

Title	皮膚振動に基づくウェアラブルな触感拡張システム
Sub Title	Wearable haptic augmentation system based on skin vibration
Author	前田, 智祐(Maeda, Tomosuke) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kota)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度メディアデザイン学 第550号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0550

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 2016年度（平成28年度）

皮膚振動に基づく
ウェアラブルな触感拡張システム

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

前田 智祐

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。

前田 智祐

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

奥出 直人 教授 (副査)

岸 博幸 教授 (副査)

修士論文 2016年度（平成28年度）

皮膚振動に基づく ウェアラブルな触感拡張システム

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

私たちは身体を補綴するモノによって生活を支えられている。視覚における補綴は眼鏡、聴覚においては補聴器があげられる。技術の発達に伴い、ただ補綴するだけでなく感覚を拡張するモノが増えてきた。本研究では、視覚における眼鏡、聴覚における補聴器のような触感拡張システム HapticAid を提案する。HapticAid は、指先で得られる触感情報を皮膚振動センサによって取得し、その取得した情報を手首にフィードバックすることによって触感覚を拡張する。HapticAid は補綴するだけでなく、拡張の要素である増強 (Enhancement), 変容 (Enchantment), 共有 (Empathy) することが可能である。HapticAid のシステム実装し、増強 (Enhancement) の検証実験を行ったところ、HapticAid によって触感覚が向上する結果が得られた。変容 (Enchantment) の検証実験では、HapticAid によって触感を変え、触る体験を提供できることを確認した。また、共有 (Empathy) の検証実験では、触感の共有ができることを示唆され、本システムの有効性を確認した。

キーワード：

触感, 触感拡張, ウェアラブルデバイス, 身体拡張, 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

前田 智祐

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

Wearable Haptic Augmentation System based on Skin Vibration

Category: Science / Engineering

Summary

Aids such as eyeglasses and hearing aids can support our daily life. Technology advancement can enhance human ability. In this paper, we propose wearable haptic augmentation system which is HapticAid similar to eyeglasses and hearing aids. HapticAid can augment haptic sensation based on skin vibration sensor from finger tip, provide the haptic feedback on the wrist. We envision three application areas with the HapticAid system: enhance, i.e., amplify and enhance haptic sensations; enchant, i.e., experience new haptic feedback when interacting with passive objects; and empathise, i.e., communication of haptic experiences that allows connecting and empathising with others' haptic sensations.

Keywords:

Haptics, Augmented Haptics, Wearable Device, Augmented Human, Embodied Media

Keio University Graduate School of Media Design

Tomosuke Maeda

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 身体の補綴	1
1.2. 感覚の補綴と拡張	1
1.3. 本研究の目的	4
1.4. 本論文の構成	4
第 2 章 関連研究	5
2.1. ヒトの触覚と触感	5
2.1.1 触覚受容器	6
2.1.2 アクティブタッチ	7
2.2. 触感覚における補綴	8
2.3. 触感覚における増強 (Enhancement) の研究	10
2.4. 触感覚における変容 (Enchantment) の研究	11
2.5. 触感覚における共有 (Empathy) の研究	12
2.6. 本章のまとめ	14
第 3 章 ウェアラブルな触感拡張システムの提案	15
3.1. ウェアラブルな触感拡張システムのコンセプト	15
3.2. 提案手法	16
3.3. システム設計	17
3.3.1 基本設計	17
3.3.2 入力センサの設計	18
3.3.3 出力アクチュエータの設計	18
3.3.4 増強 (Enhancement) の実現方法	20

3.3.5	変容 (Enchantment) の実現方法	21
3.3.6	共有 (Empathy) の実現方法	21
3.4.	システム構成	22
3.5.	Haptic Control Engine の UI	23
3.6.	本章のまとめ	24
第 4 章	HapticAid の実装と評価	25
4.1.	HapticAid ファーストプロトタイプ	25
4.2.	ファーストプロトタイプの目標	25
4.3.	試作	26
4.4.	増強 (Enhancement) の検証	27
4.4.1	粗さ弁別実験	27
4.4.2	粗さ弁別実験方法	28
4.4.3	粗さ弁別実験結果	30
4.4.4	試験片検出実験	30
4.4.5	実験方法	31
4.4.6	試験片検出実験結果	35
4.5.	考察	37
4.6.	モバイルプラットフォームを用いた HapticAid	39
4.6.1	モバイルプラットフォームを用いた HapticAid の目標	39
4.6.2	モバイルプラットフォームを用いた HapticAid の試作	40
4.6.3	皮膚振動センサ用のプリアンプの実装	40
4.6.4	HapticAid パワーアンプとケースの実装	41
4.6.5	Haptic Control Engine	44
4.6.6	Wearable Haptic Actuators	46
4.6.7	変容 (Enchantment) の検証	47
4.6.8	共有 (Empathy) の検証	50
4.7.	デモンストレーション	51
4.8.	考察, 制約, 拡張性	55
4.9.	本章のまとめ	56

第5章 結論	58
謝辞	60
参考文献	62

目次

1.1	眼鏡	2
1.2	補聴器	2
1.3	拡張のイメージ図	3
2.1	各受容器における周波数閾値のグラフ	7
2.2	体の 13 の皮膚部位で測定した触 2 点閾と年齢による感度低下 (触 感認識メカニズムと応用技術	9
2.3	触覚コンタクトレンズ	11
2.4	Lump Detection	11
2.5	STIMTAC	12
2.6	Diminished Haptics	12
2.7	TECHTILE toolkit	13
2.8	Twech	13
3.1	提案手法	17
3.2	皮膚振動センサ	19
3.3	増強のイメージ図	20
3.4	変容のイメージ図	22
3.5	共有のイメージ図	23
3.6	システム構成図	24
4.1	ファーストプロトタイプ of システム構成図	27
4.2	周波数フィルタ	28
4.3	実験の様子	29

4.4	実験結果 A	31
4.5	実験結果 B	31
4.6	実験結果 C	31
4.7	実験結果 D	31
4.8	実験結果 E	32
4.9	実験結果平均値	32
4.10	フローチャート	34
4.11	実験に使用するシートと試験片	35
4.12	実験の様子	35
4.13	実験結果	37
4.14	プリアンプの回路図	41
4.15	プリアンプの実体配線図	42
4.16	プリアンプのケースの蓋	42
4.17	プリアンプのケース	42
4.18	皮膚振動センサ用プリアンプ	43
4.19	HapticAid パワーアンプケースの 3D モデル	44
4.20	HapticAid パワーアンプケース	45
4.21	Enhancement フィルタにおける画面	46
4.22	バンドパスフィルタにおける各パラメータ	47
4.23	Haptic Control Engine	48
4.24	Distortion (上: 入力波形, 下: 出力波形)	48
4.25	Reverb (上: 入力波形, 下: 出力波形)	48
4.26	Wearable Haptic Actuators	49
4.27	システムの外観	50
4.28	Enchantment の検証	51
4.29	Empathy の検証	52
4.30	AsiaHaptics の展示の様子	53
4.31	SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示方法	54
4.32	SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示の様子	55

4.33	SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示の様子 1	56
4.34	SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示の様子 2	56

表 目 次

2.1	各受容器の受容野と応答性と大きさ	7
4.1	75%difference Limen	30
4.2	被験者 10 人における物体検出の結果	36
4.3	試験片検出実験で得られた意見	38

第1章 序

論

本章では、私たちの身の回りにある身体や感覚を補綴するモノを紹介する。補綴する研究だけでなく、現在までに取り組みられている感覚を拡張することに関するモノを紹介し、本研究のモチベーション、目的、課題設定を述べ、本論文の構成を示す。

1.1. 身体の補綴

私たち人間は、技術によって自身の身体を補って生活している。例えば、虫歯になってしまうと治療のために歯を削る必要がある。歯が削れたままでは食べ物を食べてしまうと、その歯に虫歯ができてしまうため、生活に支障をきたす。現在の歯科技術では、削った歯の部分にレジンや金、銀、セラミックといったモノを詰めて歯を補い、不自由がない生活を可能にしている。同様に、手や腕が欠損してしまった場合は、義手や義足を身につけることによって、健常者と変わらない生活を送ることが可能になりつつある。日常に溶け込むような身体を補綴するデバイスの普及は、私たちの生活の一部を豊かにする可能性を大いに秘めている。

1.2. 感覚の補綴と拡張

私たちは身体、特に感覚を通して世界を認識しており、それぞれの感覚はさまざまな要因で衰えたり、欠損をしたりする。私たちの日常の中には、その感覚を補うデバイスが存在している。代表的なモノとしては眼鏡や補聴器である(図 1.1, 1.2)。眼鏡は視力を、補聴器は聴覚を補綴することができる。ここでいう補綴と



図 1.1: 眼鏡



図 1.2: 補聴器

はマイナスになってしまった感覚や能力を健常者と等しくすることである。このように眼鏡や補聴器は日常生活に溶け込むほどの補綴するモノになりつつある。

眼鏡や補聴器はただ補綴するだけではなく、身体を拡張するためのデバイスになりつつある。その一例が眼鏡に情報技術を付加した Google Glass [1] や JINS MEME [2] である。これらのデバイスは、通常的眼鏡の機能に加えて、眼鏡の片隅にディスプレイとして情報を提示や筋電位から自身の身体情報を取得することが可能である。したがって、眼鏡や補聴器は感覚の補綴するだけでなく、身体を拡張するためのデバイスになりつつある。

ここで本論文では、拡張は増強 (Enhancement)、変容 (Enchantment)、共有 (Empathy) が含まれていると定義する。増強 (Enhancement) では、感覚をゼロからプラスにすることである。変容 (Enchantment) では、得られた感覚を変えることである。共有 (Empathy) では、得られた感覚を他者と共有することである。信号で例えば、振幅変化が増強、周波数変調が変容、信号の入れ替えが共有である。これらの考え方をまとめたイメージを図 1.3 に示す。

視覚における増強は、望遠鏡や双眼鏡や顕微鏡といったものである。これらは人間のそもそもの能力では見ることができないような遠いものや小さいものを見ることができる。視覚における変容は、色盲向けの人の眼鏡 [3] である。人間が見える世界を変えることによって人間の能力以上のことができたり、色盲の方の

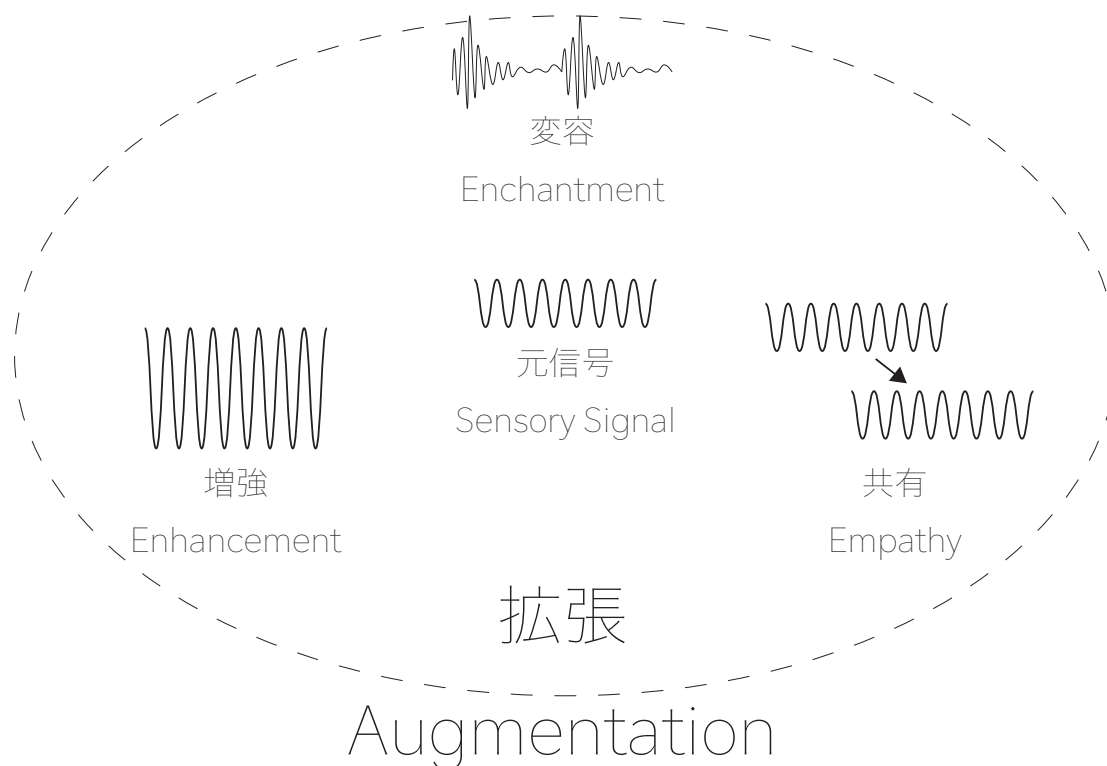


図 1.3: 拡張のイメージ図

見え方を健常者と同じように見えるようしたりすることである。共有では、自分の視点と他者の視点を入れ替えたり共有したりできる Parallel Eyes [4] の開発やワークショップが行われている。聴覚においても同様に補綴だけでなく、拡張することができるようになってきている。増強においては、補聴器や集音器があげられる。補聴器は、個々人の耳にパーソナライズ、ここでは聞こえにくい周波数帯域を増幅して、聞こえにくかった音を聞こえるようにできる。

視覚や聴覚と同様に、触覚おける眼鏡や補聴器のようなデバイスやシステムが日常の中に溶け込むことができれば、触感覚を増強し、職人の繊細な指先の感覚を得ることができる。また、ただ補綴するだけではなく、拡張することができれば、オンラインショッピングでインテリアの触り心地がわかるようになるはずである。

1.3. 本研究の目的

このように視覚や聴覚では、補綴のみならず拡張の研究、開発が進んでいる。そこで本論文では、視覚や聴覚に続いて、人の指先の触覚、触感をコントロールするシステムを提案する。

触覚、触感をコントロールすることは、それらを拡張することであり、拡張には、増強、変容、共有することが含まれていると考えられる。それらの体験、経験を1つのデバイスでできるようになれば、指先の感覚が弱い人の触感覚を回復させたり、モノの触り心地を変えて新しい体験や経験を提供したり、服やインテリアの触り心地を共有が可能になる。本論文では、眼鏡や補聴器のように日常に溶け込み、触感覚をコントロールすることを目的とする。

1.4. 本論文の構成

第1章では、身の回りにある身体を補綴するモノの話から視覚や聴覚に関する補綴、拡張するモノを紹介した。そして現在取り組まれている各感覚における拡張に関する研究について述べた。第2章では、ヒトの触覚、触感についてそれらにおける拡張の要素である増強、変容、共有に関する研究を示し、本論文の立ち位置や貢献を示す。第3章では、本論文で提案するシステムの設計要件やコンセプトについて述べる。続いて、第4章では実際にプロトタイプを実装し、プロトタイプによって指先の触感をどれだけ増強(Enhancement)させられるかを検証した。プロトタイプからウェアラブルなシステムを実装し、タッチパネルの触り心地を変容(Enchantment)する検証実験とHMDとシステムを用いて、共有(Empathy)をする検証実験を行った。検証実験を通して本システムの有効性を確認した。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、人の触覚、触感について述べた後に、拡張の3つの要素である増強、変容、共有の触覚、触感に関する研究を示す。関連研究から本研究の位置付けと貢献を示す。

2.1. ヒトの触覚と触感

本論文では、触覚と触感と触感覚を分けて議論する。本論文で使用する「触覚」の意味は、皮膚感覚と同義であり、皮膚上で何らかの物理的な変化が実際に起こることが生じる感覚である。具体的には圧覚、振動覚、すべり覚、温度覚、痛覚があげられる。「触感」とは、触覚を与えるモノ、身体（心的）イメージの3つを要素とし、これらが喚起する触にまつわる複合感覚として定義する。「触感覚」とは、本論文で定義した「触覚」と「触感」のどちらもが含まれている感覚として本論文では使用する。本論文において、触感覚をコントロールするとは、指先の感覚を回復、増強させることや触り心地を変えること、共有することが含まれている。

本節では、ヒトの触覚受容器を説明し、触覚と触感について述べる。特に触感の感度や能動的知覚であるアクティブタッチについて述べ、人が触るモノを行為の重要性を示す。

2.1.1 触覚受容器

触覚受容器は皮膚下に存在している。指先をはじめとした無毛皮膚部には、形や大きさや配置が異なる複数の触覚受容器が埋め込まれている。

主に触覚受容器は、大別して4つに分類される [5].

- マイスナー小体: マイスナー小体は真皮乳頭内に存在している楕円球上の受容器である。これは受容器の内心が表皮下部の基底層と結合しており、指紋直下に2列に並んでいる。
- メルケル小体: メルケル小体はメルケル細胞とメルケル盤の複合体であり、真皮基底層の最深部に存在している。
- パチニ小体: パチニ小体は皮下組織内、真皮の深層に存在する卵型の受容器である。無髄神経軸索を取り巻く殻と複数の層にから包み込む外皮からなり、これらの間には液体を含んでいる。
- ルフィニ小体: ルフィニ小体は真皮のやや深部に存在する米粒のような形をした受容器である。長軸方向に対して皮膚面が平行である点が特徴である。皮膚が横方向に変形するとインパルスの信号を出力する。

これらの触覚受容器の特性をまとめたものを表2.1に示す。皮膚表面に対して振動刺激を加えたときの振動検出閾値の模式図を2.1に示す。ここで振動閾値とは、加えた振動刺激の振幅がそれ以上であれば、各受容器がインパルス信号を出力する最小振動振幅である。図2.1より、周波数を変化させてもメルケル小体の振動閾値はフラットでありほとんど変化しない。マイスナー小体では、数10 Hz以下の周波数範囲では、周波数が10倍になると振動検出閾値1/10に低下する。これが示していることは、マイスナー小体は数10 Hzの振動変位に対しては敏感である。パチニ小体は振動検出閾値は周波数と共に急激に減少する。特に100 - 300 Hz程度で極小値となる。100 Hz以下の周波数帯域では振動加速度振幅の閾値がフラットであることを示している。

表 2.1: 各受容器の受容野と応答性と大きさ

Receptors	Type	Receptive Field	Adaption	Size
Meissner corpuscle	FA I (RA I)	Small	Fast	L = 20 - 150 μ m, D = 40 - 70 μ m
Merkel's discs	SA I	Small	Slow	D = 7 μ m, T = 1 μ m
Pacinian corpuscle	FA II (RA II, PC)	Large	Very fast	L = 0.3 mm, D = 0.2 - 0.7 mm
Ruffini endings	SA II	Large	Slow	L = 0.5 - 2 mm, D = 0.2 mm

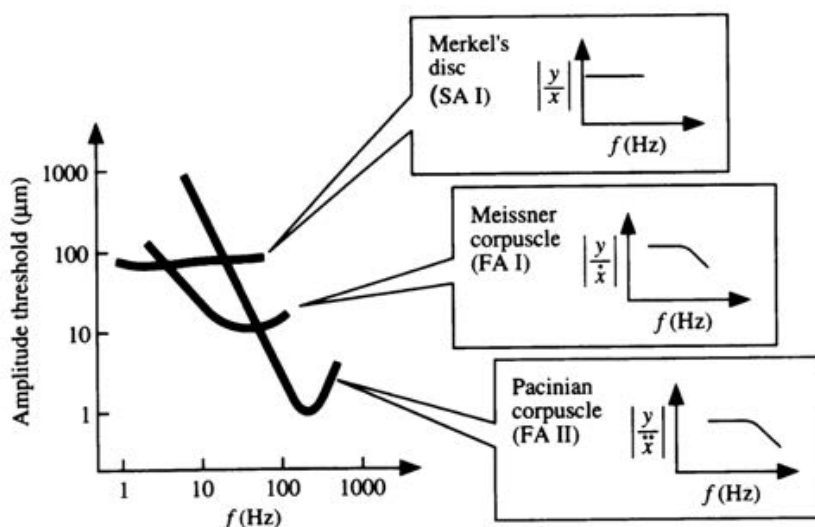


図 2.1: 各受容器における周波数閾値のグラフ (ヒトの指腹部と触覚受容器の構造と機能 [5] から抜粋)

2.1.2 アクティブタッチ

岩村氏は [6], 能動的触知覚, アクティブタッチとは, 手で自由に触ることによって生じる知覚のことだと述べている. Gibson [7] は受動的に与えられる知覚刺激の不自然さを指摘している. また, 能動的に触れることで抽象化された対象を皮膚表面で感じ, 知覚が刺激されている身体ではなく対象に向かうという点で, 受動的な刺激と能動的な刺激は違う感覚であると主張している. 能動的に手で外界を探索するときには, 皮膚表面の触覚だけでなく, 手の動きにより深部にある筋肉, 腱, 関節といった深部受容器も興奮する. アクティブタッチによって生じる

触感は、自身の身体が刺激されているという感覚ではなく、触れている対象を知覚するという体験である。また、その触れている体験に時間軸があれば経験になる。アクティブタッチには、動的アクティブタッチと静的アクティブタッチが存在する。動的アクティブタッチは、探索行為によって得られる感覚である。静的アクティブタッチは、対象を把持している場合に得られる感覚である。物体の識別形状認識において、アクティブタッチは探索の効率が良いと言われている。その能力向上の理由としては、深部感覚関与があげられる。また、粗さ検出の実験においては、アクティブタッチでないものに比べて動的アクティブタッチである方が粗さの検出の閾値が半分程度であると言われている。これらの理由としては、アクティブタッチでは身体動作が含まれた動作に応じるニューロンが多いためと考えられている。したがって、アクティブタッチができるということは、触感における体験や経験をつくるために重要な要素と考えられる。

2.2. 触感覚における補綴

視覚や聴覚はそれぞれ視力検査、聴力検査があり、日常の生活にそれぞれの感覚が支障をきたさないか調べるために検査を行っている。触覚も同様に感度を測定する方法がある。古くから行われている方法としては触2点閾の測定があげられる。文献 [8] では、触2点閾は皮膚上の2点を刺激し、それが2点に感じる限界値のことと述べられている。この触2点閾は触覚の感度の1つであり、視覚や聴覚と同様に年齢によって低下すると言われている。この年齢による感度低下を図2.2に示す。

触覚は加齢以外にも低下する要因がある。代表的な例としては脳卒中 [9] である。脳卒中になってしまうと体性感覚が麻痺してしまうことがある。この体性感覚を回復させるアプローチとして触覚が用いられている。セルフタッチ [10] と呼ばれる、麻痺している腕を麻痺していない方の手で撫でると身体保持感覚が改善される。Enders [11] らは手や手首にホワイトノイズを提示したところ、脳卒中で麻痺してしまった指先の触覚が回復するという研究の報告をしている。Schaechter [12] ら触覚が回復することができると、手が動くようになるという報告をしている。以

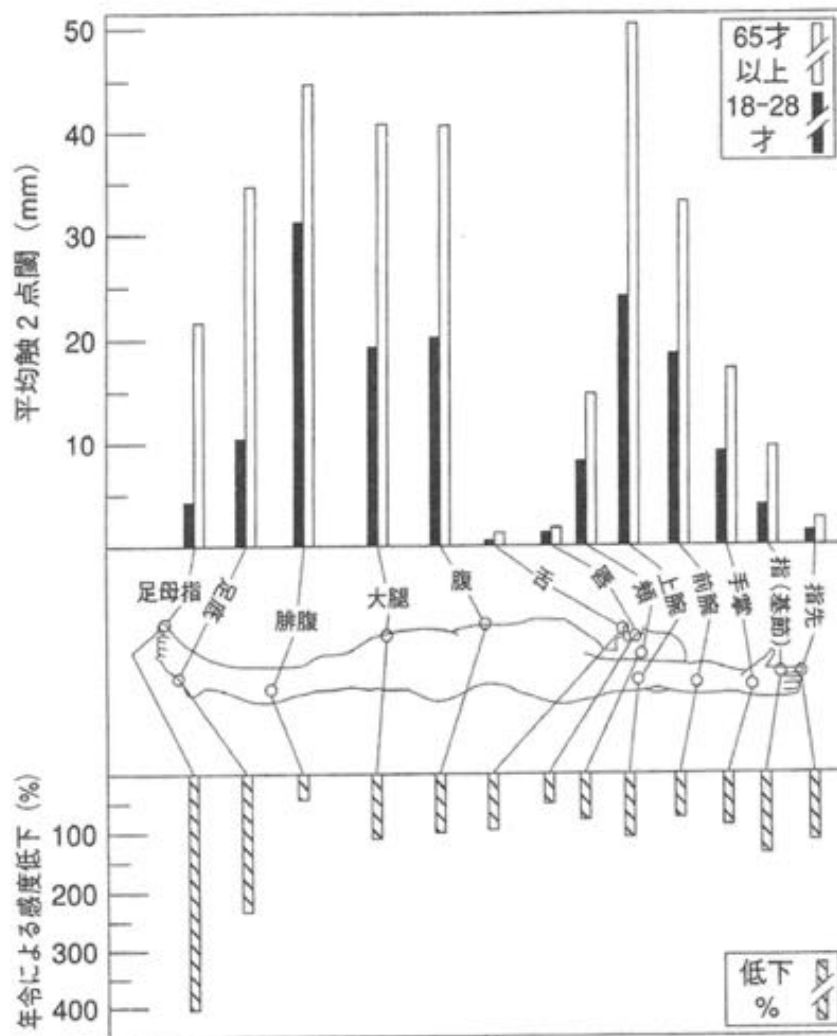


図 2.2: 体の 13 の皮膚部位で測定した触 2 点閾と年齢による感度低下 (触感認識メカニズムと応用技術 [8] から抜粋)

上のように、触覚を補綴するアプローチの研究が行われている。

2.3. 触感覚における増強 (Enhancement) の研究

触感覚を補綴するだけでなく、触感覚を増強することができれば、本来知覚できないような微小な触り心地の変化を知覚することができる。そのように触感覚を増強するシステムで最もシンプルなモノが触覚コンタクトレンズ [13](図 2.3) である。シートにピンアレイが並んでおり、その上に指を置き、物体表面を撫でると本来人間が知覚するのが困難な微小な凹凸の判別を可能している。この原理を利用したシンプルな機構であり、車体の傷への検出といった産業への応用を考えている。医療の分野で触感覚を増強することができれば、病気になりうるしこり等を検出することができる。Tanaka らは反射音を用いたセンサと触覚フィードバックするアクチュエータを用いて腹腔鏡手術下でしこりを検出するシステム [14] や PolyVinylidene DiFluoride(PVDF) をセンサにしたシステム [15] を提案している (図 2.4)。触感覚を増強するシステムが装着型であれば、義手のようなシステムに装着し、物体表面のテクスチャを識別することができる。それを応用し義手にセンサをつけて物体表面のテクスチャを検出し、その信号をフィードバックすることでそれらのテクスチャを識別するシステム [16] が開発されている。触感覚を Virtual Reality や Augmented Reality の分野で適用すれば、VR 空間上で触り心地の再現や現実世界に対して新しい情報を付加することができる。電気刺激によって物体の触り心地を再現する SmartTouch [17] やペン型のデバイスによって力覚を提示する SmartTool [18] や爪に振動子と光検出器を搭載した SmartFinger [19] の研究が行われてきた。

生の指の感覚を増強することができると、デバイスを把持することが可能になる。生の指先を増強するアプローチとして手首や手にホワイトノイズを与えて触感覚を増強するシステム [20] が研究されており、Lakshminarayanan らはその手のどこの部位にホワイトノイズを提示すると触感の増強が有効なのかを調べた。そして Kurita [21] らはホワイトノイズの手首に提示しつつ、他のモノを把持して触感覚の増強を研究をしている。

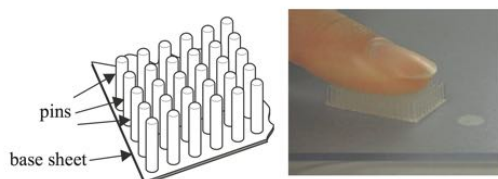


図 2.3: 触覚コンタクトレンズ ([13] から抜粋)

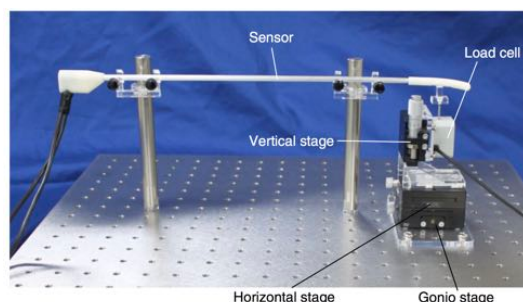


図 2.4: Lump Detection ([14] から抜粋)

2.4. 触感覚における変容 (Enchantment) の研究

触感覚を変えること、変容させることは、本来であれば物体表面のテクスチャを変えなければいけないため、それは容易なことではない。変容することができれば、そこに存在しないはずのテクスチャ感によってインタフェースの補助になる。STIMTAC [22](図2.5) は piezo ベースの振動子によって振動触覚における高周波を提示して、指先に与える摩擦や触感を変え、物体やデバイスとインタラクションを可能にしている。摩擦を与えるのではなく、プロジェクタとフルレンジ振動子を使用して実際の物体の摩擦を変えることで触感を変える Diminished Haptics [23](図2.6) の研究が行われている。振動によって触感を変えるのではなく、タブレット上のタッチパネルに電気を帯電させることで触感を与える TeslaTouch [24] やそれをプログラマブルにした REVEL [25] はさまざまモノに対して触感を与えることが可能になっている。触覚を直接与えずに視覚情報によってタブレット上のタッチパネル上で指がまるで雪の中を歩いている感覚を与える Yubi-Toko [26] が開発されている。

触感を与えるのではなく、減算することも変容の一部である。腕に特定の周波数の振動刺激を与えて、その周波数によって指先の感覚がマスクされる Frequency-specific masking effect [27] の研究も行われている。



図 2.5: STIMTAC ([22] から抜粋)



図 2.6: Diminished Haptics ([23] から抜粋)

2.5. 触感覚における共有 (Empathy) の研究

触感を共有することができれば、インテリアや服の触り心地をオンラインで分かるようになる。触感を音響信号として捉えれば、コンタクトマイクロフォンで触感を取得し、記録、再生を行うことが可能になり、触感を共有することが可能になる.. そのように触感を音響信号として取得している研究は TECHTILE toolkit [28](図 2.7) や StereoHaptics [29] がある。その触感のプラットフォームとして創作や共有するために触感をコピーアンドペーストすることが可能な TouchCast [30] の開発・研究が行われている。これらの得られた音響信号による触感情報を検索するためのシステムとして TWECH [31](図 2.8) がある。これも触感を音響信号として取扱い、ニューラルネットワークを使用して触感の検索を可能にしている。触感の共有をスポーツに応用させたのが SMASH [32] である。さまざまなスポーツで得られる触感を取っ手のような小さいデバイスに振動を与えることでスポーツの共有

を可能にしている。Tamaki [33] らや Nishida [34] らは電気刺激によって触感や身体動作の共有の研究している。



図 2.7: TECHTILE toolkit ([28] から抜粋)



図 2.8: Twech ([31] から抜粋)

2.6. 本章のまとめ

本章では、触感覚の受容器やアクティブタッチについて述べた。触感覚をコントロールすること、拡張することをそれぞれ増強 (Enhancement), 変容 (Enchantment), 共有 (Empathy) の3つの要素に分解して先行研究を示した。増強においては、デバイス越しの増強であるため、他のモノを把持するや自身の指先を使うことが困難である。指先を増強する手首にホワイトノイズを提示システムでは、常に振動が提示され、物体に触れたときだけに振動が提示されるわけではない。触る対象とインタラクションできず、提示させる振動は触感情報であるわけではない。変容においては、振動や電気刺激を使用したシステムは大規模であるため、ウェアラブルかつモバイルなシステムになっていない。共有においては、各研究では共有することができるが、これに増強や変容の機能はない。以上のことから、アクティブタッチや他のモノを把持することができ、指先が使用可能でウェアラブルかつモバイルな触感覚をコントロール、拡張するシステムの研究は未だ行われていない。次章では、アクティブタッチ、自身の生の指先を使用可能でウェアラブルかつモバイルな触感覚をコントロール、拡張するシステムの提案を行う。

第3章

ウェアラブルな触感拡張システムの提案

本章では、ウェアラブルな触感拡張システムの目標を述べ、提案手法の設計要件及びコンセプトを述べる。提案手法の理想的なシステム構成を最後に述べ、ウェアラブルな触感拡張システムを構成する。

3.1. ウェアラブルな触感拡張システムのコンセプト

眼鏡や補聴器のように触感覚においても同様に知覚をコントロールすることができれば、本来知覚ができないような微小な傷を知覚できるようになったり、老化によって衰えてしまった触感覚を回復させることができたり、あるいは身の周りにあるモノに触る体験をより高くすることができるようになる。

従来の触感拡張するシステムは、デバイスを介したモノであるため把持といった手の通常の操作を阻害せずに使用するのが困難であった。確率共鳴による触覚を拡張するシステムが提案されているが、その手にフィードバックする信号は自身の皮膚由来の振動ではない。触感を拡張させるシステムやデバイスの多くは、システムが大規模になってしまうため、ウェアラブルでありながらシンプルなデバイスは提案されていない。

提案するコンセプトは視覚における眼鏡や聴覚における補聴器のように日常生活に溶け込むような触感覚を拡張するシステムである。もし、このようなシステムを実装し生活の中に溶け込ませることができれば、例えば、老化によって衰えてしまった触感覚や脳卒中による体性感覚に麻痺が生じてしまった方の触感覚を

回復や、指先が繊細な指先の感覚を持った職人にしかできないことができるようになるはずである。また、触感覚を回復させることや、増強することだけでなく、触り心地を変えることで日々の中で触る体験、経験を変化させることや触り心地の共有をインターネット越しでできるようになるはずである。現在のSNS(Social Networking Service)では、動画のように視覚と聴覚の共有がされている。本システムが日常の中で使用されれば、触感の共有が身近になり、簡単に触感の共有が可能になる。

これらを達成するために本論文では、ウェアラブルな触感拡張システムとして HapticAid を提案する。HapticAid はウェアラブルかつモバイルでありながら、日常の中に使用できるようなシンプルなシステムである必要がある。具体的な設計要件は次節で述べる。

3.2. 提案手法

触感覚をコントロールすることができれば、システムを通して触感覚を向上させ、本来知覚できないような微小な傷を知覚できるようになったり、身の回りにあるモノの触感覚を変容させ、触る体験をより楽しくできたりする。それだけでなく、取得した触感情報を編集し、他のデバイスに応用でき、インターネット越しでもインテリアのような触り心地が重要であるモノの触感覚を共有できるはずである。先行研究では、ウェアラブルかつモバイルでありながら、把持やアクティブタッチを阻害しないシステムは提案されていない。そこで本論文で提案する HapticAid システムは以下の要件を満たす必要がある。

- 指先を使用することができ、道具の把持や操作を阻害せず、アクティブタッチが可能なこと
- ウェアラブルかつモバイルで日常の中に溶け込むようなシステムであること
- 触感覚を増強したり、変容したり、共有したりといった、触感覚のコントロールすることが HapticAid のシステムでできること

これらのシステム要件を満たすために、指先はアクティブタッチが可能なセンサによって触感情報を取得する必要がある。また、システム要件には指先で得られた触感情報を信号処理によって増幅や変調を行い触感覚のコントロールを可能にする必要がある。指先で取得した触感信号を手首にフィードバックすることによって、触感覚をコントロールするアプローチを行う。本システムのコンセプトを図3.1に示す。

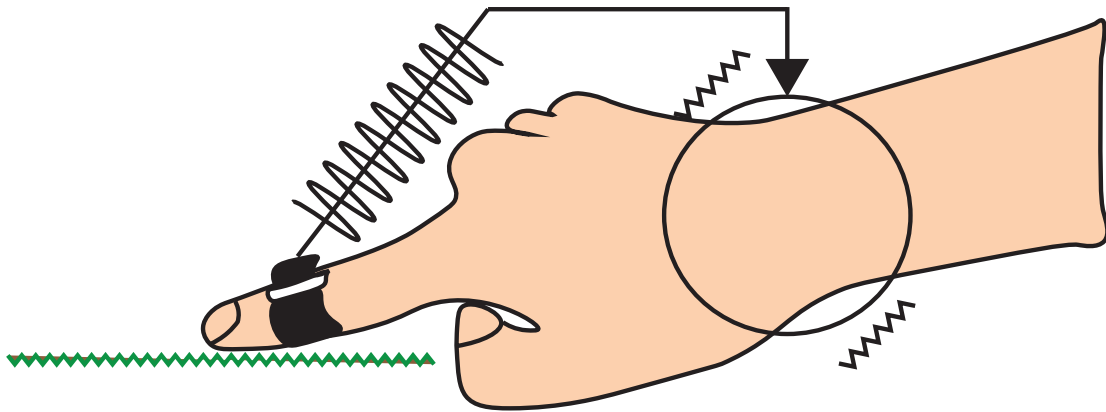


図 3.1: 提案手法

3.3. システム設計

本節では、提案するウェアラブルな触感拡張システムである HapticAid のシステム設計を述べる。はじめにシステムの基本設計を述べ、入力センサの設計、出力アクチュエータの設計を述べ、各入出力で必要とされる要件を示す。続いて、拡張である増強、変容、共有をどのように実現するのかを述べていく。

3.3.1 基本設計

HapticAid は指に加わっている触感を取得し、その取得した触感情報を信号処理を行い、自身の身体の一部にフィードバックするシステムである。本システム

のコンセプトを図 3.1 に示す。HapticAid は大別して 3 つのモジュールに分割することができる。各モジュールは指先に加わっている触感を取得するためのセンサ、その取得した触感情報に対して信号処理をするプロセッサ、信号処理をした後にフィードバックするアクチュエータである。

3.3.2 入力センサの設計

触感情報を取得するセンサにはさまざまなモノがある。TECHTILE toolkit [28] や TWECH [31] はコンタクトマイクを使用して、その取得した音響信号を触感情報として使用している。しかし、コンタクトマイクでは環境音を少なからず取得してしまうため、それが触感情報のノイズになってしまうことや指につけてしまうと触れる対象とマイクが干渉してしまうという問題がある。本システムでは、把持やアクティブタッチを阻害されないことが重要であることから、皮膚振動センサ [35] を選択した。皮膚振動センサは Polyvinylidene Difluoride(PVDF) を使用したセンサであり、皮膚で生じる微小な変化、すなわち指先で生じる皮膚振動を検出でき、指の第二関節、第三関節に巻きつけて使用することができる。皮膚振動センサは、触れる対象とセンサが干渉しないため、アクティブタッチを阻害しないという特徴を持っている。本システムでは、指先で取得できる音響信号を触感情報とし、その音響信号は皮膚振動センサから取得することで、アクティブタッチを可能にしつつ環境音といったノイズを取得せずに触感情報を取得することが可能である。皮膚振動センサを図 3.2 に示す。

3.3.3 出力アクチュエータの設計

HapticAid は取得した触感情報を自身の身体にフィードバックするという構成である。ここで、フィードバックする部位は手首に設定した。先行研究である確率共鳴を用いたシステム [11] [36] [20] では、指や手、手首に振動刺激を与えている。本システムも同様に手の周辺である手首に触感情報を提示する。手首においても触感増強する先行研究があるため、触感増強の効果が出る可能性があるためである。また、取得した触感情報をフィードバックするシステムであるため、入

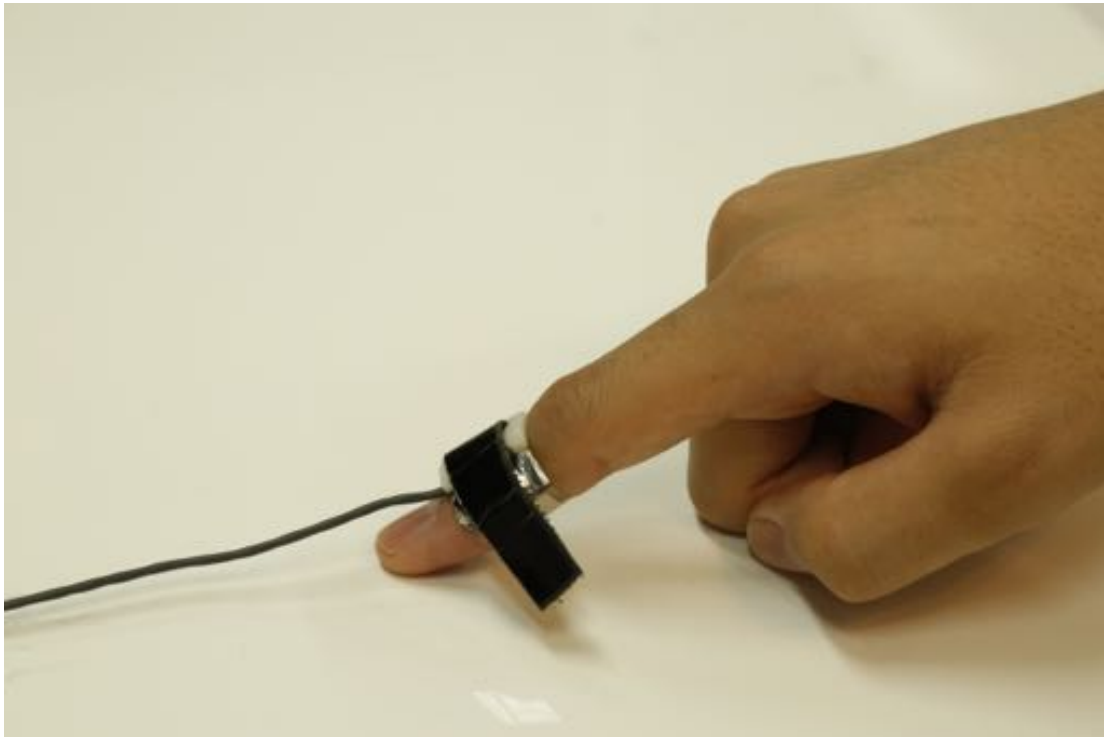


図 3.2: 皮膚振動センサ

力するセンサから離れていることがハウリング防止の観点から望ましい。腕時計を身につける習慣がある人いることが本システムで手首に触感フィードバックを与える理由である。

本システムはウェアラブルであることが必要条件であり、手首にフィードバックすることから腕時計サイズのアクチュエータを使用する必要がある。また、触感情報は取扱が容易な音響信号を使用することが望ましい。振動モータのような周波数応答がないモータでは設計要件を満たすことができない。そこで使用するアクチュエータはボイスコイル型に選定した。ボイスコイル型のアクチュエータは、応答性が早く周波数によってさまざまな触感を提示することが可能である。特に触覚におけるパチニ小体が振動刺激の 100 - 300 Hz で反応するため、この周波数帯を出力できる必要がある。以上のことを踏まえ、今回使用するアクチュエータは、Forcereactor Hybrid Type(アルプス電気)を選定した。このアクチュエータ

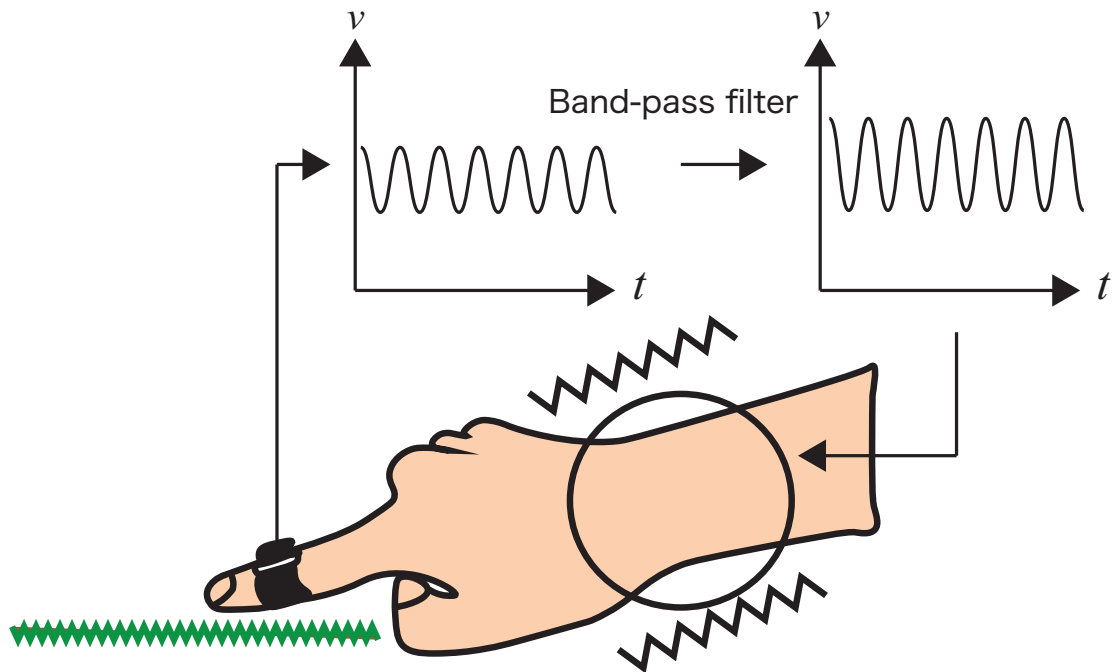


図 3.3: 増強のイメージ図

は、腕時計に収まるサイズでありながら、ボイスコイル型アクチュエータであるので、振動モータのように単一の振動ではなく幅広い振動を提示することが可能である。

3.3.4 増強 (Enhancement) の実現方法

触感覚を増強する方法は、取得した触感情報の振幅を増やし、提示することである。例えば、ただ振幅を増幅するだけではなく、高速フーリエ変換 (FFT) におけるパワースペクトルにおいて、ある特定の周波数帯だけをバンドパスフィルタによって強調することができれば、例えば特定のテクスチャを持った素材を見つけやすくなる。それだけでなく、逆にテクスチャの特定の周波数帯だけを下げることによって別のテクスチャとのコントラストを強調させ触感を増強することが可能になる。この増強のイメージ図を図 3.3 に示す。

3.3.5 変容 (Enchantment) の実現方法

音を変化させる効果音 (Sound effect) があるように、触感、触覚においても触り心地を変化させることや効果触 (Haptic effect) を触る対象に対してできれば、身の回りにあるモノに対して新しい体験、あるいは経験を与えることが可能になる。触感覚を変容させることは触り心地を変えることである。しかし、触る対象や物体そのものの形状を変化させたり、形状を変化させたりすることは容易ではない。そこで、取得した触感情報に信号処理を加えて、その触感を自身の部位に提示することができれば触り心地を変えることができる。例えば、取得信号に対して変調することができれば、触感を変えることができる。変容のイメージ図を図 3.4 に示す。提案するシステムでは音響信号、すなわち振動による触感提示デバイスであることから、粗さと柔らかさを表現することに焦点を当てる。信号処理における粗さとは、振幅を増幅させるだけでなく、波形を矩形波にすることによって表現が可能になる。そこで、粗さを表現する信号処理には Distortion と呼ばれる信号処理を行う。Distortion は取得した波形に対して、sin 波形の信号を矩形波に変化させることによって粗さを強調する。柔らかさを信号処理で表現するためには、時間伸縮による表現によって柔らかさを提示する。触る対象にタップをするとき、インパルスな波形を取得できる。柔らかい物体に対してタップすると、インパルスな波形が徐々に減衰していく波形になる。そこで、信号処理では Reverb と呼ばれる信号処理を行い、インパルスの波形を徐々に減衰するように信号処理を行うことによって柔らかさの表現を実現する。

3.3.6 共有 (Empathy) の実現方法

触感覚を共有することは、触り心地を記録したり再生できたり、リアルタイムで送受信ができたりの必要がある。触り心地を共有するためには無線技術である WIFI や Bluetooth が必要である。また、記録したり再生したりするためのプラットフォームである必要がある。そこでシステムにはこれらの機能を入れておく必要がある。触感覚の共有のイメージ図を図 3.5 に示す。

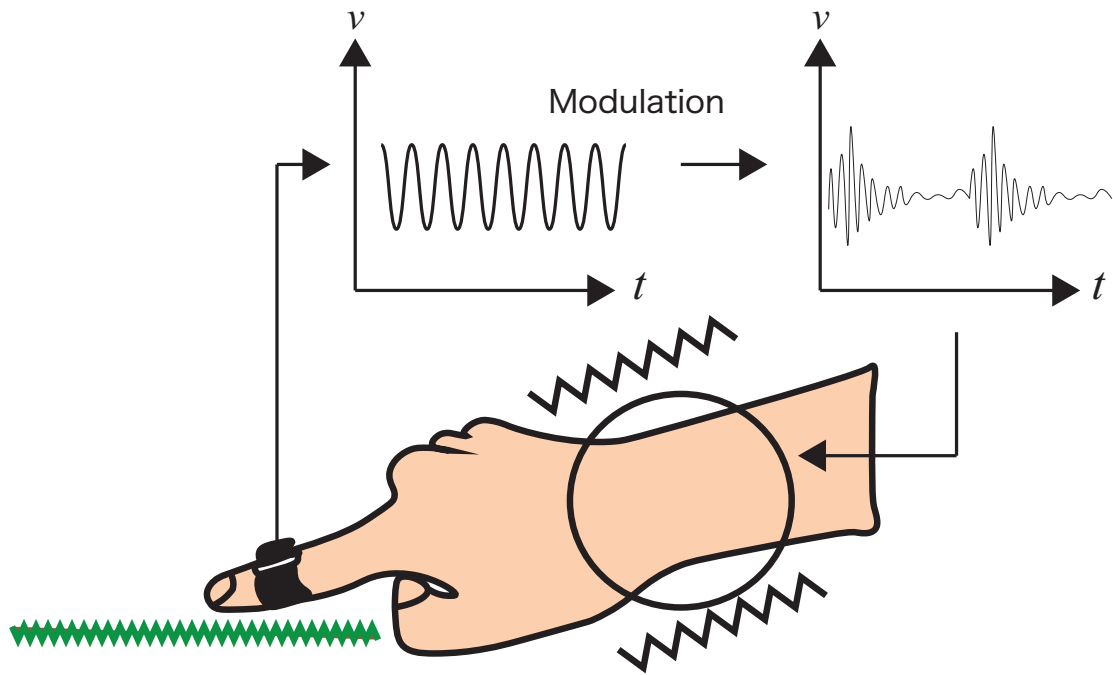


図 3.4: 変容のイメージ図

3.4. システム構成

以上のことを踏まえシステム構成を行う。入力するセンサには皮膚振動センサを用いる。また、触感をコントロールするためのシステムを Haptic Control Engine と名付け、これはモバイルプラットフォームである携帯端末を使用する。携帯端末を使用すれば、WIFI や Bluetooth といった無線の機能が使用可能になり、モバイルかつウェアラブルが可能になる。この携帯端末のケースにパワーアンプを入れ、アクチュエータを駆動できるようにする。このアクチュエータは指や手首とさまざま形になるようにするため Wearable Haptic Actuators と名付け、システムの構成図を 3.6 に示す。

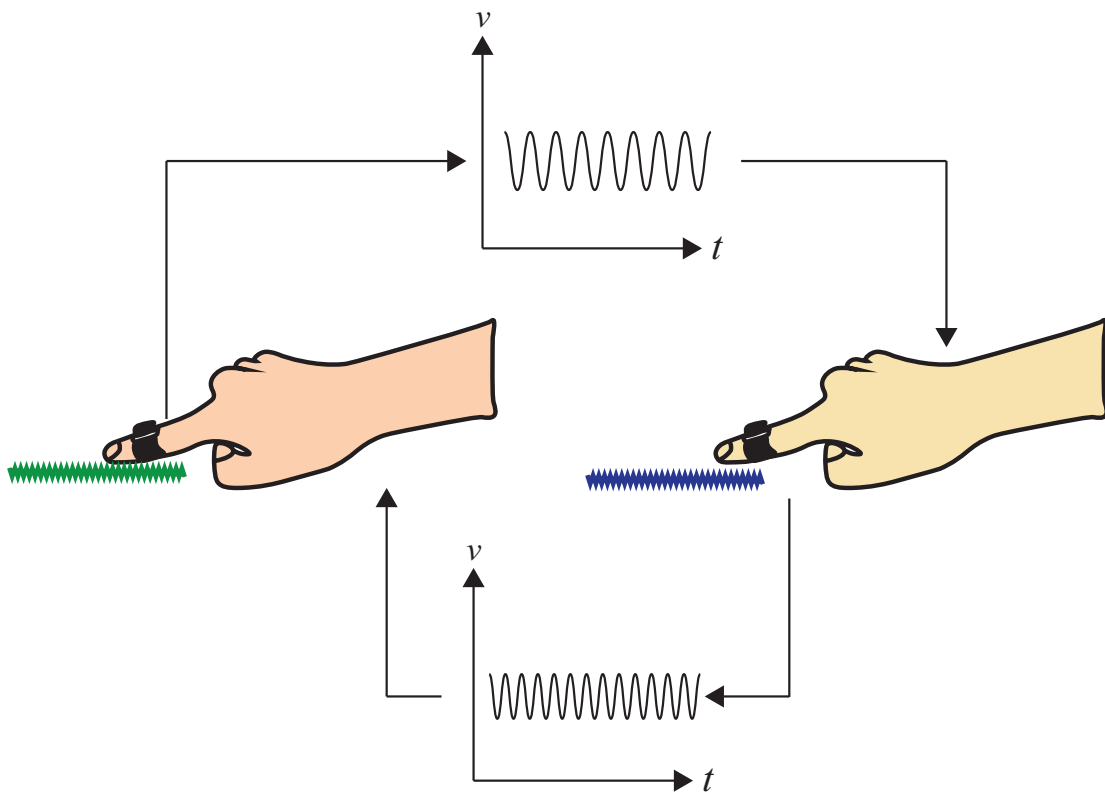


図 3.5: 共有のイメージ図

3.5. Haptic Control Engine の UI

本システムでは、触感信号を音響信号として捉えているため、増強における必要な信号処理はバンドパスフィルタが一例である。バンドパスフィルタを操作するためには、振幅、中心周波数、選択度を操作する必要がある。これらのパラメータを簡単に操作するために、本システムでは各パラメータに対してスライダーバーを用いて操作するように設計を行う。音響信号を処理するグラフィックイコライザのような見た目にする事で直感的に操作することを可能にする。

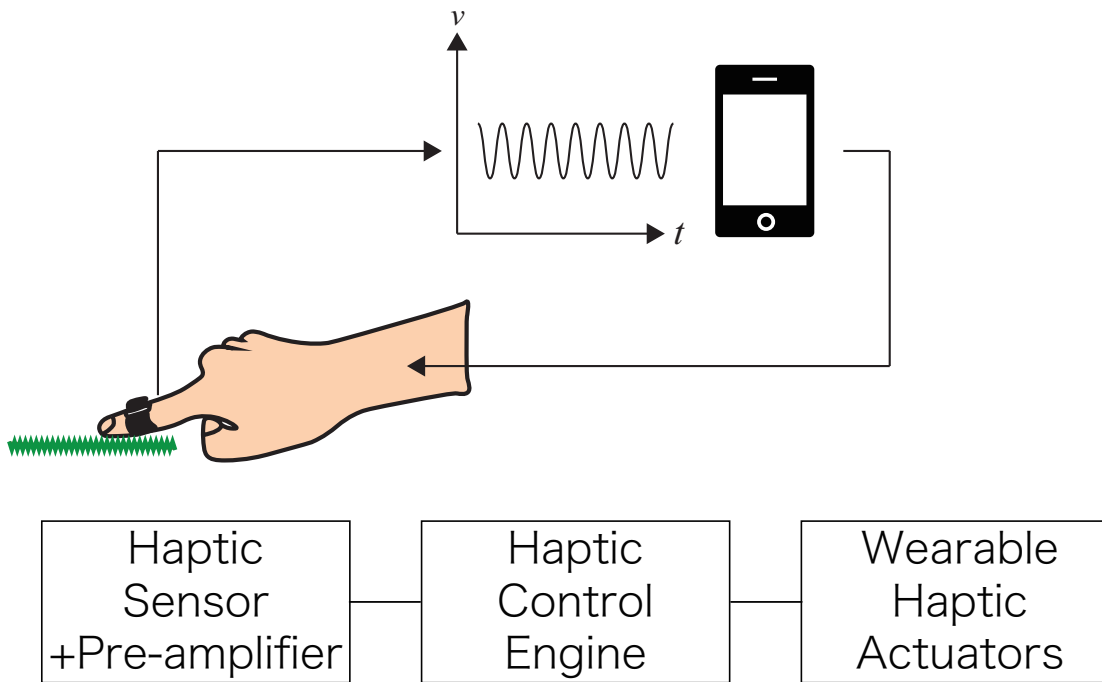


図 3.6: システム構成図

3.6. 本章のまとめ

本章では、システム的设计要件を述べ、各モジュールである入力センサ、出力アクチュエータ的设计要件を述べた。また、拡張である増強、変容、共有の実現方法を述べた後にこれらを実現するための HapticAid システム構成を示した。

第4章

HapticAidの実装と評価

本章では、第3章で作成したシステムを元にウェアラブルかつモバイルなシステムとして実装を行った。目標とするシステムを述べた後に、具体的なシステム設計を示す。そして、設計したシステムの展示を行った。

4.1. HapticAidファーストプロトタイプ

HapticAidを実装するためにファーストプロトタイプを開発した。本節では、ファーストプロトタイプの試作とその評価実験を述べる。

4.2. ファーストプロトタイプの目標

HapticAidには、拡張である増強 (Enhancement), 変容 (Enchantment), 共有 (Empathy) の要素が必要である。はじめに拡張の1つである増強を実現するためのシステムを実装する。音響信号に信号処理を行うと少なからず遅延が生じる。特に触感覚では、この遅延によって感覚に影響を及ぼしやすいため、極力遅延が少ない方が良い。そこで、まずファーストプロトタイプでは、信号処理にコンピュータを用いるのではなく、ハードウェアであるイコライザを用いることにした。ファーストプロトタイプでは、ハードウェアでHapticAidを構築し、触感覚を増強させることを目標とする。

4.3. 試作

ファーストプロトタイプのシステム構成図を図3に示す。ファーストプロトタイプでは以下のモノを使用する。

- Wearable Skin Vibration Sensor: 指先に加わっている触感情報を取得するセンサである PVDF フィルムを用いた皮膚振動センサ [35] である。図 4.1 に示すように、本センサは指の中節部に PVDF フィルムを巻きつけ、皮膚で生じた微小な変化、すなわち振動を検出することができる。また、従来の触感情報を取得するセンサの1つであるコンタクトマイクと大きくなる点として、指先及び触れる対象と直接干渉しないことと環境音といったノイズを取得せず触感情報である皮膚振動を取得できるという特徴を持っている。
- Pre-amplifier: 入力する皮膚振動センサが取得できる最大電圧が約 $20mV$ であるため、直接パワーアンプやイコライザに入力するには不十分である。そこで今回は PVDF フィルム用のプリアンプである PIEZO LAB AMPLIFIER を用いることにした。
- Frequency filter: 得られた触感情報に対して、今回は信号処理を行うため、グラフィックイコライザによって周波数フィルタを構成した。この周波数フィルタは、皮膚振動センサの特性によって低周波数領域が強く検出される。そこで 250 Hz 周辺でローカットし、 $250 - 1000\text{ Hz}$ ではゲインを上げ、アクチュエータから提示される振動を実際に得られる触感に近づけている。
- TECHTILE amplifier: 周波数フィルタによって触感情報を信号処理した後に TECHTILE toolkit [28] の TECHTILE アンプに入力してアクチュエータを振動させる。TECHTILE アンプはパチニ小体が反応する $100 - 300\text{ Hz}$ の周波数帯域を強調して出力できるパワーアンプである。
- Augmented Haptic Wristband: 本システムをウェアラブルなシステムとして構成するために 4.1 に示すような 3D プリンタ (Stratasys uPrint) によって印刷された筐体にボイスコイル型振動子である Forcereactor Hybrid Type(アルプス電気) を内蔵し、シリコンバンド (Moff Band) に埋め込んだ Augmented

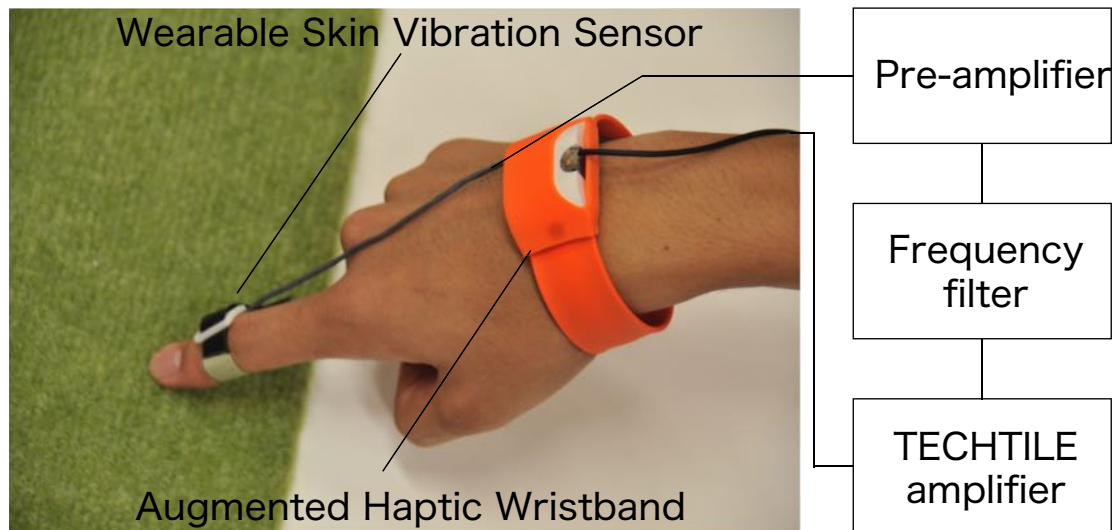


図 4.1: ファーストプロトタイプのシステム構成図

Haptic Wristband を開発した。本デバイスは、入力された触感情報を手首に提示できる。また、自身の指先から取得される信号を自身に振動刺激として提示するため、設計要件で示したように手首に提示している。

4.4. 増強 (Enhancement) の検証

本節では、触感の増強 (Enhancement) の検証実験を行った。検証実験には、紙やすりを用いた粗さ弁別実験と試験片検出を使用した。

4.4.1 粗さ弁別実験

作成したプロトタイプが触感拡張に対して有効が否か評価するために、紙やすりの粗さ弁別の心理実験を行い、システムを身につけることで指先の感覚が向上するか否かを評価した。

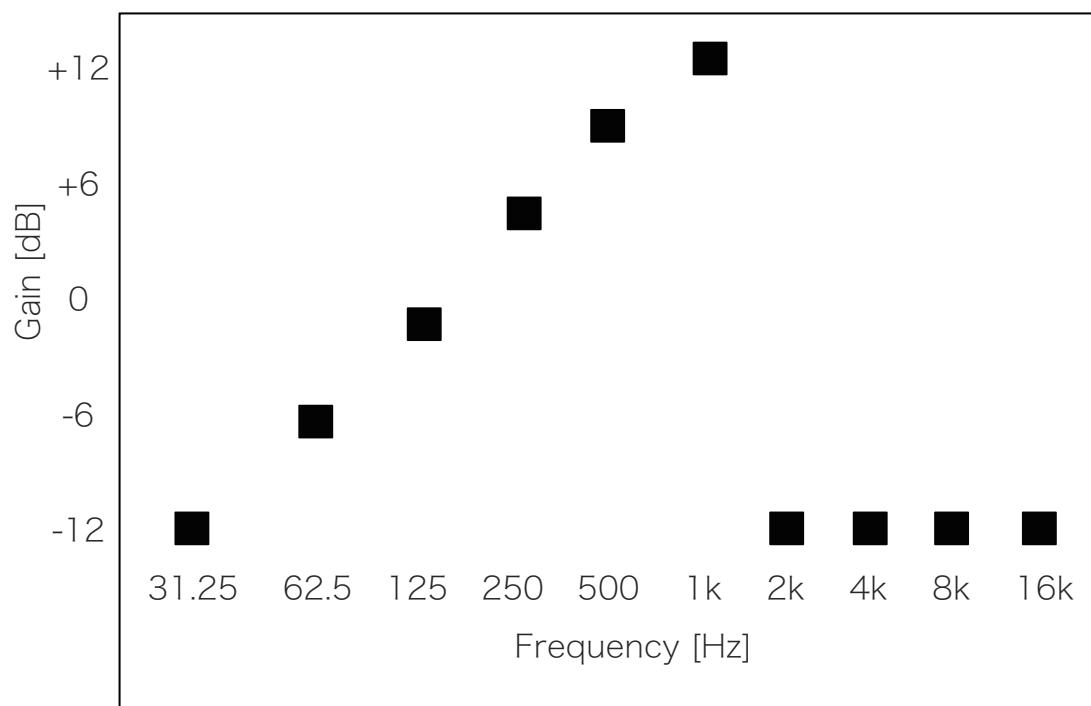


図 4.2: 周波数フィルタ

4.4.2 粗さ弁別実験方法

本実験では以下の2条件を比較する。

- Null condition: 本条件では、システムを身につけるが何も触感フィードバックを与えない状態。すなわちシステムがOFFの状態である。
- Augmented condition: 本条件では、手首に指先から得られた皮膚振動を増幅した信号を手首にフィードバックする。このとき、周波数フィルタは、30 - 250 [Hz] をローカットしている。文献 [35] より、皮膚の伝搬周波数特性の逆関数に近いものを使用している。このときのグラフィックイコライザによる設定を図 4.2 に示す。

本実験では恒常法を利用する。実験参加者は5人で全員20代である。標準刺激には、紙やすりの240番を使用した。比較刺激には、120, 150, 180, 240, 320,



図 4.3: 実験の様子

400, 600 番を使用した。実験参加者ははじめに1回目の紙やすりを2回撫でることができる。次に同様に2回目の紙やすりを撫でる。このとき、実験参加者は1回目と2回目のどちらが滑らかであったかを回答する。標準刺激は紙やすりの番号は固定で1回目と2回目のどちらかにランダムに提示される。標準刺激は紙やすりの番号ランダムで1回目と2回目の刺激提示もランダムである。本実験は各紙やすりに対して、10試行、7つの刺激、各2条件で計140試行を各実験参加者に行った。本実験は約30分の実験である。また、本実験の全てにおいて、実験参加者はホワイトノイズを流したノイズキャンセリングヘッドを身に着け、アイマスクも身に着け、視覚と聴覚の情報を遮断されている。本実験の様子を図4.3に示す。

4.4.3 粗さ弁別実験結果

粗さ弁別実験の結果における 75%difference Limen を表 4.1 に示し、その各図 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 に示し、実験結果の平均値を図 4.9 に示す。粗さ弁別の平均値ではほとんどシステムなしとありではほとんど同じであるが、多少システムありの方が触感覚が向上している傾向 (約 5%) が見られる。また、各実験参加者の結果をみると、予め生の指の感覚で結果が良い人は、それ以上触感覚が向上せず、逆に実験参加者に与えている触感フィードバックがノイズになっている可能性がある。一方で、本実験において触感覚があまり高くないと判断できる図 4.4, 4.8 の実験結果においては触感覚が向上している。したがって、本実験においては、触感覚が高くない人に本システムを適用すると触感覚が向上する傾向が得られたと考えられる。

表 4.1: 75%difference Limen

Participants	Null	Augmented
A	68	54
B	61	63
C	53	67
D	57	61
E	59	47
Average	63	61

4.4.4 試験片検出実験

本システムに触感覚を増強させる効果があるかを確かめるために、視力や聴力検査のように、触力検査に相当する実験を考案した。本研究で行った触力検査は、試験片をフェルトシートの下に置き、被験者が人差し指でフェルト表面を撫で、フェルトシート下に隠された試験片を検出するというものにした。本評価実験で

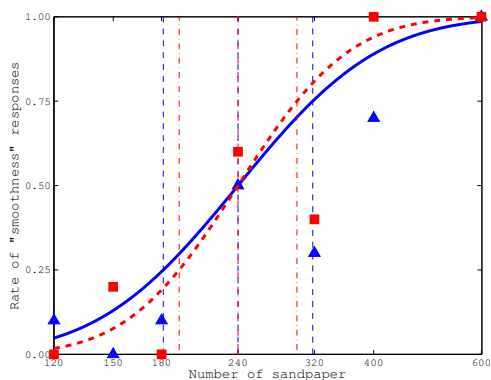


図 4.4: 実験結果 A

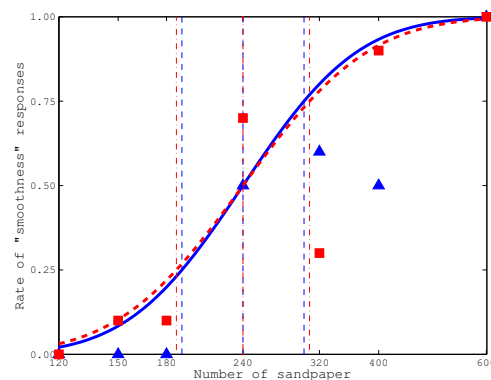


図 4.5: 実験結果 B

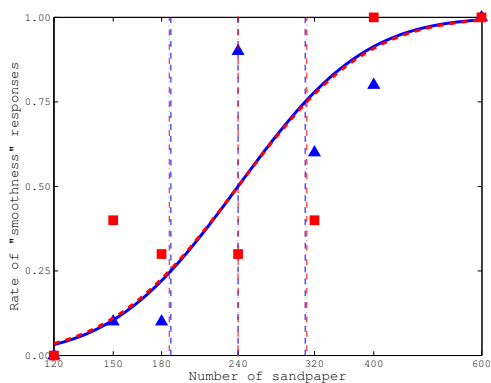


図 4.6: 実験結果 C

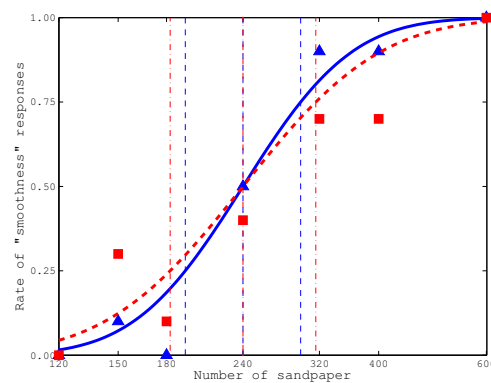


図 4.7: 実験結果 D

は、本システムを身につけることで、評価実験において、試験片の検出率が上がり、システムが触感覚の拡張・回復に使用できるのでないかという仮説を立てる。

4.4.5 実験方法

本実験に使用した実験用具を図 4.11 に示す。フェルトシート (厚み 3mm) の下にポリプロピレンのシート (約 0.01mm) が貼り付けられており、その下に試験片を配置する。フェルトには 3×3 のグリッド (それぞれ約 $50\text{mm} \times 70\text{mm}$) がテープによって描かれている。試験片の厚みは 0.02mm 間隔で 0.16mm から 0.40mm,

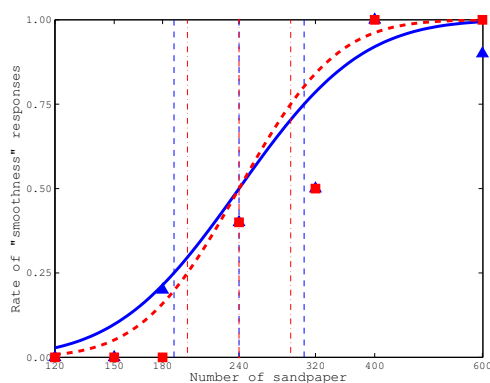


図 4.8: 実験結果 E

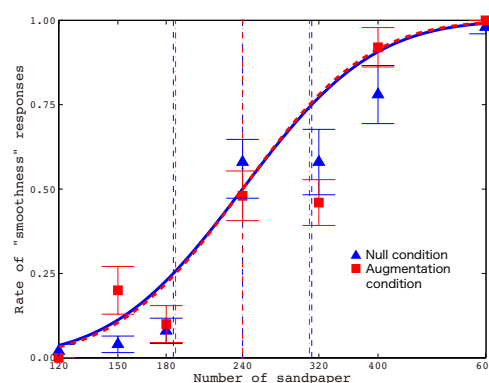


図 4.9: 実験結果平均値

直径は 20mm である。また、試験片は 3D プリント (Objet260 Connex 3, 造形解像度は X, Y 軸が $42\mu\text{m}$, Z 軸が $16\mu\text{m}$) を用いて造形した。システムによる触感拡張を確認するため、以下の 3 つの条件を評価する。

- Null condition: 本条件では、被験者は何も身につけずに実験を行った。
- White noise condition: 本条件では、被験者は HapticAid システムを皮膚振動センサをつけず、Augmented haptic wristband を身につけた。そして、ホワイトノイズを手首に提示した状態で実験を行った。
- Augmented condition: 本条件では、被験者は HapticAid システムを身につけて実験を行った。このとき、触感情報には前述したように 250Hz 周辺でローカットし、250 - 1000Hz はゲインを上げた信号処理を行った。このフィルタの周波数帯は前述の周波数フィルタと同様に皮膚振動伝搬に基づいて選択した。

本研究で提案する触力検査のフローを図 4.10 に示す。はじめに各被験者に対して生の指の触力検査を行った。はじめに生の指の触力検査を行うことで、その触感覚がシステムによって触感覚が向上したか否かを測定することができる。試験片を 9 つのセルのいずれかにランダムで配置した。被験者は試験片がどこにあるかそれぞれのフェルト表面を各セル毎数回撫でた。9 つセルを 2 周触って回答を

行った。もし、被験者が試験片を検出できればその試験片より薄い試験片を用いて同様の実験を行った。被験者が同じ試験片を2回検出できなかった試験片を実験に使用する試験片とした。

次に、システムの評価実験を行った。試験片を9つのセルのいずれかにランダムで配置した。ここで被験者は各セルを数回、9つのセルを2周触ることができる。その後、試験片が9つのセルのうちどこに配置されているか回答した。各被験者は10試行、条件 (Null condition, White noise condition, Augmented condition), 計30試行を行った。このとき、各条件における検出率を式(4.2)に示す。

$$\text{検出率} = \frac{\text{シートの下にある試験片の場所を当てた回数}}{\text{試行回数 (10回)}} \quad (4.1)$$

本実験では、被験者1人あたり約30分の実験であり、被験者はホワイトノイズを流したノイズキャンセリングヘッドフォン身につけ、聴覚情報を遮断した状態で実験を行った。本実験の様子を図4.12に示す。

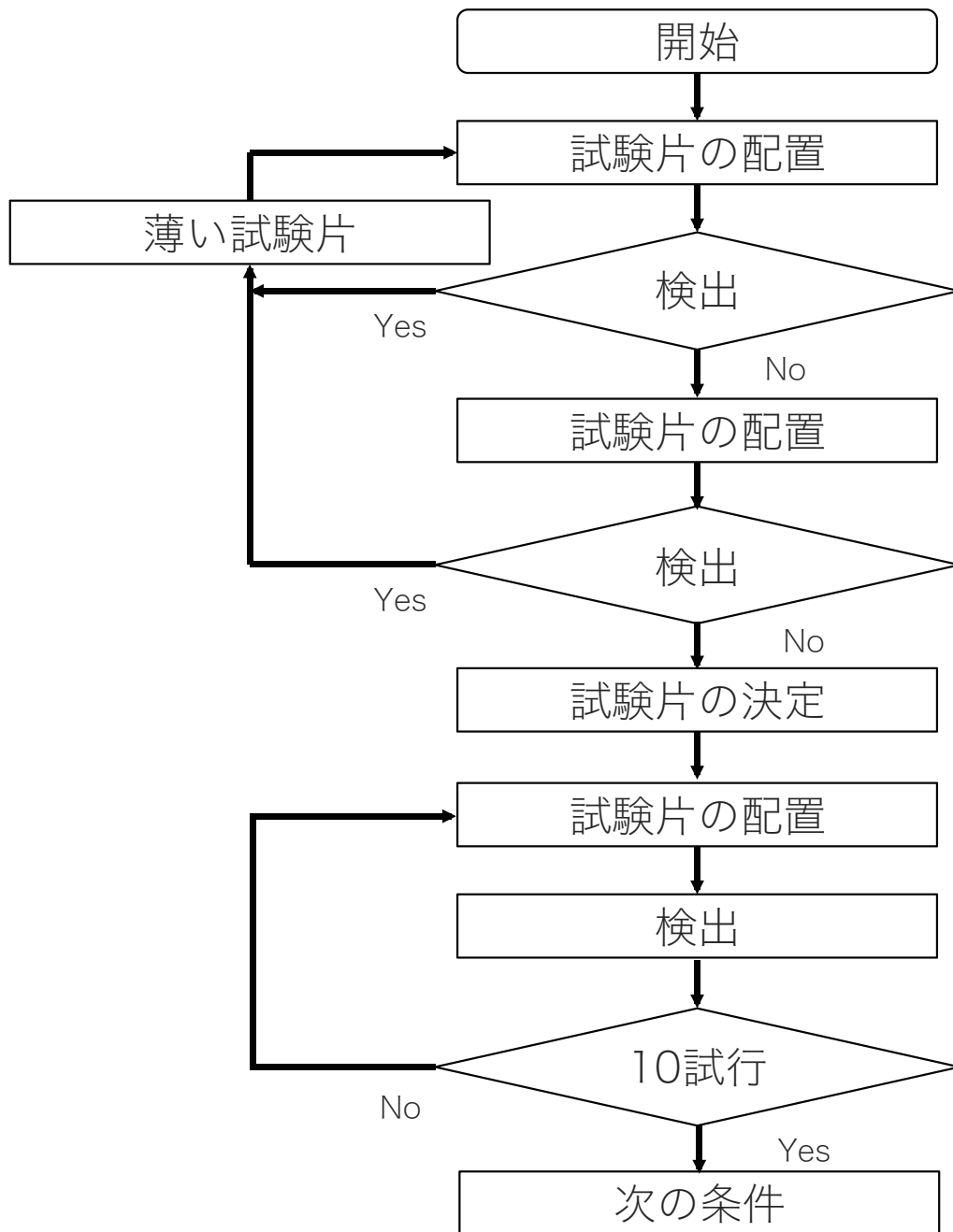


図 4.10: フローチャート

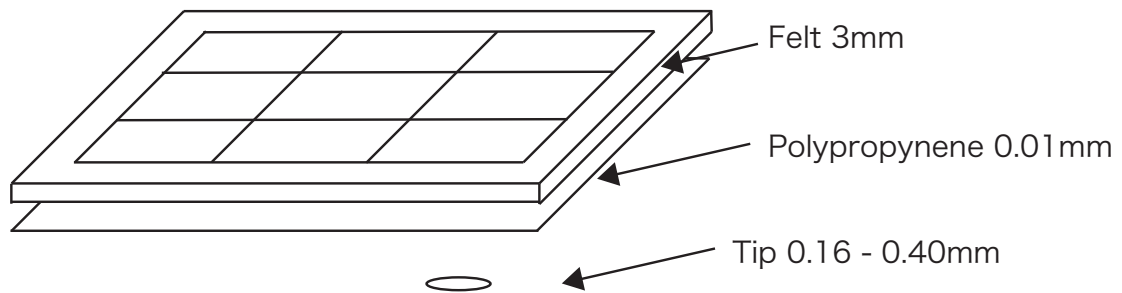


図 4.11: 実験に使用するシートと試験片

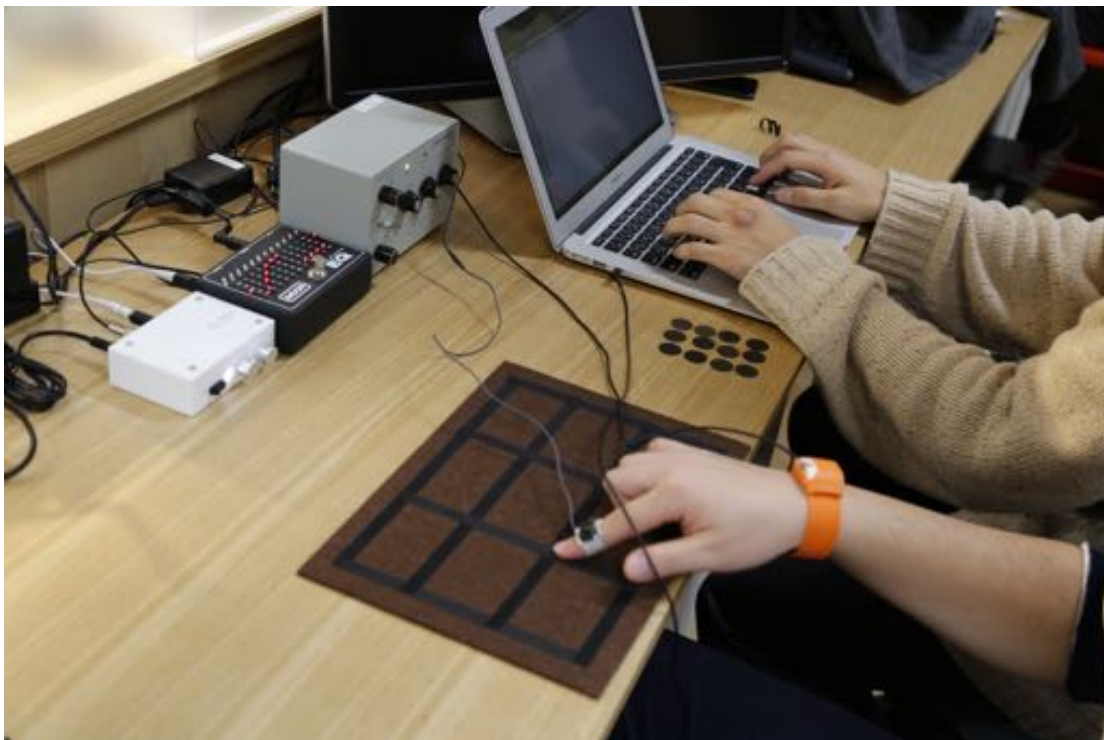


図 4.12: 実験の様子

4.4.6 試験片検出実験結果

表 4.2 に各条件における被験者 10 人の実験結果を示し、その実験結果を平均化した結果を図 4.13 に示す。この図では、縦軸は検出率、横軸は各条件を示してい

る。このときの本実験を行った被験者から自由回答を得た。被験者7人がシステムを使用して触感覚が上がった気がする」と回答を得た。Augmented conditionとWhite noise conditionのときに得られた意見を表4.3に示す。

表 4.2: 被験者 10 人における物体検出の結果

被験者 (tips)	Null	White noise	Augmented
P1 (0.18mm)	0.2	0.5	0.6
P2 (0.18mm)	0.5	0.5	0.8
P3 (0.20mm)	0.3	0.5	0.4
P4 (0.16mm)	0.4	0.6	0.6
P5 (0.18mm)	0.4	0.6	0.7
P6 (0.20mm)	0.6	0.6	0.8
P7 (0.28mm)	0.5	0.8	0.9
P8 (0.16mm)	0.5	0.5	0.5
P9 (0.18mm)	0.5	0.5	0.3
P10 (0.18mm)	0.2	0.4	0.4
平均	0.41	0.55	0.60

本実験結果に対し，One way repeated measures ANOVA を用いて解析を行ったところ，統計的有意差 ($F(2, 18) = 8.21, p = 0.0029$) が認められたため，Holmの補正を用いた paired t-test による多重比較を行った。その結果，Null conditionとWhite noise conditionの間に統計的有意差 ($p < 0.05$) が得られた。同様に，Null conditionとAugmented condition間には統計的有意差 ($p < 0.05$) が得られた。White noise conditionとAugmented conditionの間には統計的有意差はなかった ($p = 0.30$)。したがって，本実験では，提案手法は従来手法であるWhite noiseを手首に提示するものと同程度の結果が得られた。

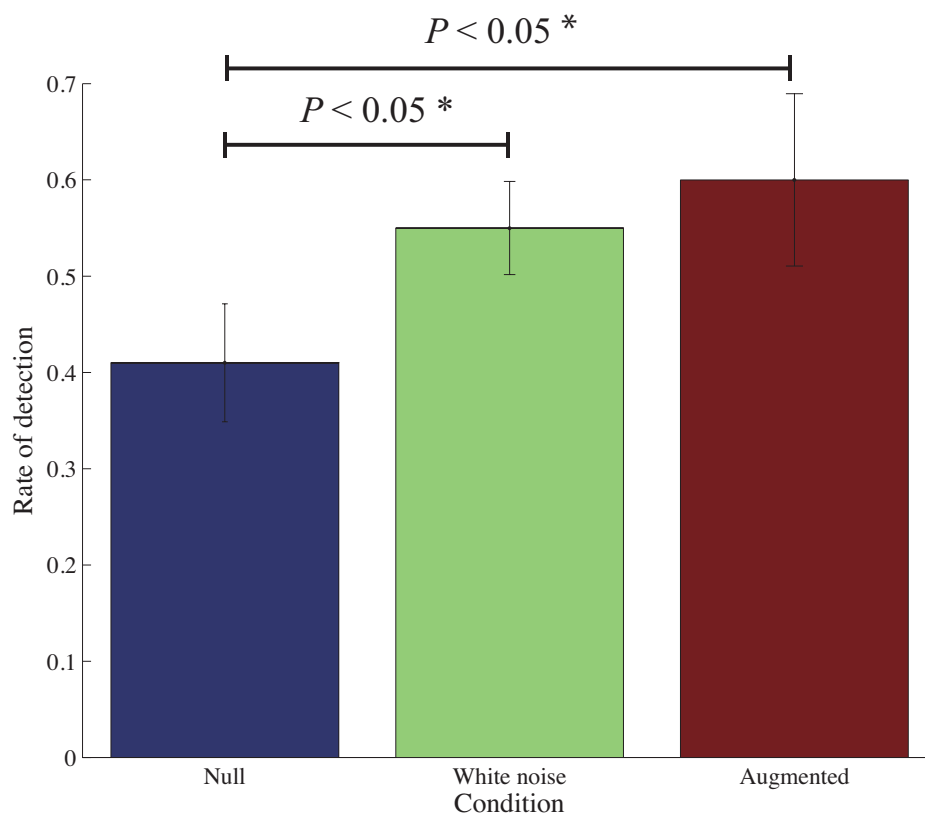


図 4.13: 実験結果

4.5. 考察

評価実験において、被験者の触感覚は Null condition と比較した場合、White noise condition, Augmented condition ときに統計的有意差が得られた。White noise condition のときに、触感覚が向上した理由は、Seo et al. [20] と Lakshminarayanan et al. [36] の論文にて報告されているように、手首に振動刺激を与えることで触感覚に確率共鳴が発生し、指の知覚の閾値が下がったためだと考えられる。

また、Augmented condition において、標準誤差が大きい理由として考えられることは、撫で方の違いによるものと考えられる。個々人の撫で方によって指先で得られる触感情報が異なると、得られる触感フィードバックが異なり、触感フィー

表 4.3: 試験片検出実験で得られた意見

Condition	得られた意見
Augmented	微小な凹凸が他の条件と比べてより試験片による厚みによる凹凸の有無がわかる気がした。
Augmented	手首への振動提示と指先の触感が同時だと試験片がある位置が迷わず選択できる。
Augmented	試験片がない位置が明確になる。
White noise	バンドから提示される振動刺激が途中からなくなった気がした。
White noise	ノイズが提示されていると試験片がどこにあるのか混乱する。

ドバック自体が知覚における雑音になってしまう人がいるため、標準誤差が大きくなったと考えられる。評価実験において、撫で方を規定することでより触感覚が向上する可能性がある。

3.3 節のユーザフィードバックから被験者は、White noise condition よりも Augmented condition の方がポジティブな意見が得られた。これはホワイトノイズを手首に提示している場合、常に触感フィードバックが与えられてしまい、手首へ提示される触感フィードバックと身体動作との解離によって違和感を持つためだと考えられる。この点を鑑みるに、本システムはリアルタイムで触感フィードバックするため、ユーザにとって有効な設計ができていると考えられる。

Augmented condition の条件で触感覚が向上した理由として、触感覚が増強する周波数フィルタによる信号処理が1つの原因だと考えられる。今回構成した周波数フィルタは、文献 [35] で報告されている振動伝搬振動の逆関数に近いものである。自身に入力される機械刺激に近い振動が入力され、指先と近い皮膚振動がフィードバックを提示する手首付近でも発生していると考えられる。また、文献 [37] より、パチニ小体は空間荷重の特性があり、振動刺激の面積が上がると感度が増強することから、入力している皮膚振動により指先の触覚が増強していると述べられ

ている。このことから、手首付近から指先に振動が伝搬しているため増強している可能性がある。システムは、視覚情報と触感情報が同期され手首に触感フィードバックされる。すなわち、身体動作が自分自身の認識と一致しているため、触感覚が向上しているのではないかと考えられる。

本システムは、バンドの位置を図4.1のように手首関節の手先側としている。これは予備実験の知見から、手首関節の前後で比較したところ、手先側に装着した場合はバンドから提示される触感が指先側に定位し、指先の触感覚が増強されたように感じられたためである。その一方で、前腕側に装着した場合は指先の触感覚とバンドから提示される触感と別々のモノ感じられた。これは手首関節において、バンドから出力される振動刺激の伝搬が手首関節によって遮断されてしまったものと考えられる。同様に指を曲げて撫でてしまうと手首の振動刺激と指で触れている素材の触感が振動伝搬の遮断によって触る対象の材質感が異なって感じてしまうため、手の甲と指が直線のように伸ばしたように触った方が増強されやすいと考えられる。また、撫で方を一定にできるという点もある。

4.6. モバイルプラットフォームを用いた HapticAid

ファーストプロトタイプによって触感覚が増強できることを確認したため、ウェアラブルなシステムを構成し、変容 (Enchantment) と共有 (Empathy) が可能である HapticAid を構成し、試作を行った。

4.6.1 モバイルプラットフォームを用いた HapticAid の目標

HapticAid をウェアラブルなシステムを実現するために本システムでは、iOS デバイスである iPod Touch を使用した。iPod はタッチパネルのユーザインターフェイスを使用することができることや iPod 内で信号処理ができる。モバイルプラットフォームである iOS を搭載した iPod で信号処理することができれば、ファーストプロトタイプで試作したような大規模なグラフィックイコライザを使用しなくて済む上に、WIFI を始めとした無線モジュールを使用できる。本システムで

は、触感覚の変容と共有を可能しつつ、ウェアラブルな HapticAid の開発を目標とする。

4.6.2 モバイルプラットフォームを用いた HapticAid の試作

本システムはウェアラブルにする必要がある。システムを使いやすくするために、そこで普及しているモバイルプラットフォームの1つである iOS を使用した。触感に対して信号処理を施せるようにする。また、ウェアラブルにするために、バッテリーで駆動させる。したがって、ファーストプロトタイプから改良する必要があるのはプリアンプと周波数フィルタとアクチュエータを振動させるためのパワーアンプである。新たに実装することとして、ファーストプロトタイプで使用していた皮膚振動センサ用のプリアンプが大きいため、小型の皮膚振動センサ用のプリアンプの実装と TECHTILE アンプのような有線の電源を必要とするアンプではなく、モバイル化を行うための iPod 用のパワーアンプケースの実装とグラフィックイコライザに変わる iPod 内で可能な信号処理の実装があげられる。

4.6.3 皮膚振動センサ用のプリアンプの実装

皮膚振動センサは PVDF ベースのセンサであるため、取得できる信号は約 $20mV_{p-p}$ 程度あり、Analog Digital Converter に入力するには微小である。そこで、皮膚振動センサのプリアンプを実装した。

本プリアンプで使用した OPamp は INA126 という計測アンプである。作成したプリアンプの回路図を図 4.18 に示す。プリアンプの増幅度は以下の式から定義される。

$$\text{増幅率 } G = 5 + \frac{80k \Omega}{R_G} [-] \quad (4.2)$$

そこで今回は、 $R_G = 1.2k \Omega$ と設定し、増幅率は約 72 倍とした。72 倍であると約 $1.4V_{p-p}$ となり、皮膚振動センサの広いレンジに対応することができる。 $R_i n = 1M \Omega$ にし、入力インピーダンスを高く設定し、微弱な信号である皮膚振

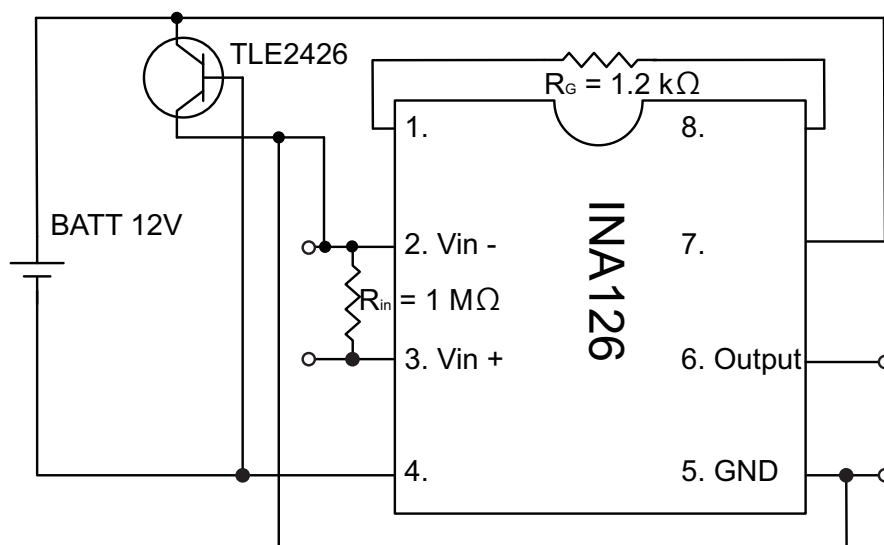


図 4.14: プリアンプの回路図

動センサからの電圧を取得しやすくしている．実際配線図を図 4.15，プリアンプの蓋とプリアンプケース本体の図をそれぞれ図 4.16，4.17 に示し，本体を図 4.18 に示す．

4.6.4 HapticAid パワーアンプとケースの実装

ファーストプロトタイプでは，TECHTILE アンプを使用していたが，TECHTILE アンプではモバイル化ができないため新たなアンプをつくる必要がある．HapticAid のパワーアンプには，SONY SRS-X1 という小型スピーカーアンプを分解して使用する．このアンプは最大出力が $5W$ であるため，アクチュエータを振動させるには十分な出力を持っていることとリチウムイオンバッテリーによって駆動しているためモバイルなアンプであることから選定をした．このアンプを分解すると内部の基板とスピーカーを得られる．このスピーカーユニットを取り外しここにアクチュエータを差し込むことでアクチュエータを振動させる．

iPod にのイヤホンジャックは 4 極であり，このマイク入力に皮膚振動センサから取得した触感情報を入力する．通常，そのまま皮膚振動センサを指しても入力

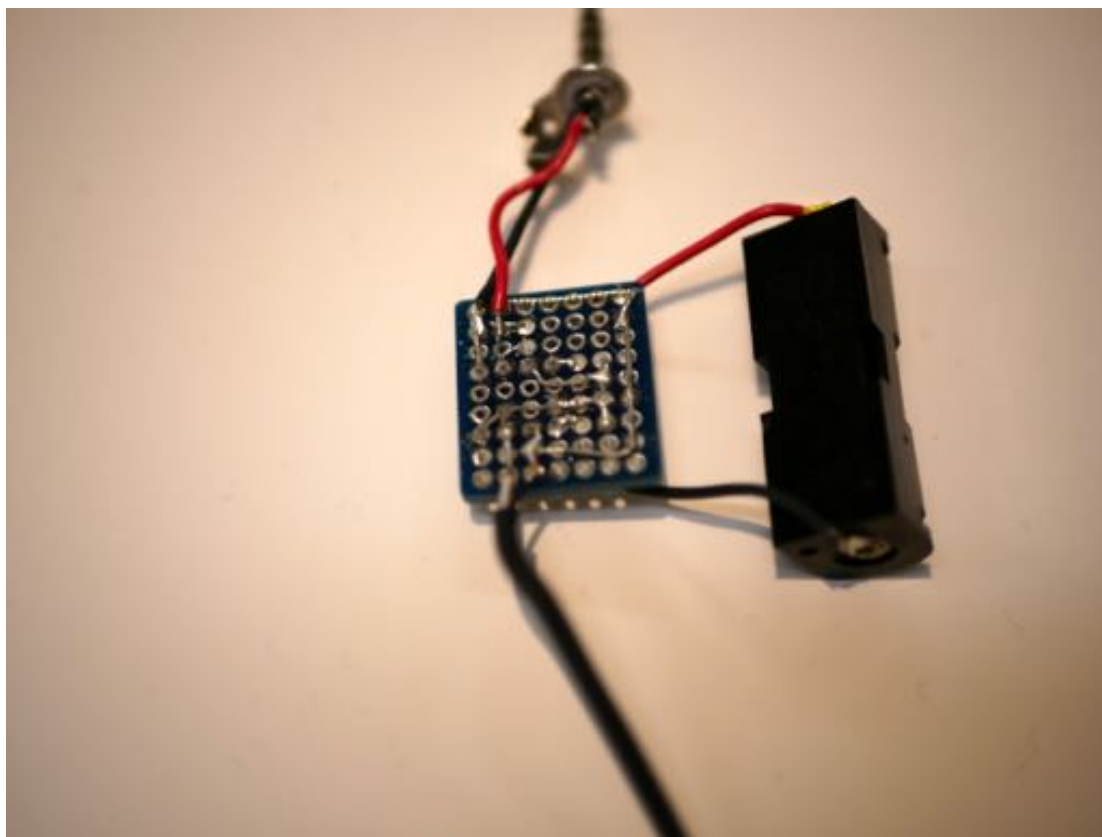


図 4.15: プリアンプの実体配線図

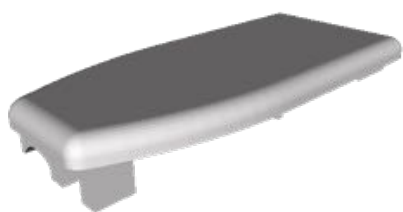


図 4.16: プリアンプのケースの蓋

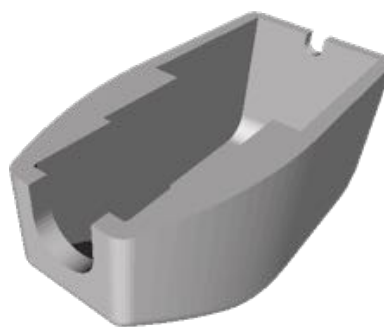


図 4.17: プリアンプのケース



図 4.18: 皮膚振動センサ用プリアンプ

することはできない。その理由は iPod にはイヤホンやマイクを自動で検出するための FET が搭載されているためである。したがって、この FET にマイクが入力されると誤認識させる必要がある。今回はイヤホンジャックのマイクインの箇所に $1.2k\ \Omega$ の抵抗をショートさせてセンサを認識するようにした。

HapticAid のパワーアンプケースを 3D CAD で作成 (4.19) し、これを 3D プリンタで印刷を行った。

各ジャックをケースに取り付けはんだを行って完成した HapticAid のパワーアンプのケースを図 4.20 に示す。本システムのパワーアンプは、SONY SRS-X1 を分解し、必要な部分だけを使用し、HapticAid のシステムに適用している。



図 4.19: HapticAid パワーアンプケースの 3D モデル

4.6.5 Haptic Control Engine

取得した触感情報に対して信号処理を行うための iOS のアプリを開発した。グラフィカルで単純な信号処理を行いやすい Pure Data を使用する。また、iOS アプリの MobMuPlat は iOS と Android 上で Pure Data を走らせることができる。今回は、MobMuPlat と Pure Data の 2 つをベース触感信号処理エンジンである Haptic Control Engine を開発した。Haptic Control Engine を図 4.23 に示す。Haptic Control Engine は、バンドパスフィルタをはじめとした各周波数フィルタが入っている。画面の図を 4.21 に示す。このときのフィルタが操作できるのは、振幅 (Amplitude)、中心周波数 (Center Frequency)、共振の Q (Quality Factor) である。このときのバンドパスフィルタの概要を図 4.22 に示す。

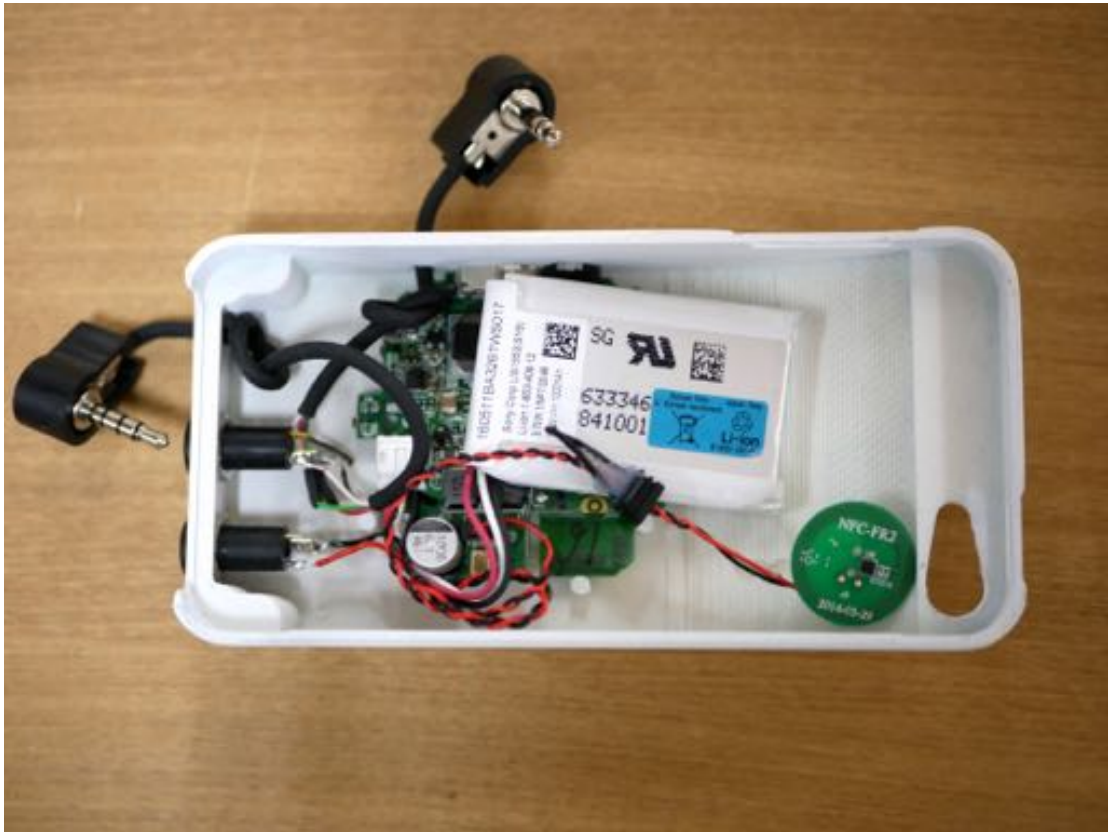


図 4.20: HapticAid パワーアンプケース

Haptic Effect として Distortion と Reverb が使用できる。Distortion と Reverb の波形を図 4.244.25 を示す。

Distortion: 取得された触感信号を矩形波に変換して出力して、手首に触感フィードバックを与えて物体の触り心地を変える。触り心地にメリハリができるため、より物体がザラザラに感じやすくなる。

Reverb: 取得された触感信号に対して遅延を与え、触り心地を変える。触り心地に柔らかさを提示することができる。



図 4.21: Enhancement フィルタにおける画面

4.6.6 Wearable Haptic Actuators

ファーストプロトタイプで作成した Augmented Haptic Wrist に加え、触感の共有をするための指専用のアクチュエータを作成した。アクチュエータには iPhone 6S で使用されている Taptic Engine を使用している。これらウェアラブルなアクチュエータをまとめて Wearable Haptic Actuator とし、図 4.26 に示す。

本章で設計したシステムの外観を図 4.27 に示す。前章で作成したシステムと同様に Haptic Sensor には皮膚振動センサを用いている。本システムの特徴は、iOS を使用したデバイスである点である。図に示すように iOS のジャック端子に約 $1\text{ k}\Omega$ の抵抗を入れると、iOS はコンデンサマイクが接続されたと判断し、外部マイクの入力を受け付けるようになる。マイク端子にはコンデンサマイク用のプラグインパワーの電圧の負荷がかかっている。皮膚振動センサは PVDF ベースであることから、プラグインパワーは不必要である。したがって、入力ジャックに対して直列に積層コンデンサを挿入して、プラグインパワーの直列電圧をカットしている。

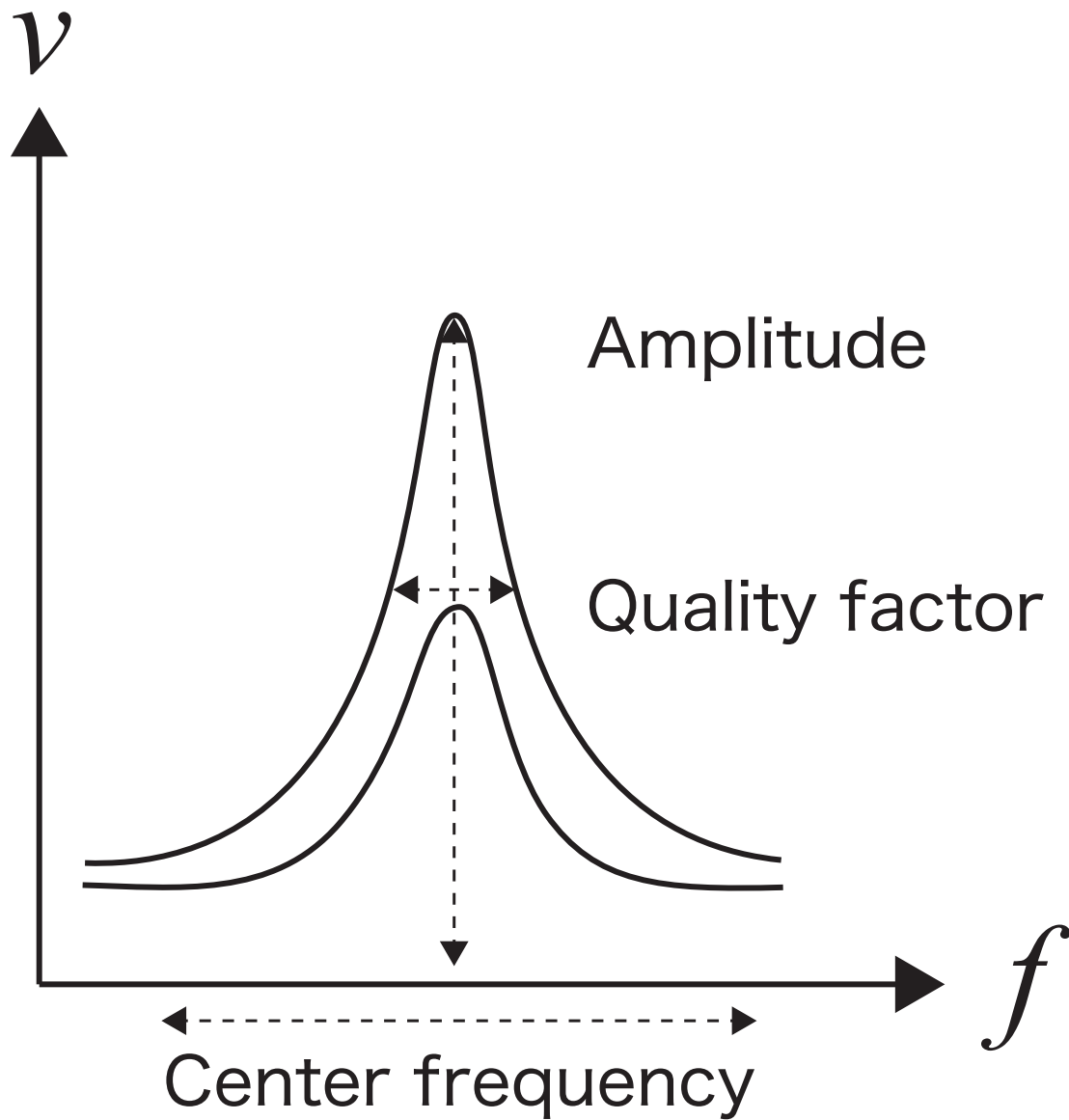


図 4.22: バンドパスフィルタにおける各パラメータ

4.6.7 変容 (Enchantment) の検証

Enchantment の検証をするために、Haptic Control Engine にインストールされた Reverb フィルタをユーザは適したパラメータに変えてもらい、スマートフォン

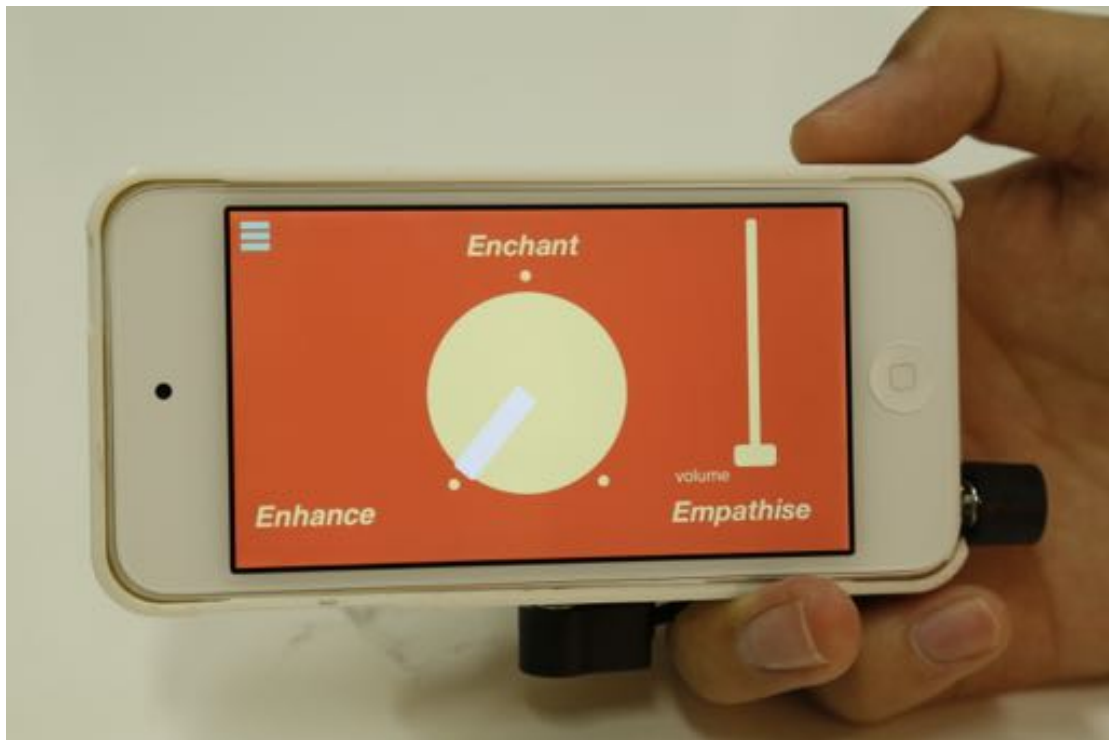


図 4.23: Haptic Control Engine

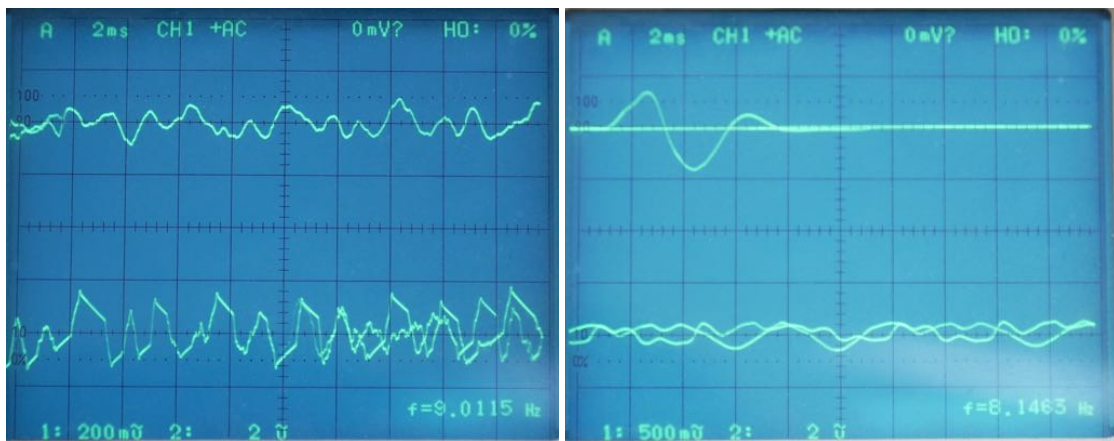


図 4.24: Distortion (上: 入力波形, 下: 出力波形) 図 4.25: Reverb (上: 入力波形, 下: 出力波形)

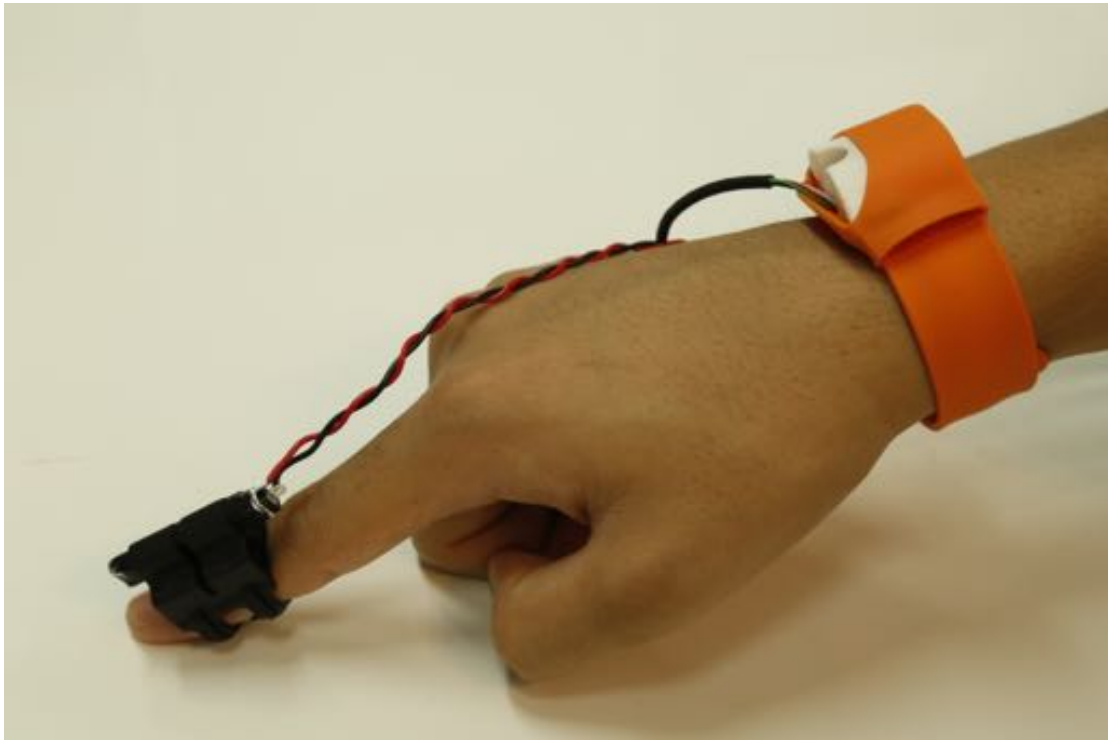


図 4.26: Wearable Haptic Actuators

アプリを操作してもらった。その様子を図 4.28 に示す。

アプリ上のキャラクターがジャンプすると、Haptic Control Engine によってゴムっぽい触感が手首に提示され、通常にアプリをプレイするよりも楽しくプレイしているように伺えた。

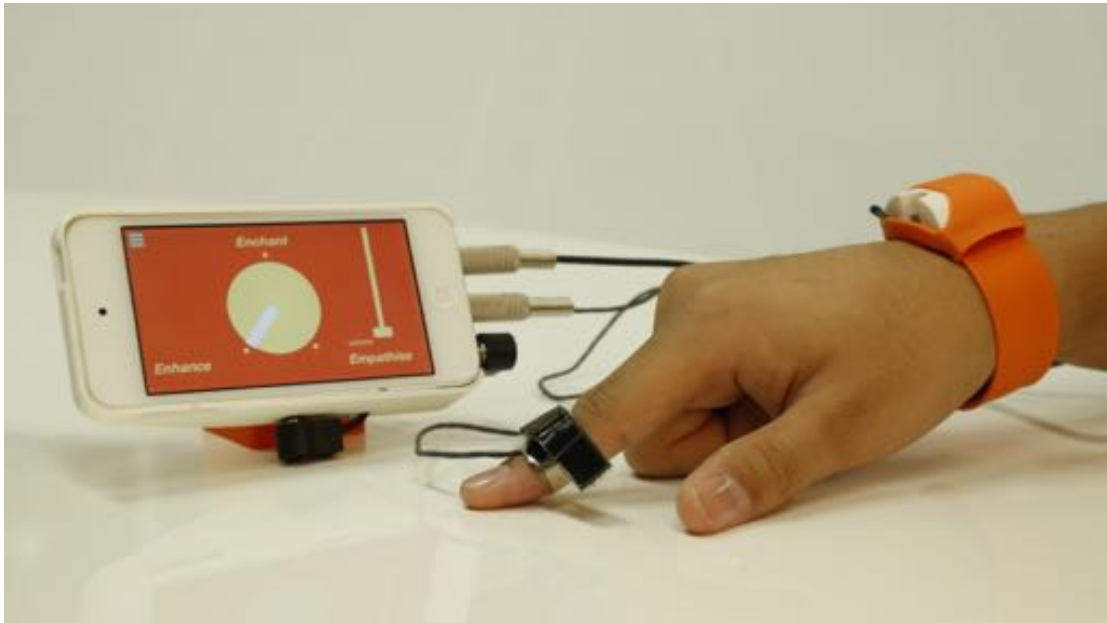


図 4.27: システムの外観

4.6.8 共有 (Empathy) の検証

Empathy の検証をするために、触感共有ができるかを検証した。ユーザは A と B の 2 人であり、ユーザ A は皮膚振動センサを指先につけて様々なテクスチャを持った素材を撫で触感情報を、そのときの映像を 2 眼カメラで視覚情報をユーザ B に送る。ユーザ B は指先にアクチュエータと頭に HMD を身に付けてもらう。ユーザ A から送られてきた触感情報と視覚情報を指先と HMD に提示する。このとき、ユーザ B の指先素材は表面がマットなアクリル板を撫でてもらった。そのときの検証の様子を図 4.29 に示す。

ユーザ B からは、ただ振動をアクチュエータで受けているだけだとあまり触感の共有ができた感じはしないと意見が得られた。しかし、HMD 上に映った手の動きと自身の手の身体動作を一致させると、触っている感じが増強された気がしたという意見が得られた。ここでは、ラバーバンドイリュージョンに近い現象が生じている可能性があり、HMD 上に映った手が自分の手と錯覚する可能性があることが示唆された。



図 4.28: Enchantment の検証

4.7. デモンストレーション

実際に HapticAid を国際会議である AsiaHaptics 2016 と SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies に展示をした。AsiaHaptics 2016 は 11 月 29 日 - 12 月 1 日の 3 日間, SIGGRAPH Asia は 12 月 6 日 - 12 月 8 日の 3 日間展示を行った。体験者は 10 代から 50 代程度であった。AsiaHaptics では約 50 人程度, SIGGRAPH Asia では約 200 人程度の人に HapticAid を身につけてもらいデモを行った。

AsiaHaptics では, HapticAid を身につけていただき, その後に図 4.30 に示すようなテクスチャを持っているマテリアルを触っていただいた。特に表面が固く粗いモノに対して, 非常に反応が良く, 触感覚がまるで増強されているかのような体験する方がほとんどであった。そして, HapticAid のパラメータを体験者自身で操作してもらうことによって自分に適したパラメータをその場で作成している様子が得られた。

SIGGRAPH Asia ではテクスチャを持った素材, ボタンやタップができる素材, 文字を書ける素材, 日常の中にあるようなぬいぐるみやコップといった素材を並



図 4.29: Empathy の検証

べ、それぞれ起承転結の順に配置した。その様子を図 4.31 に示す。デモの流れとしては、初めにシステムの有無によって触る体験が変化することを体験していただくために、さまざまなテクスチャを持った素材を触っていただく。次に、触るだけでなくボタンをタップしたりクリックしたりといった動作やペンを把持して文字を書くいただく。最後に日常にあるような素材を触ることで、今後 HapticAid が日常に溶け込んでいったらどのように生活が変わるのか想像してもらえりようなデモ展示にした。

初めにテクスチャを持った粗い素材を HapticAid の電源を切ってもらった状態で触っていただき、その後、電源を入れて触っていただいた。電源を入れて触った瞬間に、” Amaging! ” ” Oh my god ” といった驚いたような言葉を発し、多くの



図 4.30: AsiaHaptics の展示の様子

人がシステムをつけた瞬間に笑顔になっていた。また、触る体験が楽しくなったため、最初に触った素材以外にも触りだした。HapticAidを身につけて触ることが面白く感じた体験者は、HapticAidを身に着けたまま移動し、他の素材場所に行き、ボタンを何度も押したり、文字を書いたりしていた。ぬいぐるみとのインタラクションをする体験者も多くいた。その中で体験者は終始笑顔でその各々の素材を触っていた。中にはこれは発売しているの？どこで購入できるの？企業なの？といったまるで商品と勘違いする人も多くいた。SIGGRAPH AsiaのStudent Volunteer(SV)では特に人気であり、多くのSVがHapticAidのコンセプトやシステム構成等に興味持っていた。その様子を図4.32, 4.33, 4.34にそれぞれ示す。

一方で、HapticAidはフィードバックシステムであるため、ハウリングをして



図 4.31: SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示方法

しまうことがある。特に女性は手首が非常に細い方は、入力の信号を手首とセンサの間で無限フィードバックしてしまいハウリングしてしまうことがあった。その場合は体験者あるいは展示者がパラメータを操作することで解決した。

したがって、HapticAidを身につけることで、体験者に対して触感覚を向上するような体験や触感覚をコントロールするような体験を与えることができた。合計で6日間のデモ展示に耐えられる耐久性を持っていることや商品と勘違いするようなシステムであると考えられる。以上のことから、HapticAidはウェアラブルかつモバイルな触感覚を拡張するシステムであると言える。



図 4.32: SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における展示の様子

4.8. 考察, 制約, 拡張性

HapticAidは指先で得られた触感覚を手首フィードバックするというシステム構成を行ったため、指先には皮膚振動センサ、アクチュエータは手首に身につけるというスタイルを取っている。しかし、HapticAidはiPodのイヤホンジャックのマイクに相当する部分にセンサの値を入力しているため、皮膚振動センサ以外のアナログ出力をするセンサの入力を受け付ける。振動触感における入力センサでよく使用されるコンタクトマイクや加速度センサを使用することができる。また、フォトダイオードのような光に反応するセンサも使用することができるため、裸眼3Dディスプレイと組み合わせることで、立体映像に触り心地を付加させることが可能である。Haptic Control Engineに入力するセンサによっては、そのセ



図 4.33: SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における
展示の様子 1

図 4.34: SIGGRAPH Asia E-tech 2016 における
展示の様子 2

ンサによってジェスチャ認識が可能になり、触感を拡張するだけでなく、Human Computer Interaction として使用できる。

出力も同様に 5 W 以下のアクチュエータを使用することができるため、アクチュエータを指につけたり、身体全身にフィードバックするといったさまざまな用途に使用することができる。Haptic Control Engine には WIFI と Bluetooth が搭載されているため、身の回りにあるモノにインターネット越しで触感を与える Internet of Haptics が可能になる。Internet of Haptics が実装された社会において、HapticAid は触感と身体性を持ったメディアとなり、日常の中に新しい触感を通じた体験の提供できる。

4.9. 本章のまとめ

本章では、初めに HapticAid に触感覚を向上させる機能があるか調べるためにファーストプロトタイプをつくり、粗さ弁別実験と試験片検出実験を行い、HapticAid に触感覚を向上させる効果があることを確認した。ファーストプロトタイプから第 3 章で示した設計要件を満たすためにモバイルプラットフォームを用いた HapticAid を開発した。その HapticAid をデモ展示として AsiaHaptics 2016, SIGGRAPH Asia E-tech 2016 にてデモ展示を行った。最後に今回開発した HapticAid

の Scalability を示すことで HapticAid が可能な応用を示した.

第5章

結 論

第1章では、視覚や聴覚における補綴のモノから現在取り組まれている拡張の技術について示し、触覚、触覚における拡張する必要性や重要性を示すことで本研究の目的を示した。

第2章では、ヒトの触覚と触感の機能を述べた後に、今現在まで取り組まれている触感覚を補綴する研究を紹介した。補綴するだけでなく、拡張を3つの要素である増強 (Enhancement)、変容 (Enchantment)、共有 (Empathy) に分解し、その各々の視点から研究を紹介した。そして、本研究が行う研究領域を示した。

第3章では、ウェアラブルな触感拡張システムである HapticAid のコンセプトとコンセプトになった過程を示し、HapticAid に必要なシステム設計を行った。また、HapticAid は触感を拡張するため、その拡張の要素である増強 (Enhancement)、変容 (Enchantment)、共有 (Empathy) の実現方法を述べた。

第4章では、初めに HapticAid のコンセプトである指先で所得した触感情報を手首にフィードすることで、触感覚が向上するかを確認するため、ファーストプロトタイプをつくり、それを粗さ弁別実験および試験片検出実験を用いて、増強 (Enhancement) の検証実験を行った。その結果、指先の触感情報を手首にフィードバックすることで触感覚が向上することを確認することができた。第3章で示した設計要件を満たすシステムをモバイルプラットフォームを用いた HapticAid として実装した。HapticAid を使用して、スマートフォンアプリに触感フィードバックを与え変容 (Enchantment) の検証実験を行ったところ、通常にゲームをプレイするよりも楽しくなるという意見をもらった。HMD と HapticAid を使用して、視覚および聴覚を共有するシステムを実装し、共有 (Empathy) の検証実験を行った。その結果、HMD 上に映った手と身体動作を一致させると、HMD 上に映った手が

自分の手に感じられるような感覚を得るという知見を得た。そして HapticAid を AsiaHaptics 2016 および SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies にて展示を行った。その結果、HapticAid を身につけた多くの方が触感覚を向上したように感じたような意見をいただいた。以上のことから、HapticAid はウェアラブルかつモバイルな触感をコントロール、拡張するシステムであると言える。

本論文では、触感覚を拡張する HapticAid のコンセプトである触感を拡張することをシステムで実装することができたと言える。今後の展望として、HapticAid が実際に日常生活に溶け込むようになれば、老化によって衰えた指先の感覚や、体性感覚が麻痺した方にリハビリテーションシステムとして使用することができる。ただ触感覚を回復させるだけでなく、触る対象に対してそれ専用のフィルタや信号処理を加えることで、車体の傷の発見といった従来まで職人が手がけていた作業がそのように繊細な指先を持っていない人でも可能になる。今後、変容と共有のコンテンツの作成とそれらをインターネットで 사용할 ことができるプラットフォームが必要になる。そのプラットフォームと HapticAid があれば、触感情報の記録、再生、編集が可能になるため、例えば、オンラインショッピングにおいてインテリアや服といった触り心地が重要になる場面で、触り心地の共有が可能になる。また、展示において、女性で特に手首が細い人にはハウリングしてしまうということがあったため、身につけるシステムをフレキシブルにし、フィルタをパーソナライズすることで眼鏡や補聴器と同じように個々人に適応した HapticAid をつくる必要がある。個々人に適用し、インターネットと繋がった HapticAid によって触感や身体性を持ったメディアとなり、生活に新しい体験を提供することができるようになる。

謝 辞

本研究にあたり、多大な研究指導やデモのやり方、研究に必要な多くのことをご指導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。先生のご指導もあり、修士の間に国内学会3回、国際学会5回、特許1本という成果を出すことができました。研究における多くの機会をもらえたためだと思っています。

本研究の副指導教員である慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の奥出直人教授に深く感謝いたします。講義において、エスノグラフィーに基づいたデザイン思考を通してコンセプトのつくり方や修論指導において論文の書き方をご指導いただきました。エンジニアとは違うアプローチを身につけられたことは自分の今後の武器や糧になると思います。

共同で研究を行った慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科のRoshan Perisi 特任助教に感謝いたします。国際学会に論文を投稿する際に多くのサポートをしていただきました。本研究を共同で行った名古屋工業大学の田中由浩准教授には、研究で必要なセンサの開発や研究における議論、アドバイス、助言を多くいただきました。心から感謝いたします。本研究を評価するための実験計画や実験方法等の助言を下さった Embodied Media Project Researcher の仲谷正史さんに深く感謝いたします。

私は Reality Media Project と Embodied Media Project のどちらにも所属することができました。特に Embodied Media の先輩である花光宣尚さんには、日々の研究の議論や他愛のない話、一緒に食事に行ったり、研究生活をサポートして下さったりしました。Embodied Media Project の佐々木智也さんとは、私が苦手とする筐体の作成等に協力していただきました。Play Project の有馬俊さんには、国際会議に必要な動画の作成の協力をしていただきました。研究補助の土屋

慧太さんには，私のシステムの開発のサポートをしてくださいました．IVRC というコンテストと一緒に出し，フランスで展示したことは私の楽しい思い出になりました．Embodied Media Project のスタッフ，先輩，同期，後輩のみなさまに感謝の意を表します．

そもそも KMD に入学する機会をつくってくだ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と東京大学の稲見昌彦教授に深く感謝いたします．もし，KMD と出会う機会がなければ，工学だけの世界に進んでしまっていたと思います．広義のデザインを学ぶことができ，本研究をすることができました．

最後に，大学院に通いたいという私のわがままを許し，楽しく自由な学生生活の多くを支援してくださった両親と妹に感謝いたします．みなさま，ありがとうございました．

参 考 文 献

- [1] Zhihan Lv, Liangbing Feng, Haibo Li, and Shengzhong Feng. Hand-free motion interaction on google glass. In *SIGGRAPH Asia 2014 Mobile Graphics and Interactive Applications*, p. 21. ACM, 2014.
- [2] Kai Kunze, Kazutaka Inoue, Katsutoshi Masai, Yuji Uema, Sean Shao-An Tsai, Shoya Ishimaru, Katsuma Tanaka, Koichi Kise, and Masahiko Inami. Meme: smart glasses to promote healthy habits for knowledge workers. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, p. 17. ACM, 2015.
- [3] 塩釜裕子, 宮本正. 色覚補正眼鏡カラービューの有効性の検討. 日本視能訓練士協会誌, Vol. 43, No. 0, pp. 287–295, 2014.
- [4] Shunichi Kasahara, Mitsuhiro Ando, Kiyoshi Suganuma, and Jun Rekimoto. Parallel eyes: Exploring human capability and behaviors with paralleled first person view sharing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1561–1572. ACM, 2016.
- [5] 前野隆司. 器用な手 ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000.
- [6] 岩村吉晃. 能動的触知覚 (アクティブタッチ) の生理学. バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 171–177, 2007.
- [7] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.

- [8] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人. 触覚認識メカニズムと応用技術- 触覚センサ・触覚ディスプレイ-. サイエンス & テクノロジー, 2010.
- [9] Louise A Connell, Naoimh E McMahon, and Nicola Adams. Stroke survivors' experiences of somatosensory impairment after stroke: An interpretative phenomenological analysis. *Physiotherapy*, Vol. 100, No. 2, pp. 150–155, 2014.
- [10] HE Van Stralen, MJE Van Zandvoort, and HC Dijkerman. The role of self-touch in somatosensory and body representation disorders after stroke. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 366, No. 1581, pp. 3142–3152, 2011.
- [11] Leah R Enders, Pilwon Hur, Michelle J Johnson, and Na Jin Seo. Remote vibrotactile noise improves light touch sensation in stroke survivors' fingertips via stochastic resonance. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol. 10, No. 1, p. 1, 2013.
- [12] Judith D Schaechter, Casper AMM van Oers, Benjamin N Groisser, Sara S Salles, Mark G Vangel, Christopher I Moore, and Rick M Dijkhuizen. Increase in sensorimotor cortex response to somatosensory stimulation over subacute poststroke period correlates with motor recovery in hemiparetic patients. *Neurorehabilitation and neural repair*, Vol. 26, No. 4, pp. 325–334, 2012.
- [13] Ryo Kikuuwe, Akihito Sano, Hiromi Mochiyama, Naoyuki Takesue, K Tsunekawa, S Suzuki, and H Fujimoto. The tactile contact lens. In *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE*, pp. 535–538. IEEE, 2004.
- [14] Yoshihiro Tanaka, Takanori Nagai, Michitaka Fujiwara, and Akihito Sano. Lump detection with tactile sensing system including haptic bidirectionality. In *2014 World Automation Congress (WAC)*, pp. 77–82. IEEE, 2014.
- [15] Yoshihiro Tanaka, Tomohiro Fukuda, Michitaka Fujiwara, and Akihito Sano. Tactile sensor using acoustic reflection for lump detection in laparoscopic

- surgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, Vol. 10, No. 2, pp. 183–193, 2015.
- [16] NHH Mohamad Hanif, Paul H Chappell, Andy Cranny, and Neil M White. Surface texture detection with artificial fingers. In *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 8018–8021. IEEE, 2015.
- [17] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi, and Masahiko Inami. Smarttouch: Electric skin to touch the untouchable. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 36–43, 2004.
- [18] Takuya Nojima, Dairoku Sekiguchi, Masahiko Inami, and Susumu Tachi. The smarttool: a system for augmented reality of haptics. In *Virtual Reality, 2002. Proceedings. IEEE*, pp. 67–72. IEEE, 2002.
- [19] Hideyuki Ando, Takeshi Miki, Masahiko Inami, and Taro Maeda. Smartfinger: nail-mounted tactile display. In *ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications*, pp. 78–78. ACM, 2002.
- [20] Na Jin Seo, Marcella Lyn Kosmopoulos, Leah R Enders, and Pilwon Hur. Effect of remote sensory noise on hand function post stroke. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 8, p. 934, 2014.
- [21] Yuichi Kurita, Minoru Shinohara, and Jun Ueda. Wearable sensorimotor enhancer for fingertip based on stochastic resonance effect. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 43, No. 3, pp. 333–337, 2013.
- [22] Michel Amberg, Frédéric Giraud, Betty Semail, Paolo Olivo, Géry Casiez, and Nicolas Roussel. Stintac: a tactile input device with programmable friction. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium adjunct on User interface software and technology*, pp. 7–8. ACM, 2011.

- [23] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, and Masaya Takasaki. Diminished haptics: towards digital transformation of real world textures. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 409–417. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [24] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, and Chris Harrison. Teslatouch: electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292. ACM, 2010.
- [25] Olivier Bau and Ivan Poupyrev. Revel: tactile feedback technology for augmented reality. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 31, No. 4, p. 89, 2012.
- [26] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Koichi Hirota, and Michitaka Hirose. Yubi-toko: finger walking in snowy scene using pseudo-haptic technique on touchpad. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, p. 29. ACM, 2015.
- [27] Yoshihiro Tanaka, Shota Matsuoka, Wouter M Bergmann Tiest, Astrid ML Kappers, Kouta Minamizawa, and Akihito Sano. Frequency-specific masking effect by vibrotactile stimulation to the forearm. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 156–164. Springer International Publishing, 2016.
- [28] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, p. 26. ACM, 2012.
- [29] Ali Israr, Siyan Zhao, Kyna McIntosh, Zachary Schwemler, Adam Fritz, John Mars, Job Bedford, Christian Frisson, Ivan Huerta, Maggie Kosek, et al.

- Stereohaptics: a haptic interaction toolkit for tangible virtual experiences. In *ACM SIGGRAPH 2016 Studio*, p. 13. ACM, 2016.
- [30] Yuta Takeuchi, Hirotaka Katakura, Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Touchcast: an on-line platform for creation and sharing of tactile content based on tactile copy & paste. In *Adjunct proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 13–14. ACM, 2012.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Possessedhand: techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 543–552. ACM, 2011.
- [34] Jun Nishida and Kenji Suzuki. biosync: Synchronous kinesthetic experience among people. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3742–3745. ACM, 2016.
- [35] 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.
- [36] Kishor Lakshminarayanan, Abigail W Lauer, Viswanathan Ramakrishnan, John G Webster, and Na Jin Seo. Application of vibration to wrist and hand

- skin affects fingertip tactile sensation. *Physiological reports*, Vol. 3, No. 7, p. e12465, 2015.
- [37] Yoshihiro Tanaka, Yuichiro Ueda, and Akihito Sano. Effect of skin-transmitted vibration enhancement on vibrotactile perception. *Experimental brain research*, Vol. 233, No. 6, pp. 1721–1731, 2015.
- [38] Shun Takanaka, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata. Multitouch haptic interface with movable touch screen. In *SIGGRAPH Asia 2015 Haptic Media And Contents Design*, p. 13. ACM, 2015.
- [39] Yuki Hashimoto and Hiroyuki Kajimoto. Slow motion replay of tactile sensation. *Proceeding of IEEE ICAT*, pp. 51–56, 2010.
- [40] Peter B Shull and Dana D Damian. Haptic wearables as sensory replacement, sensory augmentation and trainer—a review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, Vol. 12, No. 1, p. 1, 2015.
- [41] Irfan Hussain, Leonardo Meli, Claudio Pacchierotti, Gionata Salvietti, and Domenico Prattichizzo. Vibrotactile haptic feedback for intuitive control of robotic extra fingers. In *Proc. IEEE World Haptics Conference (WHC), (Chicago, IL)*, 2015.
- [42] Yuki Hashimoto, Daisuke Kondo, Tomoko Yonemura, Hiroyuki Iizuka, Hideyuki Ando, and Taro Maeda. A video see-through face mounted display for view sharing. In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*, p. 115. ACM, 2012.
- [43] Aaron James Plauche. *A haptic feedback system for phase-based sensory restoration in above-knee prosthetic leg users*. THE UNIVERSITY OF TEXAS AT DALLAS, 2015.
- [44] Jérôme Ardouin, Anatole Lécuyer, Maud Marchal, Clément Riant, and Eric Marchand. Flyviz: a novel display device to provide humans with 360 vision

by coupling catadioptric camera with hmd. In *Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 41–44. ACM, 2012.

関 連 発 表

国際学会

1. Tomosuke Maeda, Keitaro Tsuchiya, Roshan Peiris, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, "HapticAid: Haptic Experiences System Using Mobile Platform", TEI 2017, Japan, 2017.
2. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Nakatani Masashi, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, "HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System for Enhanced, Enchanted and Empathised Haptic Experiences", SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies, Macao, 2016.
3. Tomosuke Maeda, Keitaro Tsuchiya, Roshan Peiris, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, "Mobile HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System Using a Smartphone", AsiaHaptics2016, Japan, 2016.
4. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Masashi Nakatani, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, "HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System based on Skin Vibration Sensing", EuroHaptics 2016 Work in Progress, UK, 2016.
5. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Nakatani Masashi, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, "Wearable Haptic Augmentation System Using Skin Vibration Sensor", VRIC 2016, France, 2016.

国内学会

1. 前田 智祐, 土屋 慧太郎, Roshan Peiris, 田中 由浩, 南澤 孝太, ”触感覚を拡張する補触器 HapticAid の基礎検討”.
2. 前田 智祐, 土屋 慧太郎, Roshan Peiris, 田中 由浩, 南澤 孝太, ”HapticAid を用いた布触感向上の基礎検討”.
3. 前田 智祐, Roshan Peiris, 仲谷 正史, 田中 由浩, 南澤 孝太, “皮膚振動センサを用いたウェアラブル触感拡張システムの基礎検討”, 第16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, 2015, 12.

展示

1. Tomosuke Maeda, Keitaro Tsuchiya, Roshan Peiris, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, ”HapticAid: Haptic Experiences System Using Mobile Platform”, TEI 2017, Japan, 2017.
2. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Nakatani Masashi, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, ”HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System for Enhanced, Enchanted and Empathised Haptic Experiences”, SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies, Macao, 2016.
3. Tomosuke Maeda, Keitaro Tsuchiya, Roshan Peiris, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, ”Mobile HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System Using a Smartphone”, AsiaHaptics2016, Japan.
4. 前田 智祐, 土屋 慧太郎, Roshan Peiris, 田中 由浩, 南澤 孝太, ”触感覚を拡張する補触器 HapticAid の基礎検討”.
5. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Masashi Nakatani, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, ”HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System based on Skin Vibration Sensing”, EuroHaptics 2016 Work in Progress, UK, 2016.

特許

1. 特願 2015-241953, 「触覚呈示システム, 触覚呈示方法, および触覚呈示プログラム」, 南澤 孝太, 田中 由浩, 前田 智祐, 仲谷 正史, ロシャン・ペイリス

受 賞

1. 前田 智祐, 土屋 慧太郎, Roshan Peiris, 田中 由浩, 南澤 孝太, ”触感覚を拡張する補触器 HapticAid の基礎検討”, 日本バーチャルリアリティ学会, 2016, 9. 学術奨励賞受賞
2. Tomosuke Maeda, Roshan Peiris, Masashi Nakatani, Yoshihiro Tanaka, Kouta Minamizawa, ”HapticAid: Wearable Haptic Augmentation System based on Skin Vibration Sensing”, EuroHaptics2016 Work in Progress, WIP Honorable Mention 選出
3. 前田 智祐, Roshan Peiris, 仲谷 正史, 田中 由浩, 南澤 孝太, “皮膚振動センサを用いたウェアラブル触感拡張システムの基礎検討”, 第16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, 優秀講演賞受賞, 2015/12/14-16.