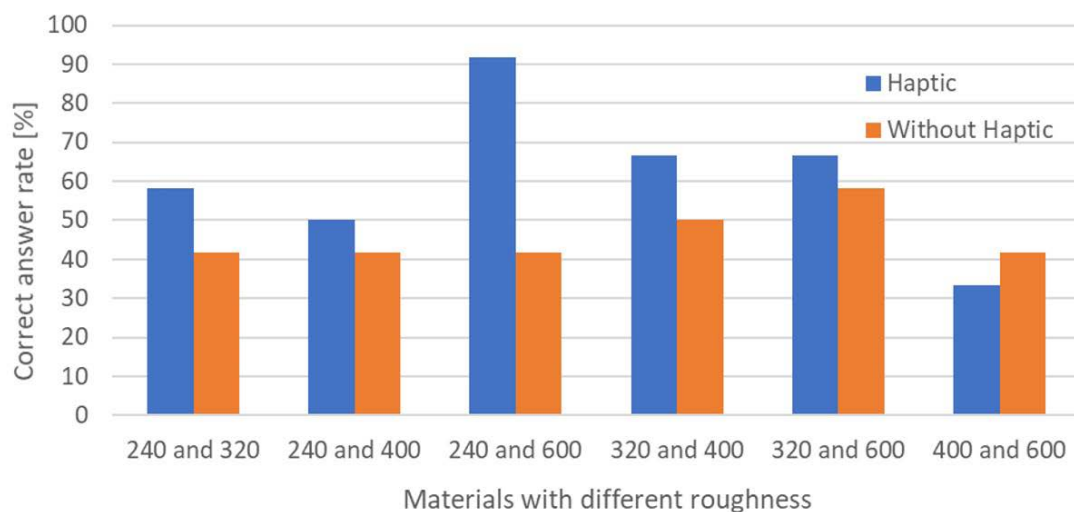


図 4.12: 粗さ弁別実験結果

4.6. 触感伝送後の品質検証

4.6.1 実験目的

製作した HaptI/O が触感伝送を行った際にテクスチャの違いを見分けられるか検証するため、伝送後の触感の品質評価実験を行った。TECHTILE toolkit と比較を行い触感の品質を確認した。

4.6.2 実験方法

本実験では、以下の図 4.13 に示す触覚オノマトペ [33](粗さ軸) から選出した 6 つのテクスチャを使用した。はじめに、実験参加者は TECHTILE toolkit のアクチュエータを握ってもらい、実験補助者は 1 つの材料のテクスチャをセンサで 3 回撫でる。次にアクチュエータノードとして機能する HaptI/O を実験参加者に握ってもらい、実験補助者はセンサノードとして機能する HaptI/O を用いて先ほどと同様の材料のテクスチャを 3 回撫でる。この時、実験参加者は TECHTILE toolkit で撫でた時と HaptI/O で撫でた時に感じる触感の差異を 5 段階評価 (5. 同じ～1. 全く異なる) で回答する。他の材料でも同様の工程で実

験を行った。本実験は約 10 分間の実験である。実験参加者は 20 代の合計 7 名の男女である。



図 4.13: 触感の品質評価実験で使用了マテリアル

4.6.3 実験結果

触覚伝送後の触感の品質検証結果を以下の表 4.2 と図 4.14 に示す。また、フーリエ解析を行った結果を図 4.15 から図 4.20 に示す。図 4.14 のグラフは測定した 7 人の実験結果の平均値である。TECHTILE toolkit と比較を行った結果、表面が荒く硬いマテリアル(ごつごつ、ざらざら)では、ほとんど差異はなかったが、表面が滑らか(つるつる)また、乾きがあり荒い(じょりじょり)マテリアルでは差異がみられた。この差異がみられる原因として考えられるのが、フーリエ解析を行った結果から、じょりじょりのマテリアルとつるつるのマテリアルは、100[Hz]付近から断続的に周波数レベルが上昇していったためであると考えられる。全体的に TECHTILE toolkit と触感に違いがあるのは、ネットワーク越しに伝送データに圧縮をかけて送ってるためであると考えられる。また、実験参加者から、マテリアルのテクスチャの違いや、表面の粗い滑らかな違いは鮮明にわかる、環境音と一緒に提示されたほうがより分かりやすい、実験補助者と同様になぞる動作をしたほうが分かりやすいなどのコメントを頂いた。また、HaptI/O デバイスの持ち方で感覚や印象が変わるなどの意見も頂いた。

表 4.2: 触感の品質評価実験結果

被験者	テクスチャ					
	ごつごつ	じょりじょり	ふわふわ	つるつる	さらさら	ざらざら
A	3	2	5	4	4	4
B	5	2	5	4	5	5
C	5	3	5	2	5	5
D	4	5	4	4	4	4
E	5	3	5	4	3	3
F	4	3	4	2	4	4
G	5	3	5	4	5	5
平均値	4.42	3	4.71	3.43	4.29	4.28

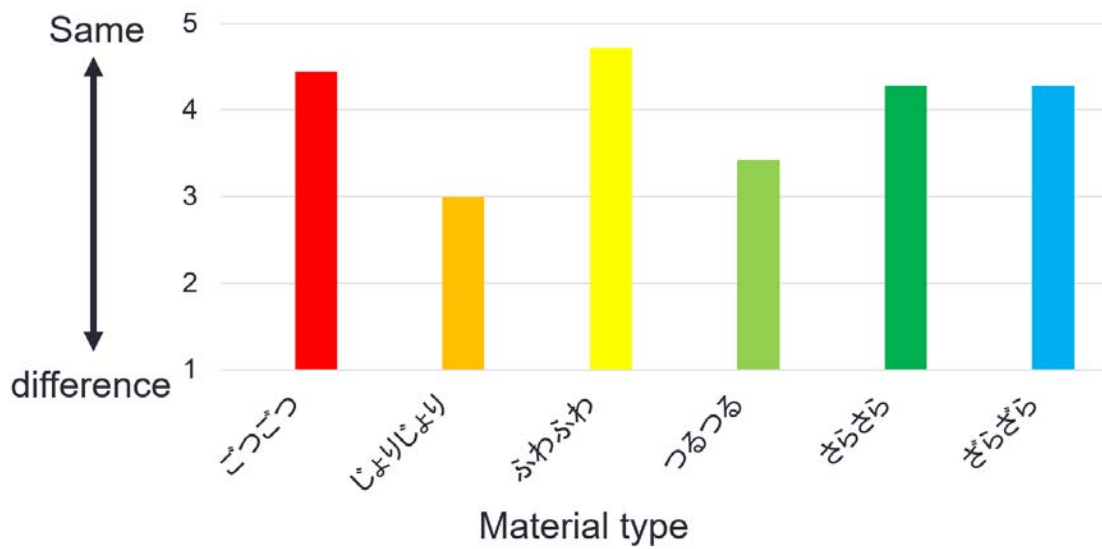


図 4.14: 触感の品質評価実験結果

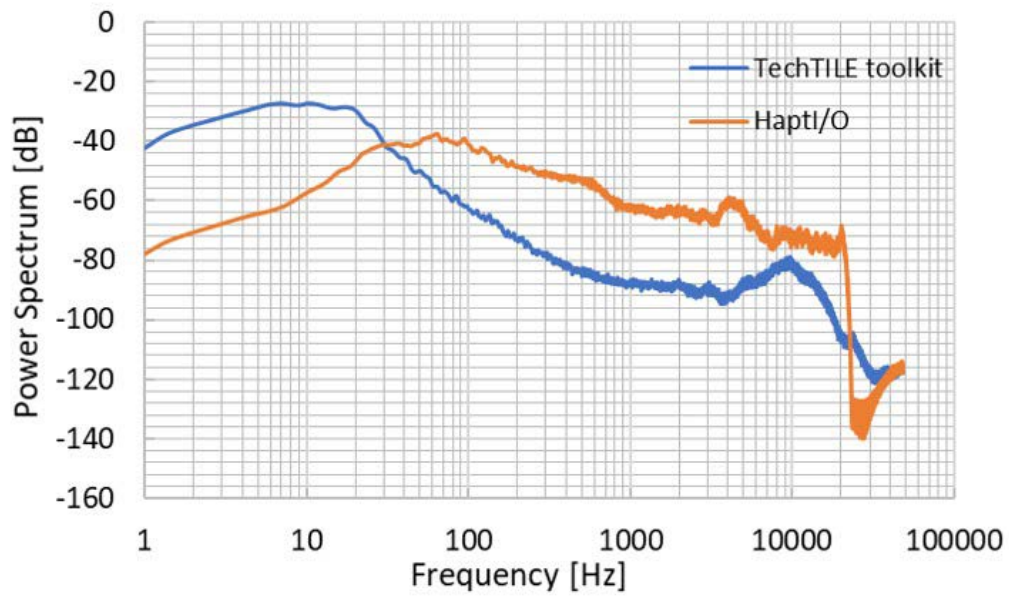


図 4.15: フーリエ解析結果 (ごつごつ)

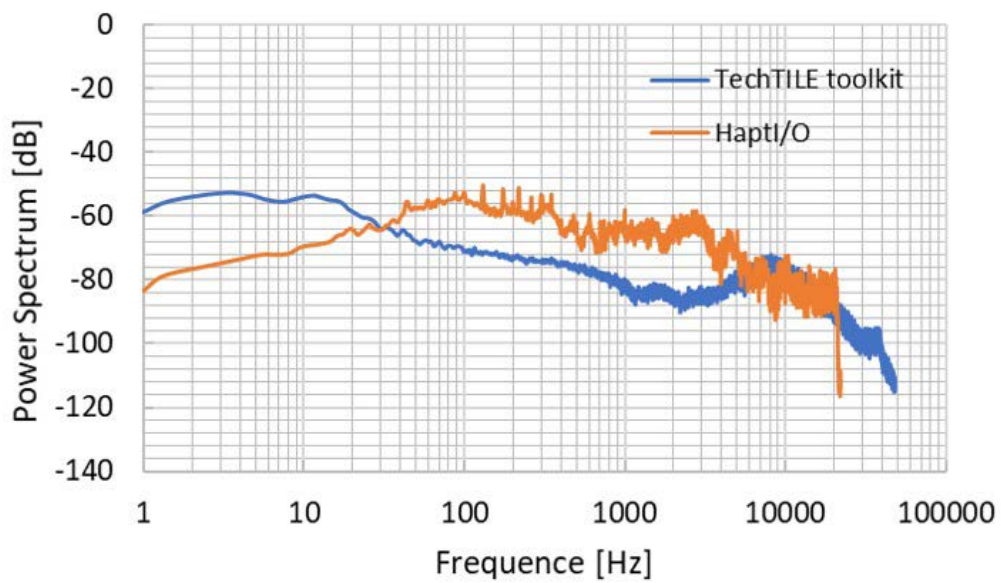


図 4.16: フーリエ解析結果 (じょりじょり)

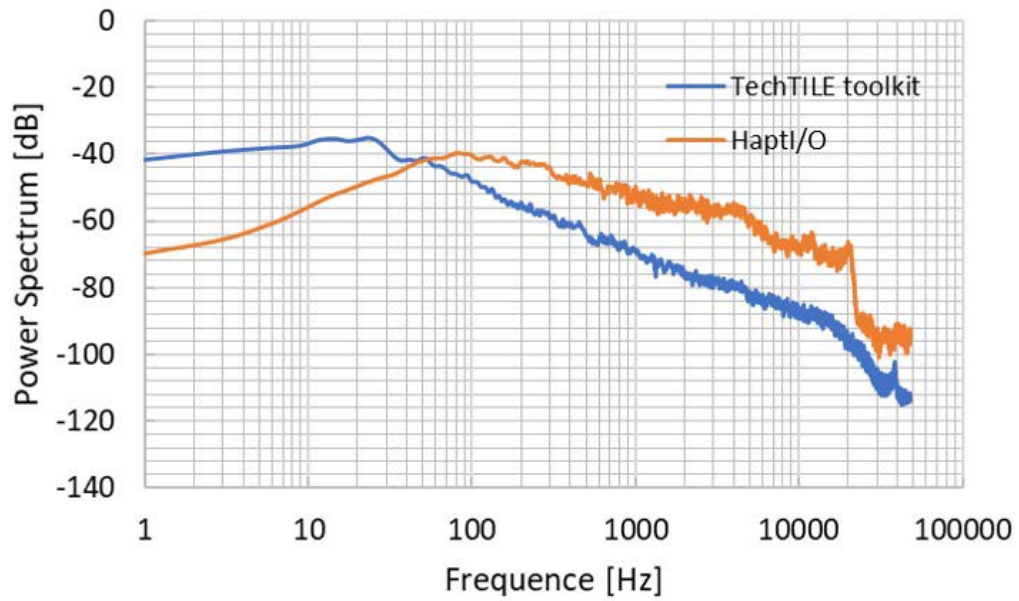


図 4.17: フーリエ解析結果 (ふわふわ)

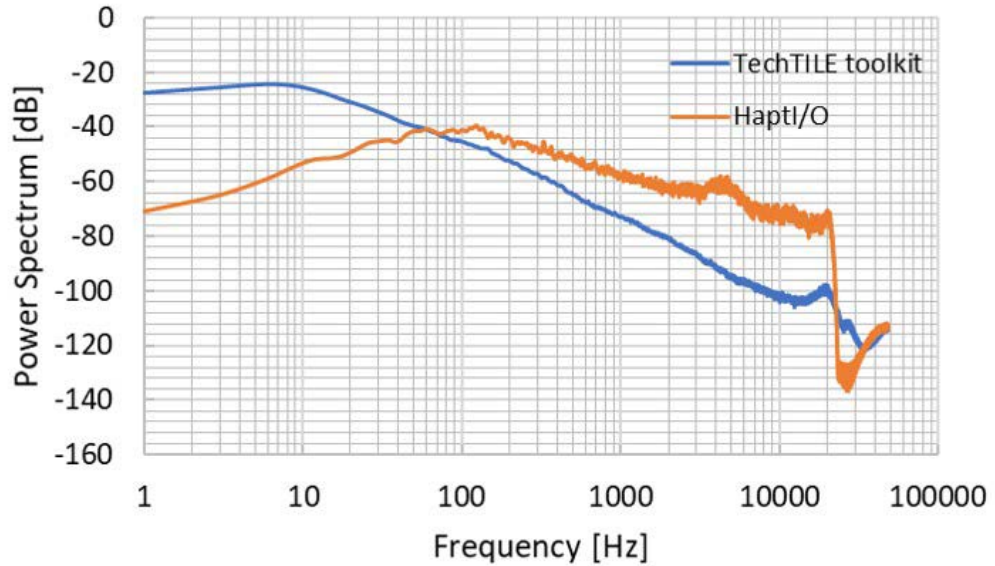


図 4.18: フーリエ解析結果 (つるつる)

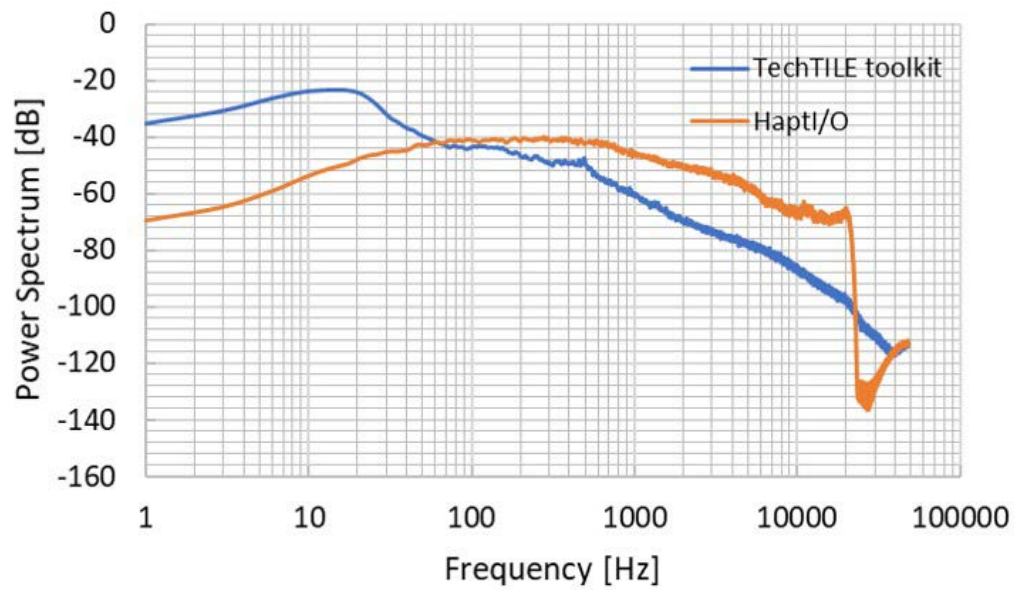


図 4.19: フーリエ解析結果 (さらさら)

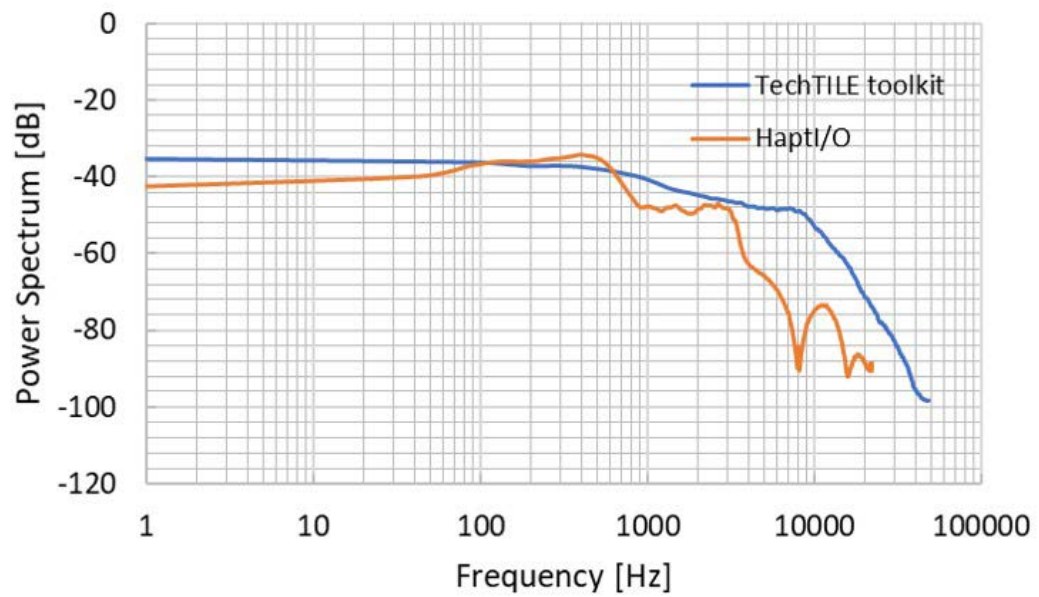


図 4.20: フーリエ解析結果 (ざらざら)

4.7. デモンストレーション

実際に HaptI/O を国内学会である日本バーチャルリアリティ学会 (VRSJ2017) と国際会議である UIST2017, KMD Forum2017 に展示した。VRSJ2017 は 9 月 28 日から 29 日の 2 日間, UIST2017 は 10 月 25 日の 1 日間, KMD Forum2017 は 11 月 3 日から 4 日の 2 日間展示を行った。体験者は 10 代から 60 代程度であった。VRSJ2017 では約 50 人程度, UIST2017 では約 50 人程度, KMD Forum では約 100 人程度の人に体験して頂いた。

実際のデモンストレーションでは、体験者にそれぞれ HaptI/O を持っていたが、その後、送信モードの HaptI/O を所持している 1 人の体験者が様々なマテリアルや素材のテクスチャやぬいぐるみ、洋服、人の肌、紙コップを触っていた。そして受信モードの HaptI/O を所持している複数の体験者に触感を伝送することで、触覚情報がインターネット越しに伝送される世界を想像させるデモンストレーションを行った。体験者の中では素材の触感が伝送されると、“すごい!”

” Amazing !” 等の驚き言葉を発したり、振動触感に合わせて HaptI/O を動かす人が多くいた。また、物の触感だけでなく拍手した際に生じる振動や、自身の身体の触り心地を伝送していた体験者もいた。多くの人から、“遠隔地にいる大切な人と触れることができるようになる” “テレビの中の芸能人やスポーツ選手と触れ合えることができる” 等の意見を頂いた。実際の展示を行っている様子を図 4.21 から図 4.25 に示す。

一方で、触る素材によって触覚情報のゲインが異ったため、ゲインのパラメータを調整する UI を開発する必要があると感じた。

このようなデモンストレーションから、HaptI/O を用いることで、体験者に対して触覚情報をインターネット越しに伝わる世界を想像させ、触覚の共有体験を与えることができた。以上のことから、HaptI/O はインターネット越しに人の身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムであると言える。



図 4.21: VRSJ の展示の様子

4.8. 考察

HaptI/O を検証実験やデモンストレーションを行った結果、人の皮膚感覚や物のテクスチャをセンシングしネットワーク越しに伝送することで触体験が共有できることを確認できた。HaptI/O を無線接続でデモンストレーションを行う際には 200ms 以上の伝送遅延があるため断続的な触感情報を送ることは多少違和感であるが、連続的な触感情報は違和感なく伝送することができた。今後、触覚情報を伝送する際には、映像や音声に加えて送られることが想定されるので、同期を取ることで伝送遅延の問題を解決することができると考えられる。触るテクスチャによって触覚情報のゲインやフィルタリングのパラメータが異なるため、このようなパラメータを調整する UI を設計する必要がある。HaptI/O のハードウェアは小型かつシンプルに構成を行った結果、エンドユーザーでも操作しやすいシステムを実装できた。また小型に構成することができたため身体の様々な箇所に HaptI/O を取り付け全身にフィードバックするといった用途に応用できる。

本システムは様々なアプリケーションに適用できる拡張性を有するシステムで

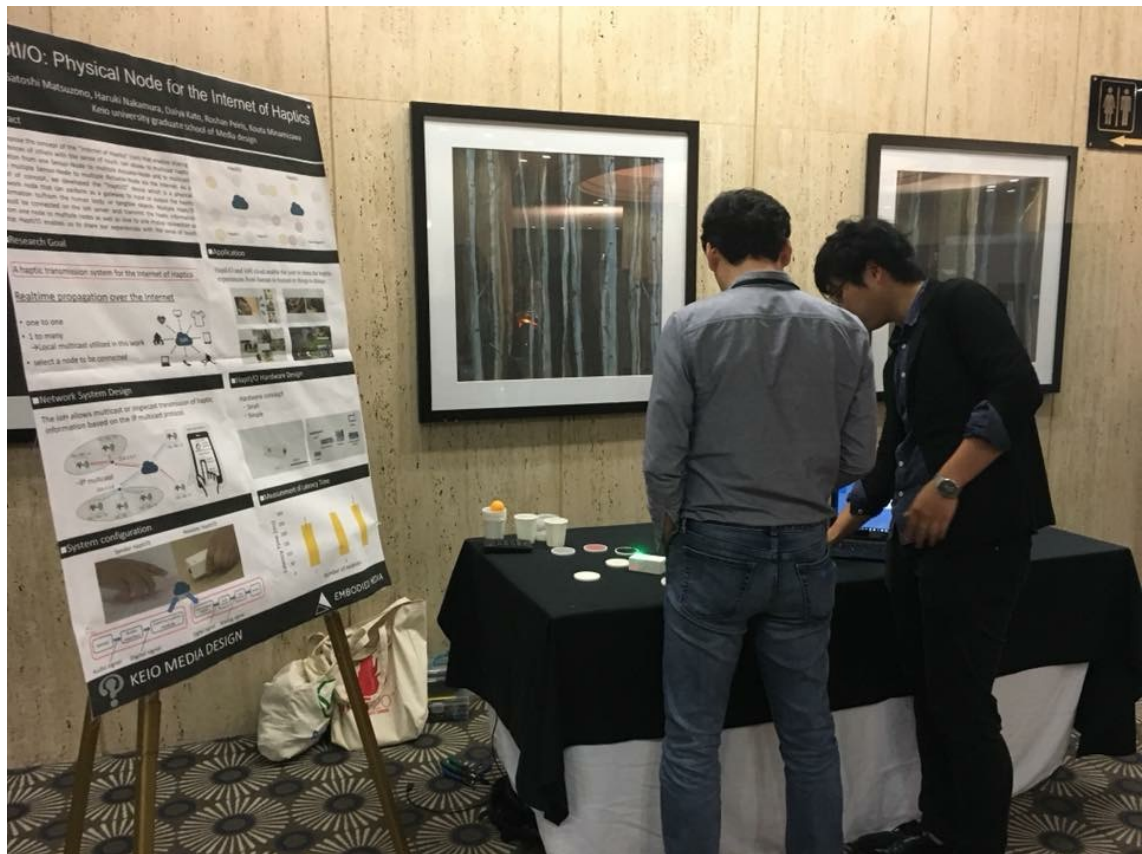


図 4.22: UIST の展示の様子



図 4.23: KMD Forum2017 の展示の様子 1



図 4.24: KMD Forum2017 の展示の様子 2



図 4.25: KMD Forum2017 の展示の様子 3

あると考える。例として、触感情報を用いた熟練工職人の技能の伝達やスポーツ中継、ライブのような多人数での触体験の共有を行う事が可能になる。やがてインターネット越しの触覚伝送が標準化されれば、いつでもどこでも自身の身体的経験の中で得られる触体験を共有することが可能になり、日常生活において新たな体験を提供することができると考えられる。

4.9. 本章のまとめ

本章では、第3章で示した設計要件を満たす HaptI/O の実装を行い、触体験を共有するシステムとしての有効性を示すため検証実験を行った。はじめにハードウェア実装について述べた。HaptI/O は小型かつシンプルで構成するため、使用した素子はすべて小型のものを使用した。本論文では構成する HaptI/O は多人数間のシステムを構築するため HaptI/O デバイスを4台製作した。次に具体的なネットワーク実装とソフトウェア実装を述べた。3章で提案したIP マルチキャストプロトコルを使用し、同一サブネット上で触覚マルチキャストを実現するためのネットワークルーティング、各デバイス間通信を実現するため実装を行った。HaptI/O 間の触覚伝送速度の検証を行ったところ、ハードウェアの性能上、無線接続の場合では200[ms]以上の遅延を計測したが有線接続の場合では約200[ms]以内に収まった。ハードウェアのエンコーディング、デコーディングスピードの向上が必要であると考えられる。HaptI/O を使用して触感伝送後の品質検証を行った。TECHTILE toolkit と比較を行った結果、各マテリアルのテクスチャによって伝送が容易な触感や、困難な触感で分かれた。HaptI/O のセンサを設置する場所や、センシングするテクスチャによってフィルタリングできるシステム等を導入する検討事項を得ることができた。また、実験補助者と同様になぞる動作行う事により、触感の見分けがつくという知見を得た。そして HaptI/O を VRSJ2017 及び UIST2017, KMD Forum2017 にて展示を行った。その結果、HaptI/O を使用した多くの人が触覚情報をインターネット越しに伝わる世界を想像でき、触体験を共有することでよかったです等の意見を頂いた。

第5章

結 論

本論文では、ネットワーク上における触覚を用いた身体的経験の共有システムの基盤概念である IoH を提案した。本概念を確立するため、インターネット越しに触覚情報を伝送するプラットフォーム及び触覚情報の入出力のためのゲートウェイとして機能する物理ネットワークノード HaptI/O を提案し、触体験を共有するシステムを構築した。

第1章では、インターネットと触覚技術の進歩について紹介し、今後のインターネットと触覚の関係性を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、映像や音声、五感を用いた高臨場感通信、多人数間に情報を伝達するマルチキャスト技術、最後に触覚伝送技術の先行研究を紹介した。他者に自身の経験を多人数間で共有するシステムや、またそれがネットワーク間で行われる場合での手法などを先行研究から抜粋し、本論文が行う研究領域を示した。

第3章では、IoH のコンセプトについて述べ、その中でネットワーク越しの触覚伝送に着目し、触覚情報を1対1 また1対多へ選択的に伝送し、人々の日常の様々な身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムである HaptI/O の提案を行った。また、その物理ネットワークノード HaptI/O に必要なシステム設計を行い、実現方法を述べた。

第4章では、第3章で示した設計要件を満たす HaptI/O の実装を行い、触体験を共有するシステムとしての有効性を示すため検証実験を行った。はじめにハードウェア実装について述べ、本論文では多人数間のシステムを構築するため HaptI/O デバイスを4台製作した。次に具体的なネットワーク実装とソフトウェア実装を述べ、触体験を共有するシステムを実現した。HaptI/O 間の触覚伝送速度の検証を行ったところ、ハードウェアの性能上、無線接続の場合では 200[ms] 以上の遅延を

計測したが有線接続の場合では約 200[ms] 以内に収まった。HaptI/O を使用して触感伝送後の品質検証を行った。TECHTILE toolkit と比較を行った結果、各マテリアルのテクスチャによって伝送が容易な触感や、困難な触感で分かれた。HaptI/O のセンサを設置する場所や、センシングするテクスチャによってフィルタリングできるシステム等の検討事項を得ることができた。そして HaptI/O を VRSJ2017 及び UIST2017, KMD Forum2017 にて展示を行った。その結果、HaptI/O を使用した多くの人が触覚情報をインターネット越しに伝わる世界を想像でき、触体験を共有することでよかったです等の意見を頂いた。以上のことから、HaptI/O はインターネット越しに人の身体的経験の中で得られる触体験を共有するシステムであると言える。

このように学会や数多くの展示会で HaptI/O の展示発表を行った結果、いくつかの企業 (NTT と富士通) が IoH のコンセプトに賛同し共同研究を行う事が実現することができた。IoH のコンセプトが実際に社会に組み込まれるためには、一つは既存の通信インフラ上に触覚情報が載り、コンテンツが流通できるプラットフォームを作っていく必要がある。これを NTT と組んで行う事にした。もう一つは、どういった体験の伝送を行えるか、実際のコンテンツを Proof of concept できるか検証する必要がある。コンテンツ検証のほうは実際に 2020 年のオリンピックがあるのでスポーツ観戦のパブリックビューイングの体験をどう届けるか、また体感がどのように生まれるか検証するために富士通と組み行う事にした。結果として、IoH のコンセプトを社会に実装するための第一歩を踏み出すことができた。

本論文では、IoH のコンセプトの 1 つである、自身の触体験を多人数間で共有するシステムを HaptI/O を実装することで実現できた。今後の展望として、現在のインターネットインフラがより発展し、大容量の情報がいつでもどこでも遅延なく伝送できるようになれば、HaptI/O を使用して映像や音声に加えて触覚情報を他者に提示し、自身の身体的経験を伝えることが可能になると考える。その結果、今後遠隔地間の人々とテレビ電話越しに触れ合うことができるようになったり、触感情報を用いた技能の伝達、そしてスポーツ中継のような多人数での体験共有を行う事が可能になると考える。検証実験や展示においてセンシングするデータによって触感の差異が大きく見られたため、触る素材によってゲインやフィル

タリングのパラメータを調整する必要がある。やがてインターネット越しの触覚伝送が標準化されれば、いつでもどこでも自身の身体的経験の中で得られる触体験を共有することが可能になり、日常生活において新たな体験を提供することができると思われる。

謝 辞

本研究の指導教員であり，幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太准教授に心から感謝いたします。沢山の企業案件や学会投稿にチャレンジさせていただき，その度，的確な指導や討論を親身にしてくださいました。心より感謝いたします。

論文執筆だけでなく，自分が無知であったインターネットに関する様々な助言や指導をいただいたり，KMD に入学する機会をつくって下さっ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。

研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の中村伊知哉准教授に心から感謝いたします。

国際会議への論文投稿や研究の方向性に悩んでいる時にいつもサポートして下さった慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の Roshan Peiris 特任助教授に感謝いたします。

研究の助言だけでなくプライベートでもたくさん食事をしたり，相談事にも親身に聞いて頂きました TELEXISTENCE 株式会社代表取締役 兼 最高技術責任者の Charith Fernando さんに感謝の意を表します。今後の貴社の発展を心よりお祈り申し上げます。

書類の提出の先延ばしや，私の無理なお願いをいつも聞いていただきました，秘書の児島絵美理さんに感謝の意を表します。

ネットワーク環境の構築やデバイスの実装など様々な助言や指導をして頂きました，Network Media Project 所属の加藤大弥さんに感謝の意を表します。研究の議論だけでなく，他愛のない話や一緒に食事を行ったり，プライベートの相談事にも親身に聞いてくださったりしました。

Play Project の有馬俊さんには、国際学会に必要な動画の作成の協力をして頂きました。心より感謝いたします。

数多くの企業案件を共に行ったり、研究の相談や論文執筆など数多くの助言を賜りました Embodied Media の先輩である早川裕彦さんに心から感謝いたします。来年度から社会に出る自分にとって、先輩の社会人スキルは常に学ばせていただくことが沢山ありました。

修士1年の頃から一緒に研究を行い、その度に数多くの助言や研究の方向性を提示してくださいました、Embodied Media の先輩である黒木帝聡さんに感謝の意を表します。共に締め切り間際まで3D ディスプレイの実装を行い、Tokyo Game show で展示したことは、私の忘れることない思い出になりました。

私の研究のシステム開発のサポートをしてくださいました Embodied Media の後輩である中村開さんに心から感謝いたします。同じ工学系出身にもかかわらず、飛びぬけた実装力でいつもサポートしていただきました。

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

また、所属するプロジェクトが異ったにもかかわらず、数多くの授業課題や論文提出を締め切りギリギリまで共に粘り乗り越え、苦楽を共に分かち合えた玉澤友海さん、紀室翔子さん、大村和輝さんをはじめとする同期の皆さんに感謝いたします。KMD9 期の仲間がいたからこそ私の順風満帆な KMD 生活をおくれたと感じています。

最後に、大学院に進学したいという私のわがままを承諾し、ここまで育ててくれた両親と兄、姉、弟に感謝いたします。みなさま、ありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] Tachi, Susumu. "Roles of Tactile Display in Virtual Reality (Japanese Title: バーチャルリアリティにおける触覚の役割)." *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines* 122 (2002): 461-464.
- [2] G. Fettweis, S. Alamouti, "5G: Personal mobile Internet beyond what cellular did to telephony", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, pp. 140-145, Feb. 2014.
- [3] Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., and Frodigh, M. (2017). Realizing the tactile internet: Haptic communications over next generation 5G cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(2), 82-89.
- [4] Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., and Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 460-473.
- [5] Botvinick, Matthew, and Jonathan Cohen. "Rubber hands' feel'touch that eyes see." *Nature* 391.6669 (1998): 756.
- [6] 榎並和雅, 岸野文郎 : " 今後の超臨場感にかかわる研究はどこを目指すべきか ", *信学誌*, 93, pp.363-367 (2010)
- [7] 並木育夫, 目黒義隆, 青木茂明, 入江一成, 野村知義, and 齊藤一重. (1997). 高臨場感マルチメディア通信会議システムの構築と評価. *電子情報通信学会論文誌 B*, 80(6), 338-347.

- [8] 榎並和雅, 奥井誠人, and 井ノ上直己. "NICT における超臨場感コミュニケーションの研究戦略: 見る, 聞く, 触れる, 香る, あなたのそばに超臨場感環境を実現 (高臨場感ディスプレイフォーラム 2006)." 電子情報通信学会技術研究報告. EID, 電子ディスプレイ 106.338 (2006): 1-6.
- [9] 井ノ上直己. "超臨場感コミュニケーションにおける人の感じる臨場感評価 (NW 管理, 次世代 NW アーキテクチャ, 次世代 NW のオペレーションアーキテクチャ, トラヒック計測・モデリング・品質, オーバレイネットワーク, 次世代 NW サービス品質, 一般)." 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ 108.287 (2008): 7-1
- [10] 富士通株式会社プレスリリース, "B.LEAGUE ALL-STAR GAME 2018 次世代型ライブビューイング", 2017年11月27日: <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2017/11/27-1.html>
- [11] Deering, Stephen E. "Host extensions for IP multicasting." (1988).
- [12] Rosenberg, J., Kaufman, M., Hiie, M., and Audet, F. (2011). An architectural framework for browser based real-time communications. IETF Request for Comments draft.
- [13] Brave, Scott, and Andrew Dahley. "inTouch: a medium for haptic interpersonal communication." CHI'97 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 1997.
- [14] Sekiguchi, Dairoku, Masahiko Inami, and Susumu Tachi. "RobotPHONE: RUI for interpersonal communication." CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2001.
- [15] Saga, Satoshi, et al. "Haptic video." ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies. ACM, 2005.
- [16] Minamizawa, K., Kakehi, Y., Nakatani, M., Mihara, S., and Tachi, S. (2012, March). TECHTILE toolkit: a prototyping tool for design and education

- of haptic media. In Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference (p. 26). ACM.
- [17] Israr, A., Zhao, S., Mcintosh, K., Schwemler, Z., Fritz, A., Mars, J., ... and Koniaris, B. (2016, July). Stereohaptics: a haptic interaction toolkit for tangible virtual experiences. In ACM SIGGRAPH 2016 Studio (p. 13). ACM.
- [18] Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S., and Shinoda, H. (2016, May). 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 (pp. 1980-1990). ACM.
- [19] Maeda, T., Tsuchiya, K., Peiris, R., Tanaka, Y., and Minamizawa, K. (2017, March). HapticAid: Haptic Experiences System Using Mobile Platform. In Proceedings of the Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (pp. 397-402). ACM.
- [20] Teck, F. W., Ling, C. C., Farbiz, F., and Zhiyong, H. (2012, August). Un-grounded haptic rendering device for torque simulation in virtual tennis. In ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies (p. 26). ACM.
- [21] Miyashita, L., Zou, Y., and Ishikawa, M.: VibroTracker: A Vibrotactile Sensor Tracking Objects, SIGGRAPH 2013, Emerging Technologies, Anaheim, California, USA, 21-25 Jul. (2013)
- [22] Marie-Stephanie Iekura, Hirohiko Hayakawa, Keisuke Onoda, Yoichi Kamiyama, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Smash: synchronization media of athletes and spectator through haptic. In SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications, p. 20. ACM, 2015.
- [23] Mizushina, Y., Fujiwara, W., Sudou, T., Fernando, C. L., Minamizawa, K., and Tachi, S. (2015, March). Interactive instant replay: sharing sports

- experience using 360-degrees spherical images and haptic sensation based on the coupled body motion. In Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference (pp. 227-228). ACM.
- [24] Fettweis, Gerhard P. "The tactile internet: Applications and challenges." *IEEE Vehicular Technology Magazine* 9.1 (2014): 64-70.
- [25] 石原 大資, 大崎 翔悟, 渡辺 喜彦, 中野 亜希人, 羽田 久一: Tele-cLINK: 触覚フィードバックを持った遠隔乾杯システム, 情報処理学会インタラクシオン 2016, pp. 943-946, 2016.
- [26] Hanamitsu, N., Nakamura, H., Nakatani, M., and Minamizawa, K. (2015, November). Twech: a mobile platform to search and share visuo-tactile experiences. In SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications (p. 10). ACM.
- [27] Takeuchi, Y., Katakura, H., Kamuro, S., Minamizawa, K., and Tachi, S. (2012, October). TouchCast: an on-line platform for creation and sharing of tactile content based on tactile copy and paste. In Adjunct proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology (pp. 13-14). ACM.
- [28] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A., and Ishii, H. (2013, October). inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Uist* (Vol. 13, pp. 417-426).
- [29] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telexistence. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 51125118. IEEE, 2012.
- [30] H. Nakamura, N. Hanamitsu, and K. Minamizawa. A(touch)ment: A smart-phone extension for instantly sharing visual and tactile experience. In *Pro-*

- ceedings of the 6th Augmented Human International Conference, AH '15, pages 223224, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [31] Teh, J. K. S., Cheok, A. D., Peiris, R. L., Choi, Y., Thuong, V., and Lai, S. (2008, June). Huggy Pajama: a mobile parent and child hugging communication system. In Proceedings of the 7th international conference on Interaction design and children (pp. 250-257). ACM.
- [32] Rank, M., Shi, Z., J. Mller, H., and Hirche, S. (2010). Perception of delay in haptic telepresence systems. *Presence: teleoperators and virtual environments*, 19(5), 389-399.
- [33] 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* 15.3 (2010): 487-490.

関 連 発 表

国際会議

1. Satoshi Matsuzono, Haruki Nakamura, Daiya Kato, Roshan Peiris, and Kouta Minamizawa, “HaptI/O: Physical Node for the Internet of Haptics”, In Proceedings of the 30th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '17), pp. 53-55, Qubec City, Canada, 2017.10.

国内学会

1. 松園 敏志、中村 開、加藤 大弥、Peiris Roshan、南澤 孝太, ”IP 伝送技術を用いた触覚伝送ノード “ HaptI/O ” の開発”, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 徳島, 2017.9.