

Title	触覚を用いた日常的な情報の身体化技術の設計
Sub Title	Design of information embodiment technology using haptic for everyday interaction
Author	加藤, 大弥(Kato, Daiya) 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524号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0524">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0524</a>

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）

触覚を用いた日常的な情報の  
身体化技術の設計

慶應義塾大学大学院  
メディアデザイン研究科

加藤 大弥

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。

加藤 大弥

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

Liwei Chan 特任講師 (副査)

修士論文 2016年度（平成28年度）

## 触覚を用いた日常的な情報の 身体化技術の設計

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

### 論文要旨

現在，私達の生活に情報端末とインターネットは欠かせないものになっている．日常生活においても家電や家具などもインターネットに接続されていることでIoTと呼ばれるネットワークが形成されてきている．また，多くのセンサによって行動や環境が数値的なデータとして存在しはじめ，そのデータを解析しインターネットに接続されたモノによってアクチュエートすることで，私達の生活はより快適で便利なものになりつつある．しかし，この情報はスマートフォンなどを用いてさまざまな取得プロセスを踏むことで得ることができるが，円滑に情報を取得することができず，機器によって様々なアプリケーションを使い分ける必要がある．そこで，日常生活にある膨大な情報を人間が直接的にモノから取得し理解できるシステムを開発することで，円滑に人間の生活をアシストし我々の次の行動への誘導が行えるのではないかと考えた．

最終的には，例として取り上げたものの1つをプロトタイプとして実装し，実際の生活空間においてユーザービリティテストを実施することで本システムの有用性と実際に人間に次の行動を起こさせるためのアシストを行えているかを検証し本研究の評価とした．

キーワード：

情報の身体化, 触覚, ファントムセンセーション, IoT, IoA

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

加藤 大弥

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

Design of Information Embodiment Technology using  
Haptic for Everyday Interaction

Category: Science / Engineering

Summary

Nowadays, informative terminal and internet become a part of our everyday life and it is usually called the network formation of electronic appliance or furniture and internet as IoT. Moreover, undoubtedly it assists our everyday life if human behaviour and environment are turned into data and those data is analysed and actuate when connecting with the internet. However, that is always a problem when collecting and analysing bulky data via smartphone since various apps are used to connect different appliance respectively. Therefore, it comes the thinking that developing a system which assists collecting and analysing bulky data easily so that improve our everyday life and guide our actions into a better way. Last but not least, a prototype was designed and user tests were examined under real life condition so that appraising the usability of the system and if the system really guides human action.

Keywords:

Embodied Informatics, haptics, phantom sensation, IoT, IoA

Keio University Graduate School of Media Design

Daiya Kato

# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. 現在の人間－モノ間のコミュニケーション	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. 情報技術	5
2.1.1 モノのインターネット	5
2.1.2 日常生活の情報化	6
2.1.3 情報の可視化技術	8
2.2. 触覚技術	12
2.2.1 触覚提示デバイス	12
2.2.2 人間の能力と触覚	14
2.3. 情報と触覚	15
2.3.1 情報通知と触覚	17
2.3.2 情報認識と触覚	18
第 3 章 日常生活での情報の身体化と行動の誘発	21
3.1. 日常生活と IoT	21
3.2. 日常的な情報の身体化の提案	23
3.3. IoT における情報のあり方の考察	23
3.4. 情報の身体化と行動の誘導	27
3.4.1 提示する触覚の考察と提案	30

---

3.5.	情報の身体化の体験設計	31
3.5.1	触覚の設計	31
3.5.2	情報の設計	34
3.6.	身体化システムの設計	38
3.6.1	提案するシステム全体の構成	39
3.6.2	IoT 機器とネットワーク構成	39
3.6.3	触覚提示デバイス	40
3.7.	本章のまとめ	41
<b>第4章</b>	<b>プロトタイプの構築と検証</b>	<b>42</b>
4.1.	情報の身体化システムのプロトタイプ	42
4.1.1	IoT 化システムとデータベース	42
4.1.2	触覚提示デバイス	44
4.2.	構築したシステムの性能	48
4.2.1	タッチセンサ	48
4.2.2	データベースサーバー	50
4.2.3	RaspberryPi3	51
4.2.4	振動触覚	52
4.3.	プロトタイプの考察と検証	60
4.3.1	振動の提示手法の評価と考察	61
4.3.2	ユーザビリティテストと結果	62
4.3.3	電子レンジを用いたユーザビリティテスト	66
4.3.4	ユーザビリティテストの詳細	66
4.3.5	結果と考察	67
4.3.6	プロトタイプの評価と情報の身体化	69
4.4.	本章のまとめ	70
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>72</b>
	謝辞	74





# 目 次

1.1	Philips Hue <sup>2</sup> . . . . .	3
1.2	攻殻機動隊におけるタッチコマと人間との会話 <sup>4</sup> . . . . .	4
2.1	インターネットの利用者数及び人口普及率の推移 <sup>1</sup> . . . . .	6
2.2	情報通信端末の世帯保有率の推移 <sup>1</sup> . . . . .	7
2.3	Internet of Toys の例 <sup>1</sup> . . . . .	7
2.4	ピエゾケーブルを用いた電力の可視化 [14] . . . . .	9
2.5	プロジェクタを用いたキッチンへの投影と情報の可視化 [13] . . . . .	10
2.6	アメダスを利用した日本における気温のマッピングと可視化 <sup>2</sup> . . . . .	10
2.7	HoloLens を用いた, Mixed Reality の実現イメージ <sup>3</sup> . . . . .	11
2.8	Physical 3D bar を用いた統計データの可視化 [5] . . . . .	12
2.9	TECHTILE Toolkit [9] . . . . .	13
2.10	ピエゾアクチュエータを配置した Tpad <sup>4</sup> . . . . .	13
2.11	Stereohaptics を利用した振動触覚の移動による体験の設計 [4] . . . . .	14
2.12	HapticAid [8] . . . . .	15
2.13	振動を用いた背中への触覚提示 <sup>5</sup> . . . . .	15
2.14	物理的な行動を遠隔地に伝送できる Physical Telepresence [6] . . . . .	16
2.15	振動子による歩行案内と仮想的な力場の提示 <sup>6</sup> . . . . .	18
2.16	コンテンツにあわせたファントムセンセーションの提示 [2] . . . . .	19
2.17	Taptic Engine <sup>7</sup> . . . . .	20
2.18	A(touch)ment 後継機である Twech <sup>8</sup> . . . . .	20
3.1	日常生活にあふれる情報とデータ . . . . .	23
3.2	電子レンジで得られた情報による行動の誘導 . . . . .	28

3.3	外出時における屋外の情報の提示による行動の誘導 . . . . .	29
3.4	生活インフラの使用状況の提示における行動の誘導 . . . . .	30
3.5	電子レンジによる身体化のプロセス . . . . .	35
3.6	センサ-データベースサーバーでの通信 . . . . .	37
3.7	データベースサーバー-触覚提示デバイス間での通信 . . . . .	38
3.8	IoT 機器とネットワーク構成 . . . . .	40
4.1	実装したタッチセンサ . . . . .	43
4.2	実装したデータベースサーバー . . . . .	44
4.3	実装したネットワーク構成 . . . . .	45
4.4	実装した触覚提示デバイス . . . . .	46
4.5	触覚に用いる音声データの取得の例 . . . . .	47
4.6	アルミホイルと銅板によるデータの違い . . . . .	49
4.7	AC アダプターとタッチセンサ . . . . .	49
4.8	金属部分へのタッチセンサの装着 . . . . .	49
4.9	ファイ現象とファントムセンセーション . . . . .	54
4.10	音量の変化と運動量の相関 . . . . .	55
4.11	ファントムセンセーションで発生する振動触覚の位置 . . . . .	56
4.12	振動触覚がワープするイメージ図 . . . . .	57
4.13	実際の音量による仕事量と被験者の感じた触感の仕事量 . . . . .	58
4.14	新たに仮定した仕事量と想定される仕事量 . . . . .	58
4.15	新たに仮定した仕事量の総量と仕事量の分配 . . . . .	60
4.16	単一振動の場合 . . . . .	62
4.17	ファントムセンセーションの場合 . . . . .	62
4.18	単一振動の強弱における正答率 . . . . .	63
4.19	ファントムセンセーションによる正答率 . . . . .	64
4.20	振動の強弱と振動の移動の正答と回答 . . . . .	65
4.21	レンジの中のモノの温度を提示するデモ . . . . .	66
4.22	温度上昇による振動触覚の移動 . . . . .	67

# 第1章 序

# 論

## 1.1. はじめに

1995年「インターネット」が流行語になってから21年、我々の日常生活はインターネットと共に全てが完結していると言っても良いほど情報社会として発展している。コンピュータも大学や会社に1台の時代から、一家に1台の時代になり、現在は一人で複数台のコンピュータを所有するようになった。また、コンピュータの使用方法も時代と共に変化している。webブラウジングやメールを送受信、文章を作成するだけであったコンピュータの役目が遠隔地の人と共同で1つの作業を行うことや、動画を見るツールとしてゲームをするツールとして、さらには銀行や買い物のような人間の生活に直接関わってくるように汎用的に使用されるようになってきている。現代社会では「インターネットとスマートフォンさえあればなんでもできる」と言う人も多くはないだろう。この言葉が象徴するようにスマートフォンの普及が急速に進み、全世界の人がオンタイムでインターネットを使用することができる環境が整ってきている。スマートフォンが普及し始めたのはiphoneが発売された2007年以降であり、一体誰が現在のような情報社会の発展を想像できたであろうか。こうした毎日スマートフォンを使用している私達の普段の生活は一体どのようなものであろうか。スケジュールからスマートフォンのアラームが自動で鳴って起床。目的地に行く電車の経路はスマートフォンが教えてくれ家を出る。昼食はスマホのマップから「おすすめ」と検索する。帰りには買い物に行くことをスマートフォンが知らせ、帰宅したら明日の予定を教えてくれる。といったところだろうか。今までは自分で検索や設定を行ってきた機能もどんどん自動化され、私達の生活はは考えることもなく便利なものになってき

ている。これらもインターネットを利用した機械学習や位置情報システムなどの情報技術の発達によって生まれたサービスである。

## 1.2. 現在の人間-モノ間のコミュニケーション

さて、人間同士が何かの行動を起こすとき、まずはコミュニケーションを取るだろう。誰か一人が勝手に行動を起こせば他の者に意見を言われるのは間違いないだろう。お互いの情報を共有することが一番大切なのである。この当たり前のようなことを念頭にして現在の情報社会を見てみよう。現在、IoT (Internet of Things) というモノ同士がインターネットで接続されると言った社会が展開されてきている。このモノ同士は互いにコミュニケーションを取り合うことで、人間に適した行動を行いより便利な生活環境を提供しようとしている。さて、このデバイスだけの会話によって決定された行動が我々に与えられるものは「おもいやり」なのだろうか「おせっかい」なのだろうか。ユーザーは「おせっかい」と理解していてもこの「おもいやり」を受けなければならないのが現在の情報社会である。そのような、このモノのネットワークに人間はどのように介入しているのだろうか。代表するデバイスとして、Philips が販売している「Hue」<sup>1</sup>は、インターネットに接続できる LED 電球と専用ルーターを使用することで、スマートフォン上の操作から、色と輝度を自由に変更することができる。今まで白色光や暖色光が多く部屋の明るさだけを変えていた生活空間を自分の好みの色と明るさをリアルタイムで変更することができ、また、「サバンナ」、「夕焼け」といった抽象的な雰囲気を作り出せる。これはスマートフォンを利用して人間が一方的にモノに指示を与えていることがわかり、お互いの情報が共有されているコミュニケーションは行われていない。

このように、現在の情報社会のモノ同士のコミュニティにはそこにいるべきはずのユーザーは介入していない。人間と人間であってもコミュニケーションを取ることにより良い行動をすることからわかるとおり、人間とモノの間には圧倒的にコミュニケーションが足りていないであろう。漫画「攻殻機動隊」<sup>3</sup>に登場するタチコマと呼ばれる多脚戦車ロボットは、自身で思考し行動を起こすほかに人



図 1.1: Philips Hue <sup>2</sup>

間と対話をすることで次の行動を起こすための参考にするといったことを行っている。これは人間に対しても同様であり、モノやロボットが保持している情報を理解することが可能になることで、我々の次の行動を正しく円滑に行うことができるのではないだろうか。

### 1.3. 本研究の目的

本研究では IoT 機器で取得される日常的な情報を人間が理解できる形式で身体化を行う方法を考察し、日常の生活を円滑にアシストする手法を提案する。また、提案する身体化の手法の一部のシステムを実装しユーザービリティテストから情報を身体化し次の行動を誘発の考察を行う。

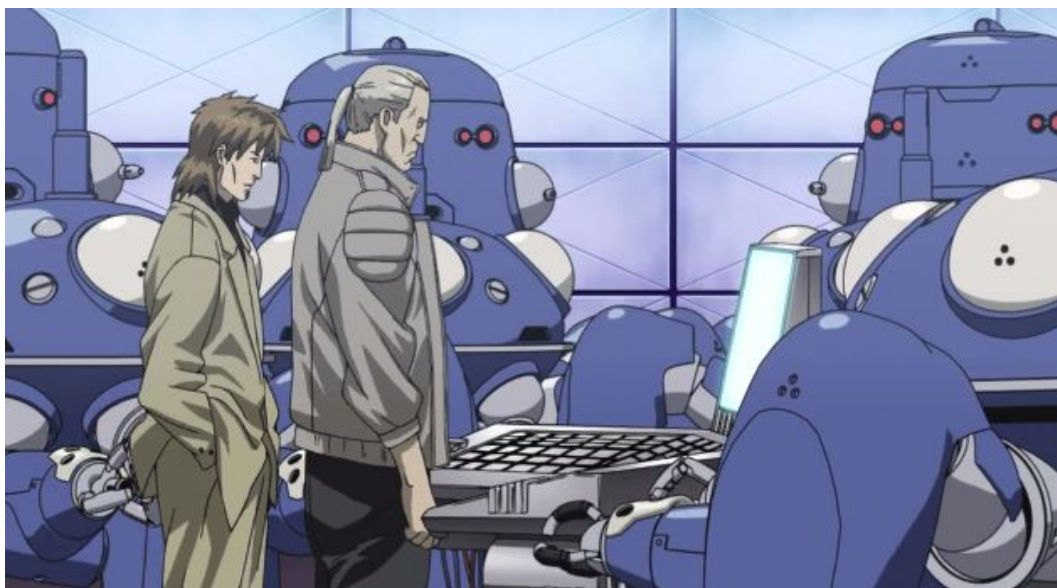


図 1.2: 攻殻機動隊におけるタチコマと人間との会話<sup>4</sup>

## 1.4. 本論文の構成

本章では序論として研究の背景と目的を述べた．第二章では関連研究として，情報技術におけるモノのインターネットにおける人間とのインタラクションの研究や情報の可視化技術についての考察と触覚提示技術による，人間への触覚提示手法とそれをを用いたさまざまな情報の提示手法を述べる．第三章では，日常の情報を身体化する手法の提案，第四賞では本研究で実装した触覚提示デバイスのプロトタイプから情報の身体化における触覚と有用性の評価とユーザービリティテストから得られたユーザーの行動の変化の考察を述べる．第五章では本研究の結論を述べる．

- 1 「Hue」は、オランダに本拠地がある PHILIPS が製造、販売をしている LED 電球である．インターネットに接続することでインタラクションを行うことができる．<http://www2.meethue.com/>
- 2 出典：Philips Hue<http://www.moxbit.com/2015/08/review-philips-hue.html>
- 3 士郎正宗 (1991) 『攻殻機動隊-THE GHOST IN THE SHELL』
- 4 出典：[http://blog-imgs-82.fc2.com/s/o/t/sotohan/sotohan\\_2ndgig15\\_img006.jpg](http://blog-imgs-82.fc2.com/s/o/t/sotohan/sotohan_2ndgig15_img006.jpg)

## 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IoT技術，触覚技術，情報の可視化技術三分野を取り上げる．

### 2.1. 情報技術

現在，我々の日常生活においてインターネットはなくてはならないものになっている．スマートフォンやノートパソコンだけではなく，スマートウォッチや日常の身体情報(心拍，運動量，睡眠時間等)を記録，可視化することができるアクティブラッカーなどのスマートデバイスもインターネットを利用することで我々の生活を豊かにしている．また，生活空間においても様々なモノがインターネットに接続され始めている．このように現在の我々の生活はこうした情報技術の発展により大きく変化を遂げているのは明らかである．その中でも、近年、特に著しく成長を遂げているものを以下に示す．

#### 2.1.1 モノのインターネット

先に述べたように，我々の日常生活のほとんどにインターネットが介入し，総務省の平成28年版通信白書<sup>1</sup>によると平成27年には日本人の約1億47万人，83.0%(図2.1)がインターネットを使用している．しかし，現在，インターネットを利用するのは人間とそれに関する情報端末だけではない．日常生活における様々なモノをインターネットに接続することで新しい恩恵，利益を創造しようという「IoT: Internet of Things」という考え方が流行している．1999年, Kevin Ashton がはじ

めてIoTという言葉を使ったとされ、すべてがインターネットのように接続され、情報交換する環境を示す意味で使用されている。ここ数年での、印刷技術の向上によるコンピュータの超小型化と開発者ツールの向上・オープンソース化によりモノをインターネットに接続することが用意になり、ユーザ自身が開発者になることができるようになったためIoT社会が急速に発展してきていることが現状である。Lito Kriara らの Internet of Toys [15] は、子供のおもちゃにこうした小型IoTデバイスを導入し、子どもとの新しいインタラクションを創造しすることを目的として新しい通信規格をIEEE802.15.7で標準化を行った。これにより、スマートフォンからメッセージを送信することでぬいぐるみと会話を刷ることができるといったインタラクションを作り出している。

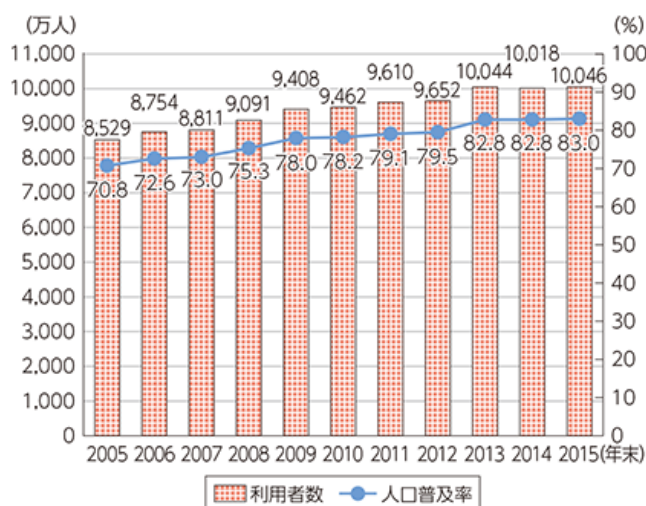


図 2.1: インターネットの利用者数及び人口普及率の推移<sup>1</sup>

### 2.1.2 日常生活の情報化

近年、日常生活で使われている様々なものが情報化してきており生活インフラも情報化が進んでいる。2016年4月に法改正により電力自由化が始まった。これにより今までの電気としての価値に付随して、競合他社がインフラに使用情報などをインターネット上で管理することが可能になるスマートメーターを発売し始めた。アメリカではスマートメーターの普及がすでに進んでおり、ワシントンDC



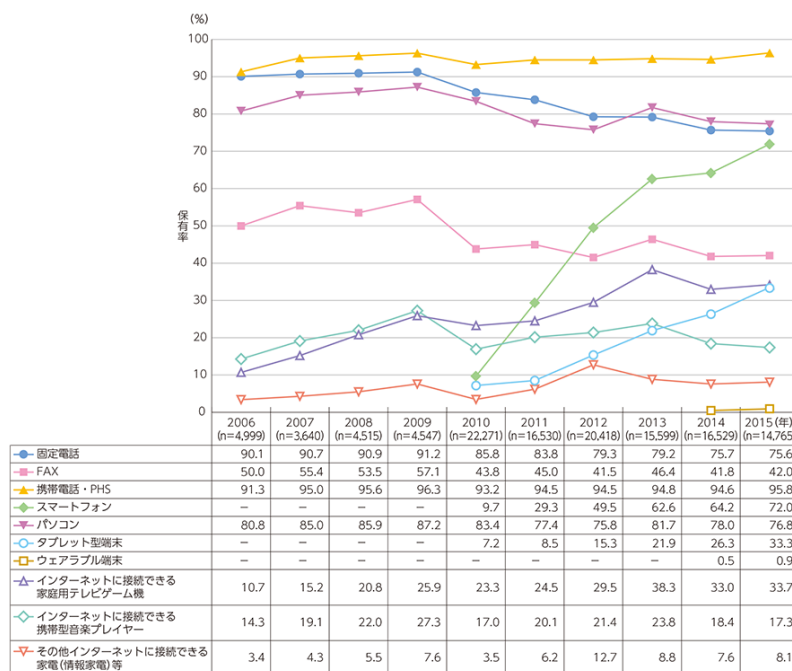


図 2.2: 情報通信端末の世帯保有率の推移<sup>1</sup>



図 2.3: Internet of Toys の例<sup>2</sup>

に拠点を置く IEE 研究所<sup>3</sup>は、2014 年時点で 4600 万台がすでに設置されていると示している。このような通信機能をもった電力網をスマートグリッドといい、電力をネットワーク越しに監視・管理することで、コストを最小限に抑えることができるといった利点がある。このような時代背景から、電気だけではなく日常生活インフラが今後急速にネットワークを形成するのではないかと考えられる。また、このような情報としての可視化以外にも家電等の可視化が行われている。Philipp Schoessler らの Cord Uls [14] は、家電などに用いられている電源ケーブルに圧電素子を使用することで、ケーブルが絡まっている・ケーブルを何かで挟むを行った行動を読み取り電力の供給を制御することで家電が人間に訴えかけるようなコミュニケーションを取ることが出来るものである。このように家電の仕事量を変化させることで目には見えない電力の情報を可視化することができる。

佐藤らの MimiCook: A Cooking Assistant System with Situated Guidance [13] では、料理をする際の手順や材料の量をキッチンにプロジェクターで投影することで、料理を補助するシステムの開発を行った。これによって、今必要な材料やボウルの中に入れている材料の量をリアルタイムに可視化することができる。このように目では見えない情報を可視化することで人間の行動を補助することができるということがわかる。

### 2.1.3 情報の可視化技術

スマートメーターのような使用電力や通信の自体の流れなど、目に見えない、目には見えにくい情報を人間が視覚的に観測することを目的とした情報の可視化の研究、実用化が行われている。日常生活では、アメダス<sup>4</sup>を利用したの各地のリアルタイムな降雨量を可視化する天気実況や地震の規模や範囲を赤色や黄色でマッピングするニュース番組等が挙げられる。これにより、数値の字幕で判断していた情報を、直感的に素早く理解することを可能にしている。また、今まで数値の理解・判断・認知に時間がかかることで、情報の全体像を掴みづら位という問題を解決し、人間の日々の生活において情報伝達の円滑化を図っている。

一方で二次元的な可視化ではなく三次元的な情報の可視化の研究も行われている。Microsoft は、「HoloLens」を発表・発売した。HoloLens は現実世界に仮想世



図 2.4: ピエゾケーブルを用いた電力の可視化 [14]

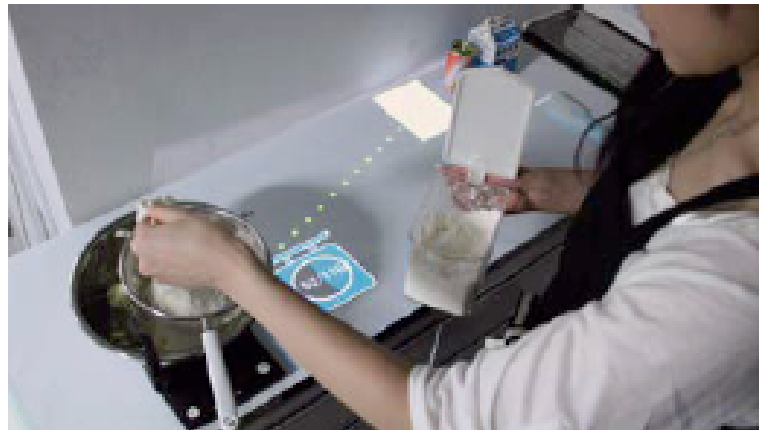


図 2.5: プロジェクタを用いたキッチンへの投影と情報の可視化 [13]

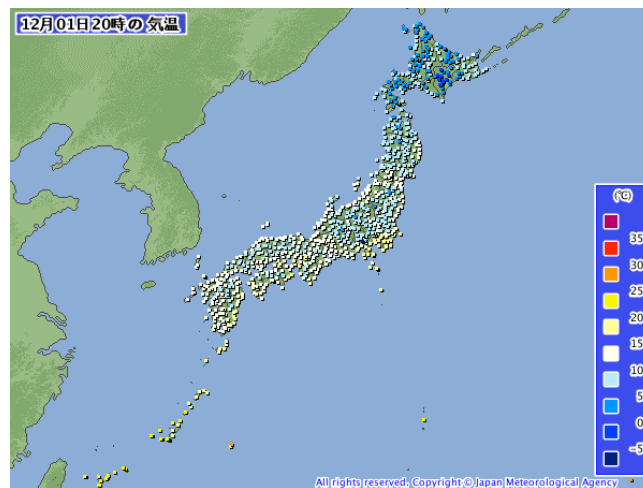


図 2.6: アメダスを利用した日本における気温のマッピングと可視化<sup>5</sup>

界を投影することで、あたかも現実空間に仮想的なオブジェクトが存在する図 2.7 のような Mixed Reality を実現している。これにより、三次元モデリングなどディスプレイ越しに行っていた作業やを実際に触れて制作することが可能になり、多くの SF 映画、ドラマ、アニメで描かれているような実際の目には見えないモノの可視化を行うことが可能になった。

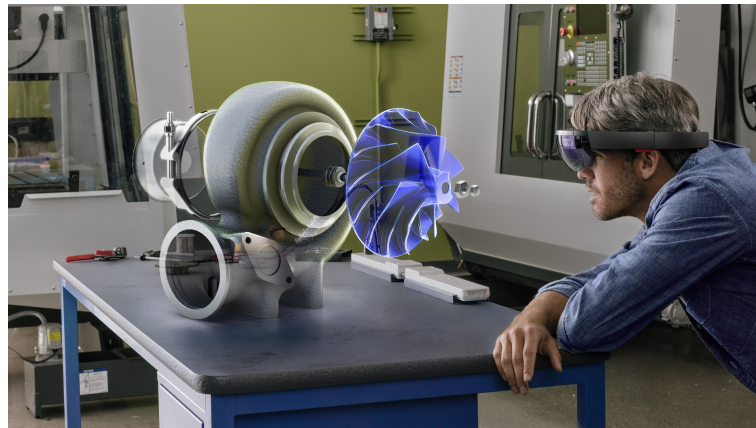


図 2.7: HoloLens を用いた、Mixed Reality の実現イメージ<sup>6</sup>

仮想的に情報を現実空間に落としこむこと以外にも、仮想的なオブジェクト情報を実際のオブジェクトとして再現する研究も行われている。Yvonne Jansen らの Evaluating the Efficiency of Physical Visualizations [5] では、三次元のグラフやオブジェクトを実際に作成した Physical 3D bar を使用することで、直接手で触れることのできる形でデータを可視化することができる(図 2.8)。また、現在の形から今後の技術の発展により、高精度・高分解能の Physical 3D bar が開発されることで、現実的にオブジェクトを複製レベルでの可視化を実現することができる。本実験のユーザーテストでは、二次元グラフ・三次元グラフ・Physical 3D bar を使用したグラフに対するのユーザの理解度についての考察をしている。結果として、実際に手にとって触れたり様々な角度からように見ることのできる Physical 3D bar を利用したグラフの理解度が高いことがわかり、産業界において、粘土でモックを制作するような直感的なものづくりを行うことも可能になっている。

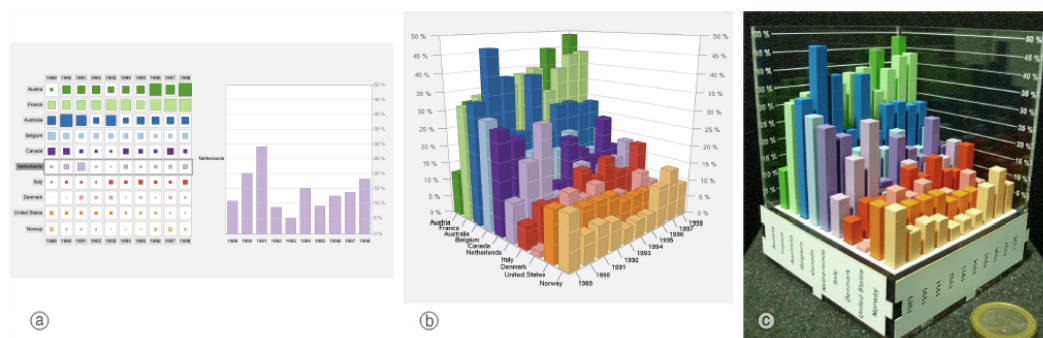


図 2.8: Physical 3D bar を用いた統計データの可視化 [5]

## 2.2. 触覚技術

これらのように情報の可視化の研究，社会的実装は多く行われている．そのような中で，目に見える形ではなく情報を身体的に表現する方法として触覚技術の発展も著しい．研究分野としてのみではなく，一般的な技術としても導入され始めており，仲谷らの触楽入門<sup>7</sup>のような書籍も販売され始めている．そもそも触覚とは皮膚または粘膜の表面に何かが接触したときに感じる感覚のことをいう．特に，皮膚に直接的に知覚することができる触覚を皮膚触覚といい，触覚・圧覚が含まれている．これらを知覚する仕組みとしては，皮膚の表皮・真皮・皮下組織にそれぞれ分布されている機械的受容器で知覚している．触覚は一般的に，ものが触れたり圧迫したり振動したりすることで働くものである．この知覚システムを利用して，意図的に触覚の再現技術，触覚による通知技術を以下で示す．

### 2.2.1 触覚提示デバイス

人為的に触覚の再現・提示する研究は数多く存在している．南澤らの開発した TECHTILE toolkit [9](図 2.9) は，マイクを用い，モノをなぞることで音声信号から触感を記録・再生することができるツールキットである．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．また，ツールキット化したことにより，敷居が高かった研究分野からの脱却も期待されている．Vincent

Levesque らの Enhancing Touch Interactions with Programmable Friction [7] では、ディスプレイ上に高周波数の振動を出力することが可能な piezo アクチュエーターを図 2.10 のように画面端に配置し、それらを制御することで、人間の画面をタッチしている触感を変化させることができる TPad System の開発を行った。これは、タッチディスプレイの表面に微細な振動を与えることで凹凸感・摩擦間を擬似的に与えることが可能になり、映像コンテンツに触覚を与えることや視覚に頼ることなく目的の場所をタッチすることができる入力デバイスとしての役割を担っている。また、すでにこの技術を応用したタブレット型コンピュータが「TPad Phone<sup>8</sup>」として販売されている。



図 2.9: TECHTILE Toolkit [9]

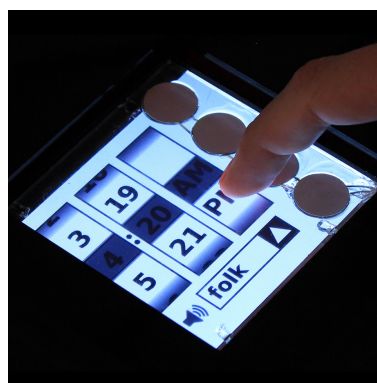


図 2.10: piezo アクチュエータを配置した Tpad<sup>9</sup>

Ali Israr らの Po2:Augmented Haptic for Interaction Gameplay [3] と Stereohaptics:A Haptic Interaction Toolkit for Tangible Virtual Experiences [4] においては、上記でも示したような音声信号を用いた触覚の提示デバイスの開発をおこなっている。このデバイスは振動を発生させるアクチュエーターを図 2.11 で示すように装着することで、振動触覚に移動感をもたせることで、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になっている。振動の移動についてはファントムセンセーションと呼ばれる皮膚上の 2 点かんを振動刺激すると 2 点を結ぶ力洗浄に 1 つの振動感覚が生じる錯覚現象と仮現運動と呼ばれる振動刺激の発生と消失を行うことで実際に刺激が運動しているように感じる現象を用いることで実現している。この触覚の移動を用い

ることで体験者のゲームへの没入感の向上やコンテンツの理解度の向上が見られることがわかっている。



図 2.11: Stereohaptics を利用した振動触覚の移動による体験の設計 [4]

### 2.2.2 人間の能力と触覚

触覚研究は、さわりごごちの再現・提示だけが目的ではない。人間が知覚することが可能な触覚を拡張するという研究も行われている。例えば、人間の知覚することが可能な触覚には個人差が大きくあり、手で触るだけで 0.1mm 以下の凹凸を手で知覚することが可能な金属の旋盤職人や医者のように局部に手を当てるだけで、異常を検知できるといった人々のような触覚が発達している者もいる。前田らの HapticAid [8] では、図 2.12 のように指の先にピエゾセンサを装着し、ものに触れた時の微細な振動を音声波形として取得・増幅し手首に提示することで、普通ではわからないような細かな凹凸などの触り心地の違いを判別することができるように述べている。Siyon Zhao らの Using haptic input to enrich story listening fo young children [16] では、背中に触覚アクチュエーターを 5\*4 の 20 個



配置し，図 2.13 にあるように物語に合わせて振動パターンを提示することで，4-6 歳の子供に対して振動触覚の提示と共に読み聞かせた物語の理解度と記憶量が約 2 倍になったことが実証された．このように触覚を媒体として人間に備わっている触覚以外の能力を補助することが可能であることがわかる．このように物理的な身体の拡張の他に人間の感覚的な意思の部分においてもなんらかの形で拡張することが可能である．



図 2.12: HapticAid [8]



図 2.13: 振動を用いた背中への触覚提示<sup>10</sup>

また，触覚を再現することや振動を与えること以外にも触覚提示のアプローチは存在している．Daniel Leithinger らの Physical Telepresence [6] は，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．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物理的に動かすことができる．これによって，遠隔地でも他社の存在感はもちろんのこと人間の能力も直接的に伝送することが可能になった．

## 2.3. 情報と触覚

触覚研究の成果は，我々の日常にも現れている．我々が現在では日常的に使用している携帯電話に備わっているバイブレーション機能である．これは，一定の振動パターンで人間に情報を提示する低解像度な触覚提示であり，ユーザが長期間使用していることでパターンを認識することでメール・電話・アプリケーション

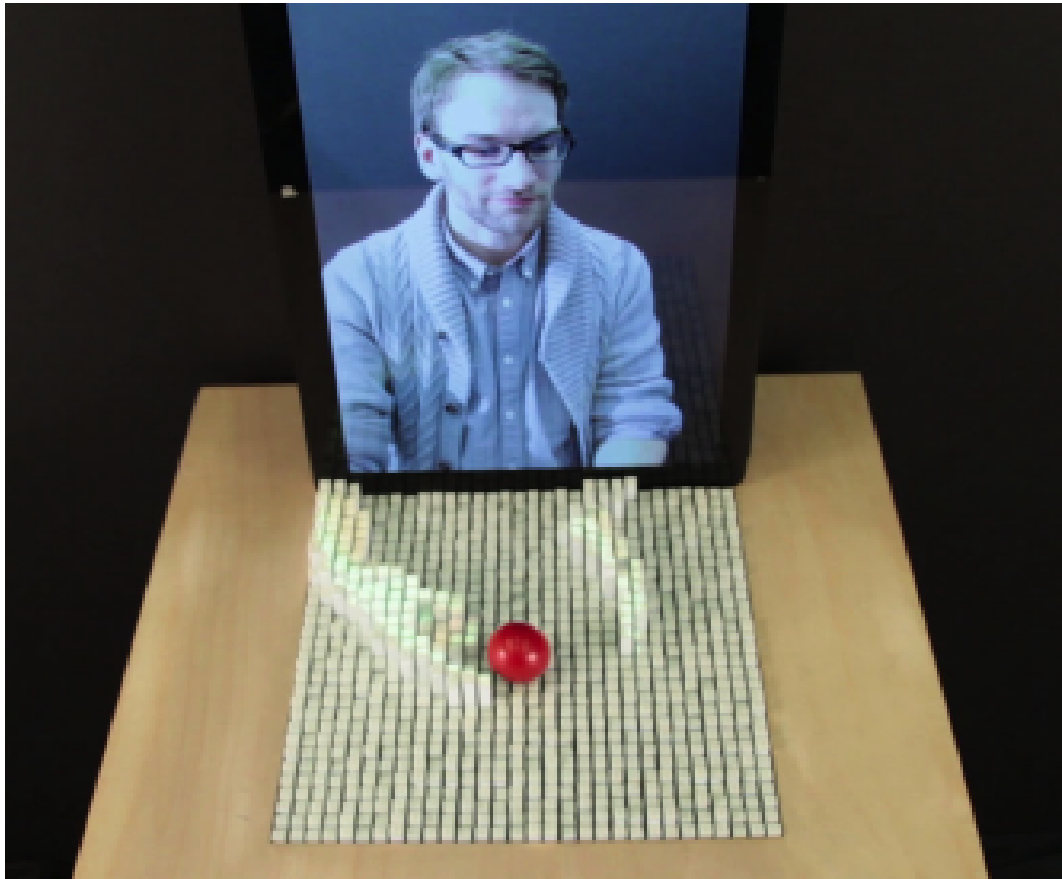


図 2.14: 物理的な行動を遠隔地に伝送できる Physical Telepresence [6]

ンの通知などを判別することが可能になっている。2016年に発売されたApple社のiPhone7では、Taptic Engineと呼ばれる振動アクチュエーターを採用しておりホームボタンの触覚の質を変化させることが可能になった。これにより、従来まではユーザが振動触覚と起こりうる事象を学習することが必要であった触覚提示をタッチの質を変えることで、より直感的に感じることができ、1種類の触覚から得られる情報量が格段に増加した。このように我々の生活にはすでに触覚による情報通知と情報認知技術が溢れており、日々の生活を格段に便利に豊かにしていると言える。

### 2.3.1 情報通知と触覚

現在、触覚フィードバックのほとんどが、携帯電話に用いられているモーターを使用した単一的な振動での通知である。この振動は情報の本質を伝えるわけではなく情報が何であるかという程度の通知機能のみで使われることが多い。また、歩道に敷かれている視覚障害者用の誘導ブロックも触覚による通知であると言える。ブロックによって、進むことができるか止まるべきところなのかのみを通知することができる。しかし、ここがどこでどれくらいの場所なのかという情報はブロック以外の五感によって補わなくてはならない。岡安光博らの開発したスマート電子白杖 [17] は、縁石や階段などの段差を杖の先に付いている超音波センサーで検知しユーザーに振動で通知することで危険を通知するシステムを開発している。このシステムはユーザーの安全を守るために、触覚を用いて通知することが可能な危険な事象を拡張することで他の五感に頼る前に危険から回避させるということを目的としており、資料によると視覚障害者の障害物回避能力の向上と歩行速度の向上が見られた。このように通知のみごく少ない情報量であってもすべての情報を触覚に変換することでユーザの生活を向上させることができるといえる。暦本純一が開発した Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation [12] は、指に持っている振動子からの振動の感覚を調整することで、人間に仮想的に特定の方向から引っ張られてい感覚を発生させることで触覚だけで人間を誘導することのできるデバイスである。これによって視覚に頼らない歩行案内や仮想的に存在している力場を提示することも可能になっている。

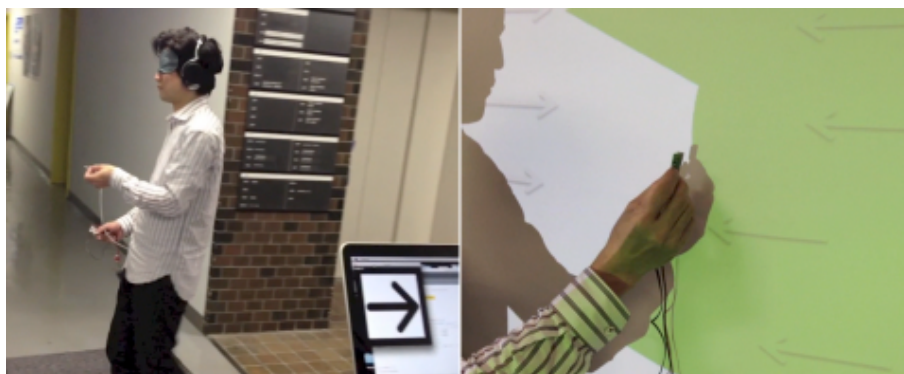


図 2.15: 振動子による歩行案内と仮想的な力場の提示<sup>11</sup>

### 2.3.2 情報認識と触覚

情報通知のみならず，現在の触覚研究では，触覚の解像度を高めることで新しい感覚や伝えたい情報そのものを触覚として再現することが行われている．先に述べたような，ディスプレイに広帯域の振動を与えることで，さわりごちを直接変化させる TPad や iPhone7 に搭載されている Taptic Engine(図 2.17) もこれに該当するものである．Ali Israr らの Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display [2] では，これまでの，モーターでの振動触覚を用いた触覚提示デバイスを用いているが，あれ以上に並べられた振動モーターの出力と起動を制御することで，図 2.16 のような実際には存在していないはずの振動触覚の提示やあたかも皮膚表面上をなぞられているようななめらかな動きのある触覚提示を可能にしている．これらはファントムセンセーションと呼ばれ，振動触覚にさまざまな情報を付加させることに今後の応用が求められている技術である．

また，振動をモーターのような単一な振動から変化させる研究も行われている．中村らの開発した A(touch)ment [10]，後継機である花光らの Twech [1](図 2.18) は，モノの触り心地を映像と音声によって記録・再生することが可能なデバイスである．スマートフォンケースに装着されているマイクによって対象となるオブジェクトをなぞりながらビデオ撮影機能を使用し記録する．この時の音声をスピーカーの構造に似ているアクチュエーターで再生することで，高解像度の振動触覚を提供し，映像と組み合わせることであたかも対象部を直接触っている感覚を得

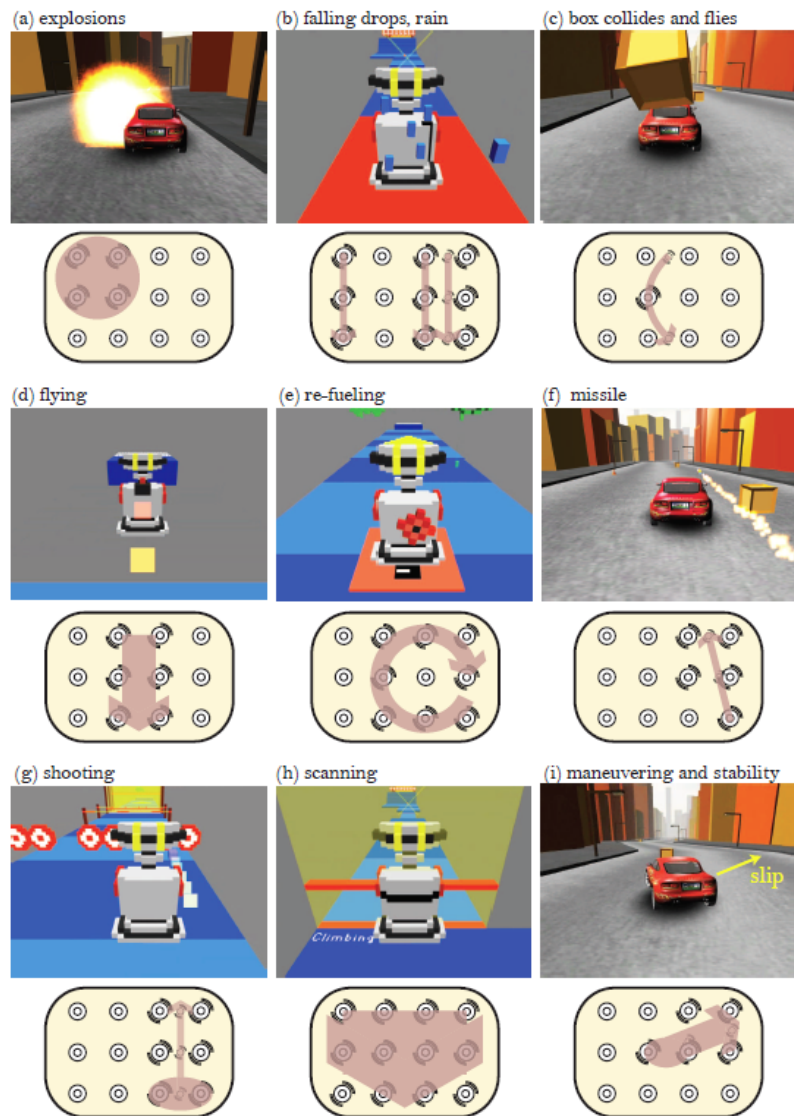


Figure 2. Application of ghost sensor prompts for various game events

図 2.16: コンテンツにあわせたファントムセンセーションの提示 [2]

ることが可能である．これにより将来的には音声や映像のように触感の記録・伝送・再生を行うことができると期待されている．



図 2.17: Taptic Engine<sup>12</sup>



図 2.18: A(touch)ment 後継機である Twech<sup>13</sup>

- 1 出典：平成 28 年版情報通信白書：<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/index.html>
- 2 出典：Disney Research <https://www.disneyresearch.com/project/calipso-internet-of-things/>
- 3 IEE(Innovation Electricity Efficiency) 研究所
- 4 AMeDAS:Automated Meteorological Data Acquisition System は、日本国内で 1300ヶ所の気象観測所で構成される気象庁の無人観測施設
- 5 出典：気象庁 <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>
- 6 出典：GIZUMODE AU <http://www.gizmodo.com.au/2015/12/microsofts-latest-hololens-is-here-and-its-amazing/>
- 7 仲谷正史、筧康明、三原聡一郎、南澤孝太 (2016) 『触楽入門 はじめて世界に触れるときのよう』，朝日出版社 [18]
- 8 TPad Phone : <http://www.thetpadphone.com/>
- 9 出典：Vincent Levesque <http://vlevesque.com/>
- 10 出典：Disney Research <https://www.disneyresearch.com/project/feel-effects/>
- 11 出典：Rekimoto Lab <https://lab.rekimoto.org/projects/traxion/>
- 10 出典：Apple 's new Taptic Engine inside iPhone 6s blasted with X-rays, captured in action on video <http://www.idownloadblog.com/2015/09/25/video-iphone-6s-taptic-engine/>
- 13 出典：Embodied Media <http://embodiedmedia.org/project/twech/>

## 第3章

# 日常生活での情報の身体化と行動の誘発

### 3.1. 日常生活とIoT

私達の生活には図 3.1 で表している通り、インターネットを介して多くモノとモノの間においてデータ通信が行われることで我々の豊かで快適な生活を実現している。代表的な例として、スマートロックが挙げられる。Qrio Smart Lock<sup>1</sup>が挙げられ、インターネットに接続されている鍵をスマートフォンを用いることで遠隔地から開閉することが可能になっている。このようなインターネット上に存在するモノをスマートフォン等のインターネットに接続されているデバイスを用いて操作するといったものの他に、生活空間に存在する環境データや身体データをインターネットに接続されているセンサを元にセンシングし、データの収集・解析をインターネット上で行い、解析の結果に応じてモノがユーザーに行動を起こすといった IoT 製品が開発され始め近年急速に普及され始めている。

具体的にはまず、センサによる情報の取得は、アクティブトラッカーと呼ばれているような身体に装着することで心拍・運動量等のデータを取得することができるデバイスはすでに一般的になりつつある。さらに、中村らの SenStick 2: ultra tiny all-in-one sensor with wireless charging [11] では、50mm10mm5mm で 3g という軽量で加速度・ジャイロ・温湿度等の計 8 種類のセンサが搭載されている高性能 IoT センサの開発も行われており、このような小型で軽量な高性能センサによってデータの収集が容易になることで、収集されるデータもますます増加すると見込まれる。

次に、これらのセンサから取得したデータの殆どが数値データであり、人間が理解しずらいまたは、理解出来ないデータであるため、人間が判断できる形のなんらかの形の情報に変換する必要性がでてくる。現状のサービスで多く取られている方法としては数値データのグラフ化と統計である。一定の期間で収集した情報を解析し提示することで人間に判断しやすい情報に変換している。

最終的に、ユーザーにスマートフォンなどの視覚的に表示することが可能なディスプレイを用いることでユーザーに情報の提示を行い、この情報をユーザーが見て考察し次に自分がどのような行動をとるべきなのかを判断させることで生活の支援を目的としているのが現在のIoTサービスである。

しかし現在のこの形式のIoTサービスによる生活の支援において問題点があると考えられる。それは「センサデータを用いた情報提示手法」「情報取得までのプロセス」「IoT機器・サービスにおけるアプリケーションの統一性」である。

まず、センサデータを用いた情報提示手法に関しては、センサデータをグラフや統計を利用することが正しいのかと点である。情報とはそもそも「敵情を報知する」ことが語源であり、わかりやすく次に何をすべきかを示さなければならない。しかしグラフの意味していることは単なる数値データであり、円滑に次の行動を誘発することは困難なのではないのかと考える。次に情報取得までのプロセスに関しては、日々のスマートフォンの利用からも想像できるように必要な情報にたどり着くまでにボタンを押す・スクロールするなどの多くのプロセスをこなさなければならないため、情報を取得してから行動を起こすまでの円滑性を失ってしまいます点である。また、操作するという行動にリソースを割かなければいけないことも円滑性を失ってしまうということも問題点に挙げられる。最後にアプリケーション統一性に関しては、IoT製品やサービス毎に情報の取得方法が異なることが多く、さらに情報にたどり着くまでのプロセスも異なるため時間と労力を多く必要とため、生活の支援が行われているのかという点である。

これらのことから考察した結果、IoTとは、ユーザーの日常生活を妨げることなく円滑に次の行動を起こすための支援をするべきものだと考える。



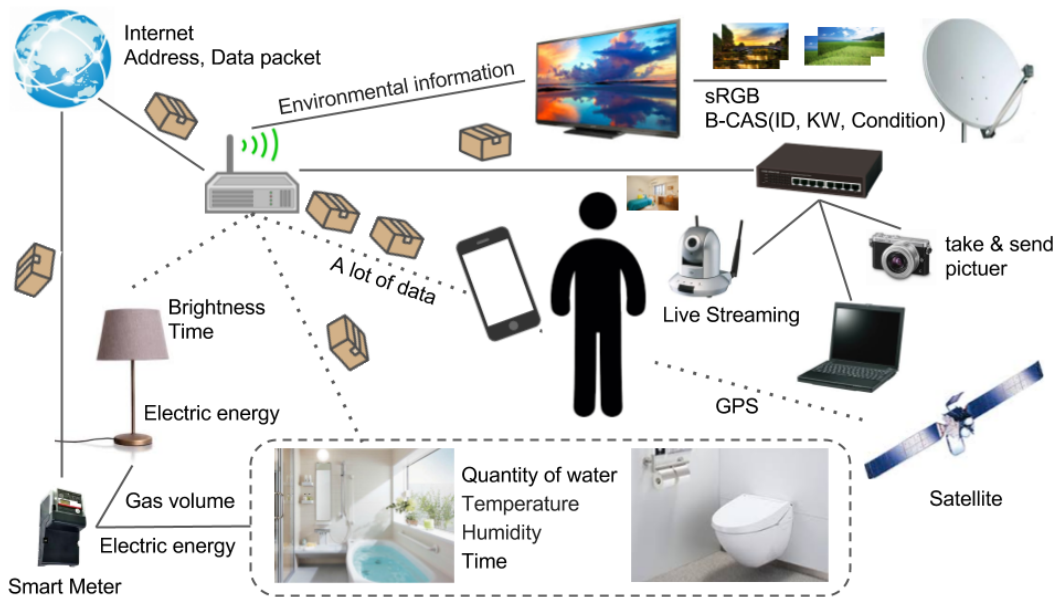


図 3.1: 日常生活にあふれる情報とデータ

### 3.2. 日常的な情報の身体化の提案

ユーザーの日常生活を妨げることなく円滑に次の行動を起こすための生活支援を行うために、本研究では情報の身体化を行うことを提案する。情報の身体化を行うことで、今までのように数値的データから得られたグラフなどの情報をユーザーが考察し、次の行動に移すといった現在のIoT機器を用いた生活から、ユーザーが直感的に判断することが可能な身体的に知覚できる形式で情報を提示することで、ユーザーが考察する負担を減らし、さらに情報の取得を日常的な行動に埋め込むことでより円滑な生活支援を行うことを可能にすることが目的である。

この目標を達成するために、IoTにおける本来の情報のあり方・情報の身体化の手法・理想的なIoTの構成を日常生活における例で示しつつ考察する。

### 3.3. IoTにおける情報のあり方の考察

IoTにおける情報のあり方として一番良いのは、家電などの機器が保有している情報そのものである。冷蔵庫を例として挙げると「卵・人参・鶏肉・バター・白

菜」といった保持している材料を「卵・人参・鶏肉・バター・白菜」という形で情報を形成し、ユーザーにそのままの形で送信することができるということが理想的である。しかし、このようなIoTで取り扱っている情報をそのまま受け取るためには、ユーザー自身に現在のインターネットと同じプロトコルを導入し、無線か有線を接続する必要が出てくる。当然ではあるが、現段階において、人間には無線も有線も備わってはならず電気信号による0と1のバイナリデータによる情報のやり取りを行うことはできない。そのため、人間に情報を伝えるためには人間が知覚できる形の情報に変換しなければならない。

これは様々なセンサから取得したデータを利用する際も同様である。IoTにおけるセンサデータなどの数値データを情報に変換場合に置いても、数値データはユーザーが直感的に時間をかけずに判断することができる形の情報にするべきだと考える。前項でも取り上げた通り、数値データをグラフなどの図表の情報として置き換える手法は、ユーザーがグラフが意味するところ・グラフのデータを再度、判断する必要がある。これではセンサデータをただ可視化しているだけであり、ユーザーにとっての判断基準にはならず次の行動へ誘発することができないためである。数値データそのものではなく数値データからユーザーが何かしらの行動を起こすことが可能な情報に変換する必要があると考えた。

実際にどのような情報を用いることで、我々の生活がどのような変化をもたらすかどのような行動を誘発できるのかを、家電を使う際・外出する際・クレジットカードや生活インフラのような消費財を使用する場合の3つのシナリオで以下に示す。

#### 家電における例

キッチンスペースに置いて、夕食の準備をしている場合において、電子レンジでモノを温めるというシチュエーションがよくある。料理を行っている場合においては、レシピによって温める時間が決まっているためその情報からユーザーは温めるという次の行動を取ることが可能になる。しかし、冷凍食品やお弁当、スープなどを温めることを考えた場合、冷凍食品やお弁当に記載されている情報に準じたとしても、冷たい・熱すぎるといった状態に陥り、再び温めることやしばら

く冷ますといった行動を追加で起こさなければならない。この場合において電子レンジ内部のモノの状態を温度や湿度といった数値データとしてセンサから取得し、ユーザーに図 3.2 のように温まり具合や温度の変化といった情報として提示することが可能になれば、ユーザーは温め時間にしばられず任意のタイミングでモノを電子レンジから取り出すことが可能になる。

#### 外出時の例

出勤や外出する場合において、外に出てみると雨が降っており傘を持ってくるのを忘れてしまうというシチュエーションを想定する。この場合、ユーザーは雨に当たることを許容するか傘をとりに戻る、もしくは傘を買うと言った行動を取らなければならない。どの状況においてもユーザーにとって不利益になることが多い。そこで、図 3.3 で示すように玄関を出る直前やオフィスをでる際にユーザーに雨が降っているとき観測することができる、リアルタイムな降雨量・風量・湿度といった数値データを元に傘が必要であるという情報を提示することで、ユーザーに普段とは異なる違和感があることを意識付けさせる。そうすることで、雨が降っているということを連想させ傘を持っていくという行動の誘発を行うことが出来る。その他にも、玄関に何かモノを忘れてしまったというシチュエーションでも同様のことが可能であると考えられる。

また、屋外の気温・湿度・風の強さなどのデータを活用して情報を作成し、ユーザーがクローゼットを開ける際に屋外の様子わかるような情報を提示することで快適な服装に誘導することも可能であると考えられる。

#### 日常生活における消費財での例

クレジットカードを使用して買い物を行う際のシチュエーションを想定する。近年ではインターネットでの決済だけにとどまらずスーパーマーケットでの買い物においてもクレジットカードで支払うことが多くなってきている。クレジットカードの支払いにおいて、実際どの程度金銭を使ったかを実感するということが薄く、気がつくとも多額の金銭を使用していたことに気がつくということがよくある。生

活インフラについても同様のことが考えられる，電気・ガス・水道においても当たり前前に使用するということと使用した量を月に一度紙媒体としてのみでしか知覚することができないため，使いすぎてしまったという状況に陥ってしまう．どちらの場合に置いても図 3.4 のように数値的な使用料というデータをクレジットカードで支払うタイミング・水道をつかう際の蛇口を引き上げるタイミング・部屋の電気をつけるタイミングで使い過ぎているという情報に変換して提示することでユーザーの使い過ぎを防ぐことができると考えられる．

このように生活空間に存在しているモノが本来持っている情報や数値的なデータを活用して，人間が取得しうる情報を作成しユーザーに提示することで事前に次の行動を誘発させ，日常生活をより快適にすることが可能になると考えた．

さて，これらの場合を考慮し，日常的な生活において次の行動を誘発させるための情報をユーザーにどのようにアクチュエートすべきか，また，情報の形式がどうあるべきかを考察する．そのために，人間が日常生活においてどのように情報を取得しているかの考察を行った．人間が情報を取得する場合，上記に示した3つのシナリオに置いてもわかるように，視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚の五感を用いていることがわかる．例えば，スマートフォンを利用した従来の方法においても視覚を利用して情報を判断している．この五感の中で情報を判断するものとして，味覚・嗅覚は数値的なデータから生成される情報を出力する場合において困難であると考えた．視覚・聴覚・触覚に関してはどの場合においても人間の行動の誘発を行うことが可能であると考えられるが，本研究では，これらを踏まえて情報として触覚を用いることに着目した．触覚に着目した理由として，第一に，ユーザーの日常生活において視覚を用いた行動の誘発を行うためにはスマートフォンや映像ディスプレイの操作を行う必要があり，これによって，ユーザーが次の行動を起こす際に余分な時間を要するためである．第二に，人間の基本的な行動においてモノに触るということが情報の取得において重要であると考えたためである．人間はモノに触ることでモノの形状・質感・硬度といったさまざまな情報を得ることができ，触れるだけでその情報を直感的に捉えることができ．この直感的に捉えられるということが次の行動への誘発を円滑に行えると考えたためである．

これらのことから、情報をユーザーに提示する際に情報は触覚で身体的に知覚できる形式にするべきだと考察し、このような情報の変換を本研究では、情報の身体化と位置付けた。

次項では、3つのシナリオにひも付けて具体的にどのようにセンサから得られる数値データを情報に変換し、その情報をどのような手法を用いて身体化しユーザーに提示するのかの考察を行う。

### 3.4. 情報の身体化と行動の誘導

ユーザーに触覚を提示する手法として、振動・圧力・電気刺激といった様々な方法が存在している。本研究ではその中でも、振動を利用した触覚提示を行うこととする。理由としては、関連研究でも挙げられている通り、振動触覚を利用することで人間に対して行動の誘導や理解力の向上といった効果が期待できると考えたためである。また、圧力・電気刺激による触覚提示においては、ユーザーに痛みを発生させてしまう可能性があるということも理由の一つである。

次に、どのように振動を提示することでユーザーを次の行動を誘発することが可能になるかを考察した。振動による代表的な情報の通知の例として、スマートフォンや携帯電話が挙げられる。メールや電話などがあった場合パターンによってその情報を通知し、そのパターンをユーザーが記憶することで電話なのかメールなのかを理解することができる。しかし方法では、パターンを覚える必要があるため、直感的に行動に移すことができないと考える。またスマートフォンがユーザーに提示する情報の種類は膨大なものであり、振動だけでどのような情報であるのかを判断することが困難であることも問題である。多くのスマートフォンユーザーは振動で情報は得ようとせず、スマートフォンで確認するためのトリガーとして利用している。そこで、ユーザー情報の内容を直接的に理解させるために人間の行動に結びつける方法を提案する。例として、キッチンで水道をつかう際に蛇口を上げるタイミングで情報を提示した場合、ユーザーの思考を水道に関連する情報を想像しやすくなる。このように想像できる情報を限定することで、ユーザーに情報の理解を促し、次の行動を円滑に行うことができると考える。

これらを踏まえた振動触覚による情報提示の例として、3.3でも挙げた3つの例に照らしあわせて示す。

### 家電における例

例として牛乳を温める場合を想定し、図3.2に示す。牛乳の温度上昇をリアルタイムに測定し、温度が上昇しているという触覚情報に変換する。その情報が電子レンジに触れている手から伝わってくることで触覚が腕を上昇してくる。もしくは、振動の強さが大きくなる。この時ユーザーは、触覚の上昇や振動の強さに合わせて内部の温度を直感的に判断することで自分の任意のタイミングで牛乳を取り出す。これにより、電子レンジの温めの強さ、温め時間に縛られることなくモノを取り出すという行動を誘発する。



図 3.2: 電子レンジで得られた情報による行動の誘導

## 外出時の例

外出時にユーザーがドアを開ける際に、屋外に置かれているセンサや天気予報サービスが公開している WebAPI 等から、現在の温度や降雨量の数値データ・今日の天気予報の情報をリアルタイムで取得し、コートや傘が必要かという情報を屋外の様子がわからないユーザーに提示する。例として図 3.3 のように、ユーザーがドアノブを触れたと同時にユーザー自身に屋外が温かいか冷たいのかを振動の質感で、傘が必要かどうかを振動の強さで提示することでユーザーの屋外の様子を気づかせる。もしくは、ドア付近に有る傘自体に振動を提示することで直感的に傘の必要があると気づかせる。

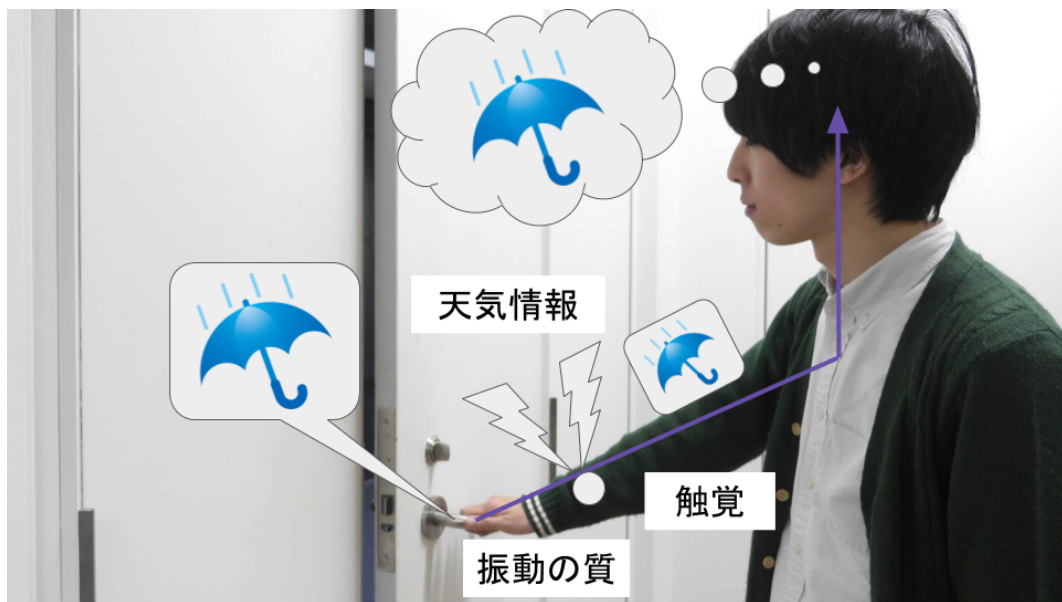


図 3.3: 外出時における屋外の情報の提示による行動の誘導

## 日常生活における消費財での例

クレジットカードを使用する際、蓄積されている使用金額のデータから使用量を振動として提示する。金額の大小を振動の強さとしてユーザーに提示することで直感的に使い過ぎかどうかを判断することができる。また、ユーザーが、事前に

金額を使い過ぎかどうかのしきい値を設定することや前月・前前月との比較，もしくはこれまでの金額の平均から使い過ぎかどうかを自動でコンピュータ側で判断し，使い過ぎであった場合にのみ振動を提示するだけでもユーザーに十分判断させることができると考える．生活インフラを使用する際も同様に，図 3.4 のように水道の蛇口を上げた際に同様の手法で触覚として情報を提示することで意識付けをさせることが可能である．



図 3.4: 生活インフラの使用状況の提示における行動の誘導

これらの例のように触覚を用いることで情報自体の意味を直感的に理解することが可能になり，ユーザーが次に行うべき行動の誘発をすることができると考えた．

### 3.4.1 提示する触覚の考察と提案

触覚を用いた情報を理解させるために，どのような触覚をユーザーに提示することが効果的かの考察とその提示手法を提案する．

まず，触覚の提示手法としては，ユーザーに振動を発生させるデバイスを装着し振動の強さや提示する場所によってユーザーに提示する手法を提案する．振動



の強さと移動による情報提示の手法は関連研究として取り上げた Tactile Brush [2] にも示されている通り、情報を理解させる方法としては適していると考えられる。振動を発生させる手法としては、スマートフォンで用いられているような振動モーターは提示できる振動が単一的であることと振動の発生や変化に時間を要することから使用しないこととした。本研究では、関連研究として挙げた TECHTILE toolkit [9] 等で用いられている音声信号を振動に変換する手法を用いる。これにより、触覚の様々な振動の質と応答時間の高速化を図ることができると考察した。触覚として提示する情報に関しては、温度が高いことを触覚として表す場合には、振動の強さを強くするといった情報を振動の対応付けを行う。これは触覚において刺激の特性と反応の特性が一致した場合、不一致の時と比べて反応が早く正確になる刺激-反応適合性があるためである。

### 3.5. 情報の身体化の体験設計

ここでは、情報を触覚として身体化するためのプロセスと体験のための設計を触覚と情報に分けて考察・提案をする。触覚に関しては時空間での認識、情報ではデータと情報と触覚について OSI 参照モデルを用いて考察する。

#### 3.5.1 触覚の設計

触覚は、四肢の受容器から皮膚触覚情報と自己受容感覚の二つを用いて知覚することがわかっている [20]。皮膚触覚情報とは触覚による皮膚上での直接的な情報である。自己受容感覚とは、身体の内部である骨や筋肉による四肢の位置や運動を把握するために用いられているものである。触覚に知覚に関しては、2種類の知覚方法があり、皮膚感覚から直接的に知覚するか、皮膚感覚による情報と自己受容感覚を用いた知覚の方法がある。前者の場合においては直感的でより早い判断が可能であり皮膚上での「手の平から指先への移動」といった移動感の把握をすることができる。後者においては触覚に加えてさらに姿勢情報を加えることで「右」「左」のような空間的な位置把握を行うこともできる [12]。本研究の目的として、情報自体の認知を行うため自己受容感覚による情報の知覚は行わなくて

も良いと考える。次に属性の知覚である。ここにおける属性とは、触覚の種類(振動, 温度等)や質(周波数, 粗さ等)における理解において重要な要素である。今回利用する属性としては、音声信号を利用した振動触覚を提示する為、周波数のみとする。

本来であればこの時空間的な知覚と属性の知覚を用いることで触覚による情報を理解することができると言われている。しかし、ここにおける情報とはものがモノに本来備わっている硬さ, 粗さ, 温度などの表面上のみの情報である。本研究ではこの外側の情報ではなく、もともとは数値的なデータである内部的な情報をあつかうため、もうひとつの知覚要素として人間の先入観を用いることを提案する。水道からは水が出る・電子レンジは温める・冷蔵庫は冷やすといった我々の日常生活の先入観を利用することで、水道から得られる触覚は水に関係している情報に違いないという思い込みを誘発させることで、触覚と情報を結びつけやすくする狙いがある。

時空間・属性・先入観をもとに触覚をいつ, どこで, どのような提示をするのかの手法を述べる。

### 身体化のプロセス

身体化のプロセスをキッチンで電子レンジから情報が提示される場面を例として示す。

いつ触覚を提示するのかということに関しては、情報の発信源をユーザーに認知させるためにモノに触れているときのみとする。これによってユーザーにどのモノと通信をするのかということを理解させる。この場合、電子レンジを開けようと、手でドアに触れたと同時に触覚を提示する。

どこでということに関しては、ここではキッチンでということになる。この「キッチンで電子レンジに触れた」という状況を作り出すことによってユーザーの先入観を煽り、電子レンジに関係のある情報を連想させる。

どのような点に関しては、どのようなデータを情報に変換するか・どのような触覚を提示するのかについて示す。本研究では、温度などの情報としてユーザーが直接的にそのデータ単体で判断することが可能な数値データを変換するこ

ととする．このような直接的に変換できるデータであればそのままの温度情報をリアルタイムで更新し，温度データを振動の強弱や移動にマッピングして使用するものとし，刺激-反応適合性を考慮するものとする．具体的には温度 0-100 度を振動の強さとして音声のデータの出力の強さ 0-10dB にマッピングするといった方式を取るものとする．移動によっても同様であり，移動に関しては関連研究にも挙げた Tactile Brush [2] で用いられている方法を取る．また，同様に音声信号による触覚の移動については，同じく関連研究で説明した，Po2:Augmented Haptic for Interaction Gameplay [3] と Stereohaptics:A Haptic Interaction Toolkit for Tangible Virtual Experiences [3] を参考にした．これによって仮現運動とファントムセンセーションを用いて 2 つの振動子間に移動する振動触覚を提示する手法を用いる．この手法を用いて，振動を腕に 10cm 移動させるものとして 0-10cm にマッピングするものとする．センサデータの更新頻度に関しては通信のスピードとシステムの処理速度を考慮して最速でも 10ms とし，基本的な更新頻度としてはモノの変化のスピード・人間に知覚スピードから考えて 100ms 程度が打倒であると考える．

また，数値的なデータだけではなく，天気予報などの晴れ・雨・曇といったテキスト情報も触覚に変換する手法を考察する．その手法としては，晴れ・雨・曇をイメージできるような質のある振動を利用する方法である．例えば，晴れならば乾いたモノを触っている触覚・雨であれば手に水が流れる触覚・曇りであれば湿り気のあるものを触っている触覚を提示するといったことである．この方式は仲谷らの音声信号を用いた触覚についての基礎研究 [19] でも明らかな通り，触覚はモノ・イメージ・身体によって構成されていることから考察したものである．

そもそも振動触覚とは，主に 500Hz 以下の低周波の振動を感知することで知覚している．例えば水道で手を洗う場合に置いても触覚としては，圧覚と 500Hz 以下の振動によって知覚している．そこで，本研究では触覚提示に用いる音声信号を情報を提供するモノを連想させる音をサンプリングし，その音声データを 500Hz でローパスし使用することでユーザーに情報の認知度を向上させることが可能になるのではないかと考察した．例としては，蛇口に流れている音をマイクロフォンでサンプリングし，その部分から振動成分である 500Hz 以下の音声を取り出すこ

とで振動触覚とした。これにより水についての情報であることをユーザーに認識させることが可能になると考えた。また、この振動を数値データによる情報を提示する際にも用いることでユーザーの情報認知を向上させることができると考える。電子レンジの温度を提示する場合、あたたえているものから連想されるパチパチという音や電子レンジの駆動音などが良いのではないかと考える。しかし、この振動のイメージと振動の認知に対しては十分な研究がなされておらず、どのような音声認知に適しているかという最適解は現時点ではわかっていない。そのため、本研究における位置づけとしては理解を補助できる可能性がある程度であり、にわか雨・雨・大雨のような細かい変化の提示には用いないこととし、ユーザーがはっきり理解できるような、大まかな違いが理解できるような音声データを使用することとする。

これらによってユーザーはリアルタイムなモノの情報の変化を知覚することが可能になるため、「キッチンで電子レンジからパチパチとした変化する情報が提示された」という状況から判断を行うことになる。その結果としてユーザーは図 3.5 からみてわかるような「温度」という情報が提示されているということと判断し、同時に振動の強弱・移動感によって温度が上昇しているということから自分にとって適切なタイミングで電子レンジのドアを提示することが可能になる。

### 3.5.2 情報の設計

データ・情報・触覚の変換プロセスについて、ネットワーク上をどのように通信が行われていくのかを OSI 参照モデルに照らし合わせて示す。本研究で用いているセンサや触覚提示デバイスはアプリケーション層の上にある情報端末と位置づけ、ネットワーク上を流れる形式としては、数値データ・情報・触覚の三種類である。また、セッション層以下はバイナリデータが通信されているものとするためここでは説明を省く。

まず、主要な 5-7 層の説明をする。セッション層では通信の開始と終了の提供をしている。そのため、ここまでで送られてくる情報自体にはいみを持たず、バイナリデータで通信が行われている。次のプレゼンテーション層でデータの表現方法を定義し変換することで、データに意味をもたせ、情報への変換を行って

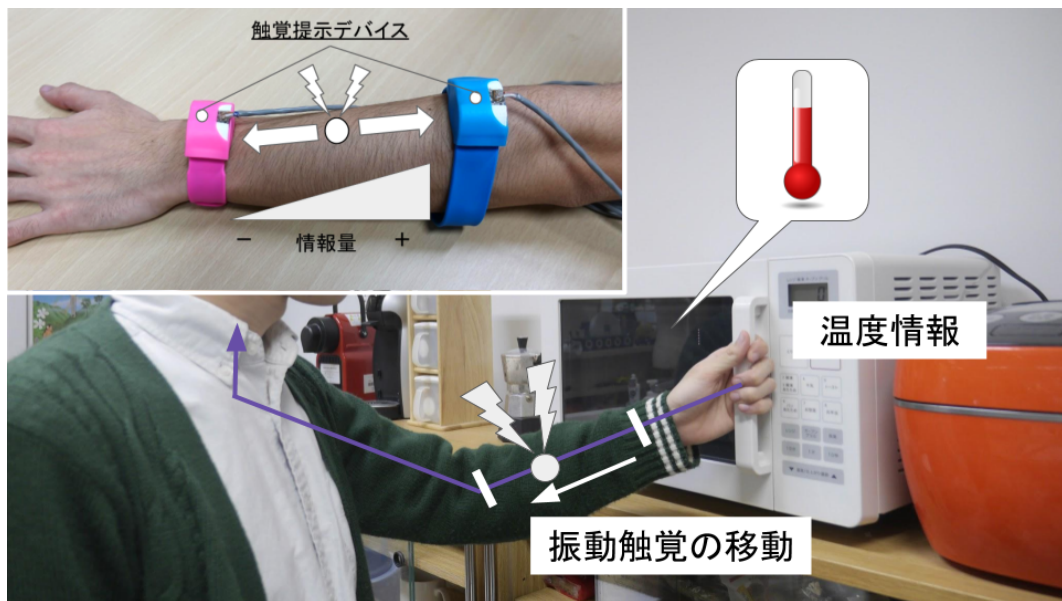


図 3.5: 電子レンジによる身体化のプロセス

る。アプリケーション層での主な役割は具体的な通信サービスを提供することであり、ここで触覚データとしてデバイスに提供すると言った流れになっている。

次に、本研究での各層における働きとデータの流れを示す。先程も述べた通り、すべての情報端末との接続においてセッション層までの働きは同様であるため割愛する。考える接続のモデルとしては、センサ-データベースサーバー間とデータベースサーバー-触覚提示デバイス間の2種類の通信が想定され、それぞれにおいて双方向の通信を行うものとする。センサ-データベースサーバー間、データベースサーバー-触覚デバイス間における通信の流れと各層の働きを示す。

#### センサ-データベースサーバー間

センサからデータベースサーバーに向かう通信としては、センサデータで取得されたセンサデータはすべてそのままの形でデータベースに送信するものとする。データベースサーバーが数値データを受信する際にプレゼンテーション層で数値データの情報化を行う。電子レンジの例においては数値データ自体が温度としての意味を持つため変換の必要はとくにはない。またテキストデータに関して

は、テキストデータとしてデータベースに保持する方法と、「晴れ」ならば「1」、  
「くもり」なら「2」のように数値データとの対応表を作成する方法が挙げられる。  
本研究ではデータの作りやすさから「晴れ」などのテキストデータとして扱った。  
また、このときのデータの形式としては本研究ではJSON形式を利用した。これは  
すべてのIoT機器においてデータ形式を統一するべきだと考えたためである。  
要素としては数値的データの情報の種類に寄って変化するが、例としては{温度、  
湿度、加速度、傾き、使用料、重さ}といった要素も持っている状態のままデータ  
ベースにCSVやSQLによって保存する方法を提案する。この場合、電子レンジ  
においては{50, 40, null, null, null, null}と行った形式となり、データとして  
存在していない場合はnullとなる。このように要素のまま存在していないデータに  
関しても保存することで、すべてのIoT機器で使用できるような汎用性を高めると  
共に、導入のしやすさを担保できるのではないかと考えた。JSON形式におい  
ては、数値データとテキストの両方を文字列として扱うため、どちらでもシステ  
ム上の欠陥に繋がることはないと考える。また、センサデータの更新頻度として  
は、2種類の方式を提案する。1つめは、定期更新によるデータの保存である。こ  
の場合におけるデータの保存は1分に1度もしくは10分に1度といった更新頻  
度でセンサから得られるデータを保存するものとする。この手法を持ちいるセン  
サとしては、空間内の温湿度センサや現在の天気の様子などの比較的長時間をか  
けて変化するものに対してこの方法を使用するものとする。2つめは、リアルタ  
イム取得である。短期間で変化するデータに関してはこの手法を用いるものとし、  
ユーザーが情報取得を開始した瞬感から終了するまでの間に計測と保存を行うも  
のである。リアルタイム方式を採用するセンサに関しては定期更新によるデータ  
の保存はしないものとし、あくまでもユーザーが取得したい時に取得しただけ  
のデータを取得するものとする。

また、データベースサーバーからセンサに向かう通信としては、何かしらの情  
報やデータを送信するといったことは行わないものとする。これは、センサに対し  
て余計な処理をさせないということがあるためである。ただし、センサになにか  
しらの問題が発生し通信の切断やセンサの停止が発生した場合の検知として、1  
時間に1度程度の応答確認のためのパケットの送受信を行うことを勧める。

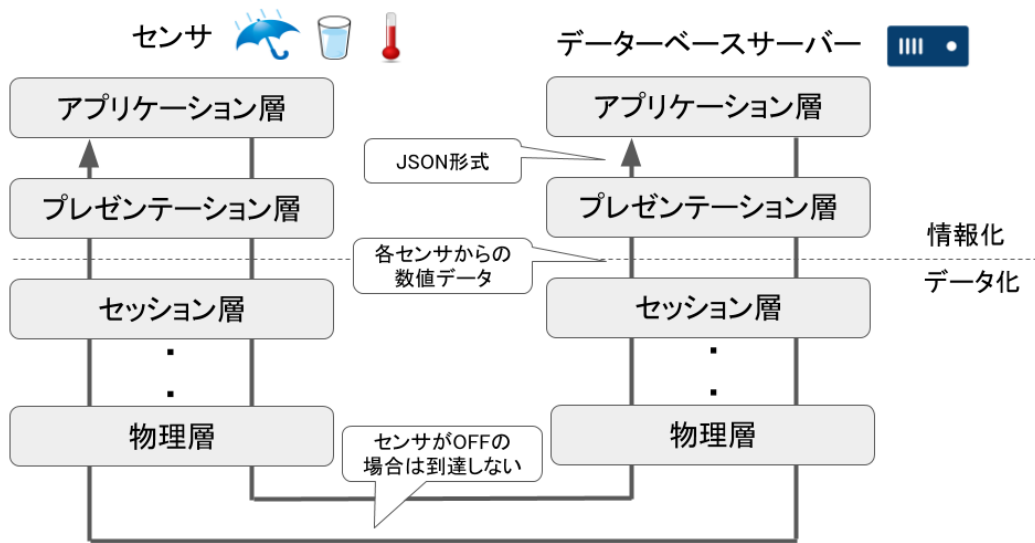


図 3.6: センサ-データベースサーバーでの通信

### データベースサーバー-触覚提示デバイス間

データベースサーバー-触覚提示デバイス間においては、データベースサーバーからはJSON形式のデータごと送信し、そのデータを触覚提示デバイスのプレゼンテーション層まで送信する。次のアプリケーション層においては触覚情報へ変換するために、JSON形式のデータから要求し情報のかね合わせて振動の種類と大きさを指定して振動を再生する。この一連の流れによって振動触覚の再生を実現する。

まず、触覚提示デバイスからデータベースサーバーに向かう通信としては、情報がほしいのIoT機器に対してどの機器に触れたかどうかの判別を行うものである。どのものに触れているのかの判別を行う方法としては、IoT機器に対して接触を完治するセンサを取り付ける方法を提案する。例としてはRFIDのようなモノをIoT機器に導入どのモノに触れたのかという判別を行うものとする。この判別については、一度触覚提示デバイスに送信した後にデータベースサーバーに送る方法を提案する。理由としてはデータベースサーバーに負荷をかけないということとデータベースサーバーにおける不要なデータの流入をさせるためである。

次に、データベースサーバーから触覚提示デバイスへ向かう通信については接触判定に対する JSON 形式のデータの返信である。データベースサーバーから送信された JSON 形式のデータは触覚提示デバイスのプレゼンテーション層までそのままの軽視で通信が行われる。アプリケーション層ではこの JSON 形式のデータを提示する振動の種類と大きさを決定する身体化を行う。いいかえれば、情報に対応する音声データを選択し、JSON 形式の情報から音量の調整を行うということになる。例えば、JSON 形式のデータが電子レンジで {50, 40, null, null, null, null} であり、温度を触覚として出力する場合、電子レンジを意識付ける音声データを音量を 50% で再生するといった具合に情報の変換が行われるわけである。

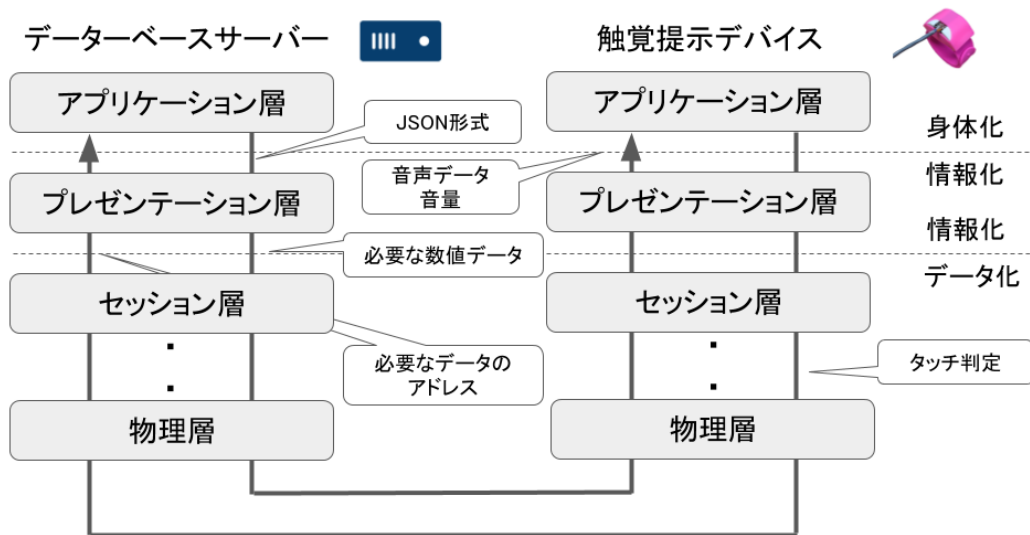


図 3.7: データベースサーバー-触覚提示デバイス間での通信

### 3.6. 身体化システム的设计

最後に情報の身体化を行うためにあるべきシステム的设计を示す。本項では屋内の生活空間における IoT デバイスによるネットワークの構成とユーザーが装着する触覚提示デバイスについて提案する。



### 3.6.1 提案するシステム全体の構成

今回提案するシステムの構成は生活空間の家具や家電の多くがインターネットに接続し、さまざまなセンサでデータを取得することが可能な IoT デバイスとして成り立っていることを前提とする。まず、すべての IoT 機器がローカルネットワークで接続されており、互いにさまざまなデータ通信を行うこととインターネットで公開されているようなデータや情報を取得することが可能であるべきであり、これにより機器に縛られることのないデータ収集が可能になると考えるためである。次に、ユーザーが IoT 機器に対してどのような行動を行っているのかを判断することも可能であるべきである。例えば、タッチセンサやモーションキャプチャツールを用いることでユーザーの行動に合わせた情報の提示を行うことが可能になる。これらの機器の持つセンサから収集されたデータを保存するためにローカルにデータベースサーバーを配置する必要があると考える。現在の IoT 機器の多くはデータベースサーバーをそれぞれの機器ごとに生産している企業のサーバーや VPS にデータを送信して管理・解析を行っている。そのため、センサデータの拡張性や応答性にかけているとことが多く、データを一括管理することで解決できると考える。データの管理は SQL や CSV 形式で保存するのが一般的であるが、殆どが数値データであることと応答の高速化が必要であることから MQTT のようなメッセージサーバーを用いることも有効であると考え。

### 3.6.2 IoT 機器とネットワーク構成

これらの IoT 機器とデータベースサーバー・ユーザーによるネットワーク構成とデータの流れを示す。ネットワークの構成としては現在の家庭におけるネットワークの性能で十分であると考えられ、IoT 機器から送受信されるデータは数値のみの比較的軽量のデータであるためルーターの性能に関しては実測値で 10Mbps 程度で十分である。データの送受信に関しては今回提案するシステムがユーザーの支援を行うものであり、最悪情報が正しく伝わらない場合に置いても重大な問題にはつながらないと考え、UDP を用いることを提案する。また、情報が提示されない場合に置いても再度モノに触れることで再送制御を行えるため問題ではな

いと考える．次に送信するデータの形式についてはJSON形式で送信することを提案する．JSON形式はカッコとカンマで情報を区切り送信する方式であるが，すべてのIoT機器で共通のフォーマットを作成し使用することで情報の取得を簡潔に行うことが可能になる．また存在しないデータに関してはnullが格納されることでデータの有無を確認することも可能である．



図 3.8: IoT 機器とネットワーク構成

### 3.6.3 触覚提示デバイス

触覚を提示するデバイスとしては，3.4.1でも述べたように音声信号を用いた触覚の提示を行う．触覚振動デバイスは手で触れるという行動に合わせて情報を提示することから利き手に装着し，情報が触れているものから伝わってくる感覚を想像させるために手首から肘にかけて装着すること提案する．また，振動デバイス自体を腕に装着することやユーザーの生活にできるだけ干渉しないことを考慮し，腕時計やリストバンドの形，もしくはシールのような貼るタイプが有効であると考えられる．提示手法としては振動デバイス自体振動すること想定するため，

十分な振動が取れる中でなるべく小型にすることが求められる。また本デバイスにおいて、最も重要なことはデバイスのウェアラブル化である。本デバイスを用いたことによってユーザーの生活が制限されることではデバイスとしての有用性が失われてしまうと考えられる。そのためデータの送受信・振動の提示をウェアラブルで Wireless なものであるべきだと考えられる。そのため、駆動時間に置いてもスマートフォン等と同様に最低でも5時間以上の廉造く稼働が必要であると考えられる。

### 3.7. 本章のまとめ

本章では、現在用いられている IoT 機器やサービスの情報を人間が直感的に理解することで次の行動を誘発することを可能にするのではないかと仮定し、生活空間における IoT 機器における情報の身体化という手法を提案した。そのために、現在 IoT 機器で用いられているデータや情報あり方を考察し、スマートフォンやアプリケーションに縛られることなく日常生活の行動の中で情報を取得することができる方法を考察した結果として、情報を触覚として提示する手法を提案した。触覚での情報の提示については、実生活における例として家電・外出時・生活インフラを挙げながら従来の情報の提示手法の問題点と触覚による情報の提示の有用性についてを考察し、情報の身体化の体験設計、触覚の提示手法・情報の通信手法と変換手法の提案を行った。

1 Qrio Smart Lock<https://qrio.me/store/smartlock/>

## 第4章

# プロトタイプの構築と検証

### 4.1. 情報の身体化システムのプロトタイプ

前章で提案した情報の身体化のシステムの実装を行った。現状，生活空間内やインターネットで取得できる数値データや情報には限りがあるため，本研究では数値データの変化や情報の変化を仮想的にデータベースサーバー内に実装し，このデータを元に情報の身体化を行うものとした。本研究でシステムの実装を行うために日本科学未来館の Cyber Living Lab を実験的に使用し，実際の日常空間を利用して前章で取り扱った電子レンジによる情報の身体化のシステムのプロトタイプを実装した。実装したシステムを以下に示す。

#### 4.1.1 IoT 化システムとデータベース

今回実装するシステムとしては，提案した情報の身体化に基づいて，電子レンジに触れることで内部の温度をリアルタイムに情報として提示することができることを目標とした。そのために，現在の電子レンジに通信機能とデータベースからの温度情報の取得が可能なシステムの実装を行った。

まず，電子レンジにユーザーが触れていることを判別するために，図 4.1 で示すタッチセンサの実装を行った。また，このタッチセンサには wifi モジュールが搭載されている Arduino 互換の Adafruit Feather M0 を用いた。これによりタッチセンサと電子レンジをタグ付けし，どの IoT 機器にユーザーが触れたの判別をすることができ，タッチしている判別をネットワークを介して無線で送信すること可能になる。また，タッチセンサは静電容量方式を利用しており，センサ部には銅板をもちいることで電荷の蓄積を安定させている。

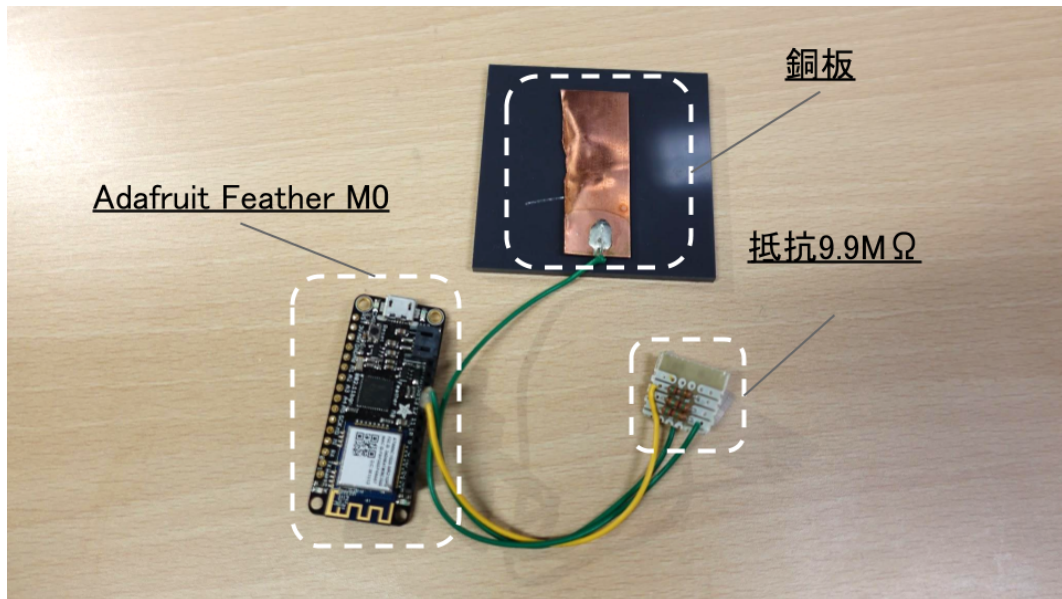


図 4.1: 実装したタッチセンサ

タッチセンサによる判別が行われると、データベースサーバーへの情報の照会と取得を行う。データベースサーバに関してはプロトタイプとして情報の流れとルーティングを簡潔に行うために Unity を用いてメッセージサーバーライクなものを構築した (図 4.2)。また、データベースサーバーには本来、各センサからの数値的なデータが格納されている。今回の実装では実際に電子レンジの内部の温度の測定を行うのは困難で有るため、温度の上昇の数値データを仮想的に作成し CSV 形式で保持した。センサからのデータの取得スピードを 100ms 毎に設定し 1 秒間で 10 個の数値データで 2 分間分の 1200 個の温度データを格納した。温度データの上昇率は、10 度から 100 度まで変化するものとし 1 秒に 1 度上昇するように通信を行っている。データベースサーバーにおける通信はタッチセンサで触れている間のみ行うことが可能になっている。

これらのセンサとデータベース・触覚提示デバイス間での通信を可能にするために図 4.3 のようにネットワークを構築した。今回の実験ではローカルネットワークで構築しており、各機器の判別を行うために IP アドレスを割り振った。通信に関しては前章で用いた OSI 参照モデルに則った形で構築しており、データの衝突

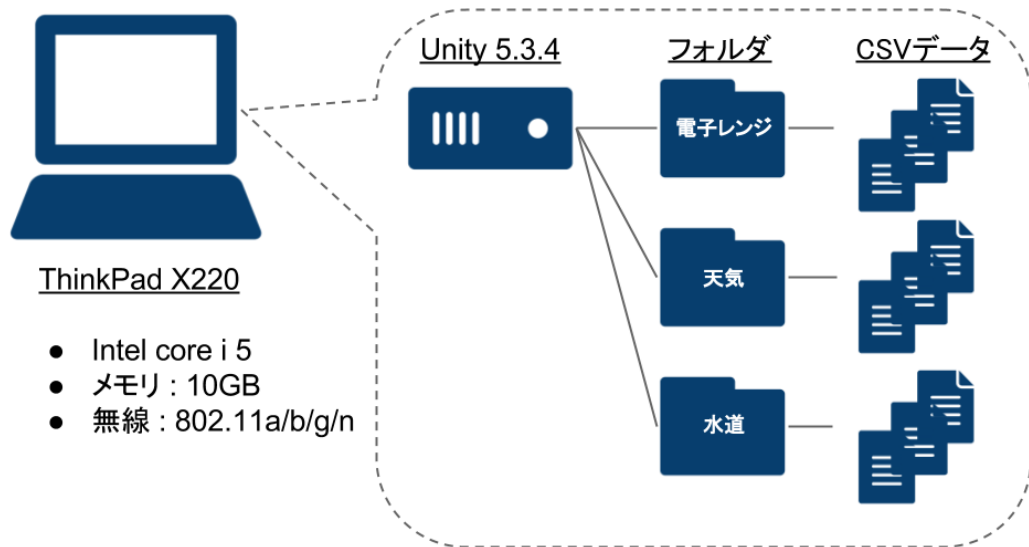


図 4.2: 実装したデータベースサーバー

やパケットロス・通信の負荷を軽減するためにセンサと触覚提示デバイスで使用するポートを分離した。また、本研究でネットワークを構築するために家庭でも一般的に用いられている性能のホームルータを使用した。これにより、有線で接続されている部分を排除することで、ユーザーが生活空間ないを自由に行動できるという円滑性を損なわない環境構築を実現した。

#### 4.1.2 触覚提示デバイス

本研究では、振動触覚を使用することでユーザーに情報端末からの情報を身体化することを実現するための触覚提示デバイスを作成した。振動提示デバイスは腕時計のようなバンド型をしており、ユーザーの利き腕に装着するものとした。データベースから送信されてくる情報を触覚に変換するために RaspberryPi3 を使用した。RaspberryPi3 には事前に作成した音声データが格納されており、情報に対応する音声データをオーディオアウトから出力し、触覚提示デバイスでアクチュエートすることで振動触覚の提示を実現している。詳しい構成を図 4.4 と次に示す。

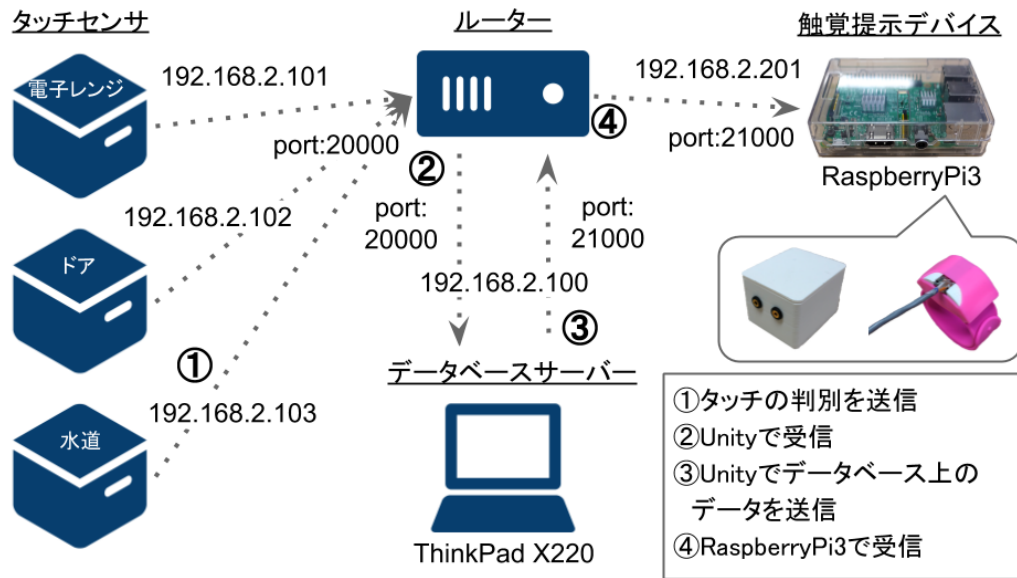


図 4.3: 実装したネットワーク構成

触覚提示デバイスは前章でも提案した通り，音声信号を振動に変換することで触覚提示を可能にしている．まず，音声信号を振動に変換するために ALPS の Forcereactor Hybrid Tough Type を用いた．これは，主にゲームのコントローラーに振動触覚を付加させるために使われている．仕組みとしてはスピーカーの振動板を振動させることで空気を震わせて音声が発生させている原理に類似しており，この振動を音声信号の可聴域の大部分をカットした 0～500Hz 程度の人間が感じることで振動加速度の周波数帯を振動に変化させている．本製品は，160Hz と 360Hz 辺りを振動として強く出す特性があり幅広い振動触覚を生成することが可能になっている．この振動子を腕に装着するために株式会社 Moff が販売している MoffBand のシリコンバンドを使用している．MoffBand は子供の知育デバイスとして販売されておりスマートフォンと連携することで，振動と音によって子供の感性を刺激するデバイスである．このシリコンバンドに振動子を設置できるようなアダプタを 3D プリンタで造形し装着した．次に，この触覚提示デバイスで振動を提示するためには既存の音声データでは音量が足りないことと振動には関係ない可聴域をカットする必要があることが問題になる．そのためにをロー

パスフィルタが導入されているオーディオアンプを利用した。このオーディオアンプは南澤らの TECHTILE toolkit [9] を参考にして作成している。本研究では、振動の強弱と振動の移動による触覚提示を行うためにこの触覚提示デバイスを 2 組作成した。振動の強弱による提示に関しては 1 つ、移動感については 2 つの触覚提示デバイスを用いることとした。振動の強弱に関しては raspberryPi3 のオーディオアウトにアンプと触覚提示デバイスを直接接続することで提示が可能であり、振動の移動に関しては raspberryPi3 のオーディオアウトにステレオ信号をそれぞれに L と R のモノラル信号として分岐できるような分配器としての役割をもつようになっているオーディオケーブルを接続した。これにより 2 つの触覚提示デバイスをそれぞれ制御することが可能になり振動の移動を提示することが可能になる。

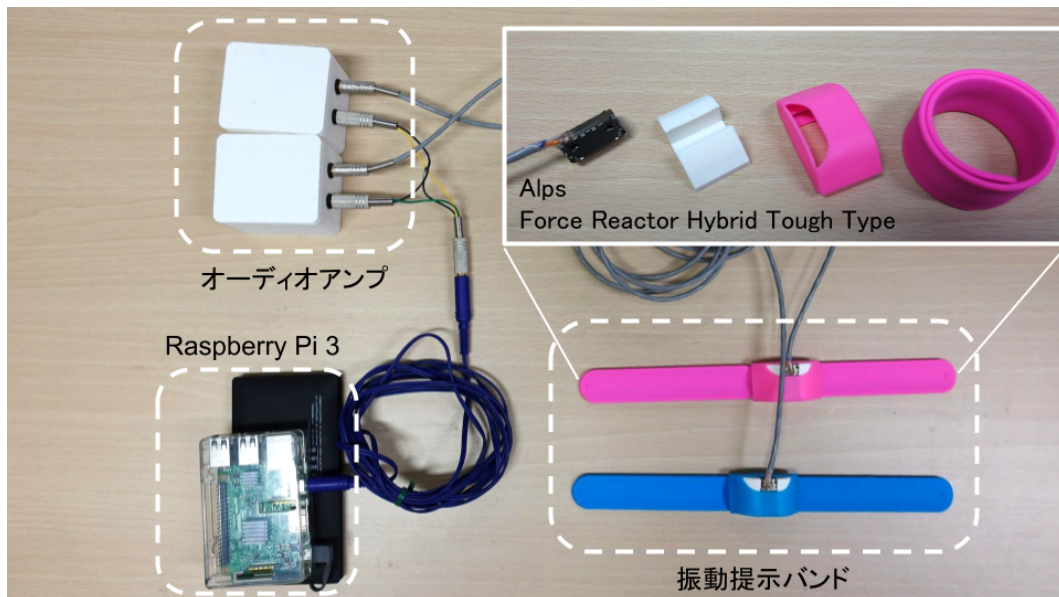


図 4.4: 実装した触覚提示デバイス

RaspberryPi3 には、標準の Raspbian for GUI を導入し、通信に関してはオンボードの無線機能を使用してネットワークに接続している。データベースから送信されてくる JSON 形式のデータを受信するとそのデータの送信先からどの IoT 機器にからの情報であるのかを判別し、触覚提示に使用する音声データを選択す



る。次に、JSON形式のデータを元に振動の強さを事前に設定したしきい値を元に割り出し、オーディオアウトから出力することで振動触覚の提示を行うことが可能になっている。

今回使用した音声データについては前章にもあるとおり、実際のIoT機器を連想させる音をサンプリングしたものを使用した。サンプリングの方法を例として4.5に示す。音声をサンプリングする方法としては一般的なパソコンに入っているボイスレコーダアプリを用いて録音をしている。録音の際に用いるマイクは振動として伝搬する500Hz以下の周波数をサンプリングするためモノに直接当てて使用するコンタクトマイクとマイクアンプを用いた。例として、水道の触覚としてはペットボトルにマイクを装着させて水の流れる音声をサンプリングし、電子レンジに関しては電子レンジ使用時の回転音をサンプリングした。

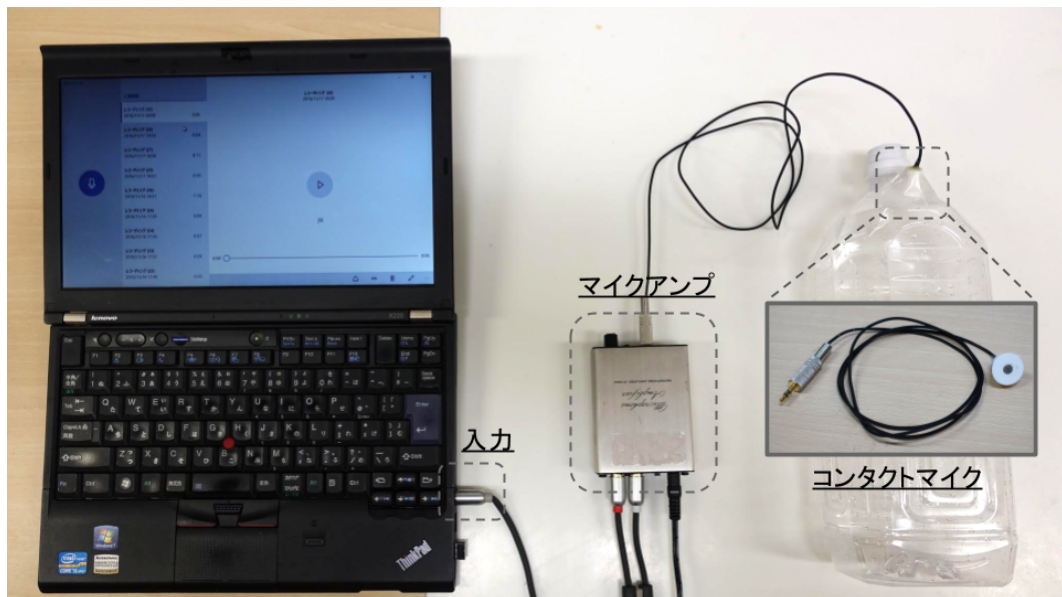


図 4.5: 触覚に用いる音声データの取得の例

## 4.2. 構築したシステムの性能

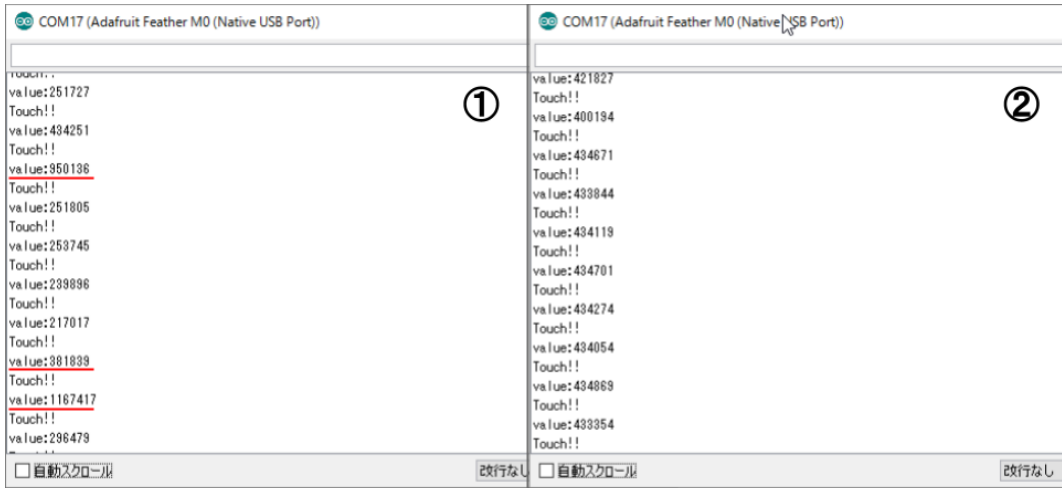
本研究での情報の身体化の提案を元に、今回実装したプロトタイプの性能評価を以下に示す。

### 4.2.1 タッチセンサ

本実験で使用したタッチセンサは静電容量の充電時間を測定して触れているか否かを判別するセンサである。センサ部には銅板を用いた。銅板を用いた理由としては金属板の中でも比較的是んだ付けなどの製作工程が容易であり大量生産に向いていることとアルミホイルを用いて行った実験では取得できるデータにばらつきが有る。図 4.6 で示すのはソフトウェアと充電時間のしきい値である抵抗を  $9.9M$  にした場合の、銅板を用いたデータとアルミホイルを用いた時のデータである。また、本タッチセンサ静電容量を使用するため接地していなければ充電が行われない仕組みになっている。そのため蛇口のような金属製のもの自体に直接タッチセンサの金属部を装着することは出来ない(図 4.7)。解決方法としては、ラバーマットのような絶縁体を間に挟むことが有効である。また、コイル等の電場が発生してしまう製品が周りに有る場合には人間が触れる前に充電が始まるため注意しなければならない、例えば図 4.8 のような実験環境では、ラップトップパソコンの充電を使用しているためタッチセンサは誤作動し続ける状態になる。

銅板を用いたタッチセンサの性能と評価を示す。本タッチセンサの正常な動作を示す動作率は約 90%ほどである、これは上記のようなイニシャルでの動作不良を含まないものである。主なで動作不良の原因としては、静電気除去パッドである。被験者が普段の生活のために持ち歩いているリストバンド型のものよキーホルダー型のものが装着されている場合、タッチセンサの充電時間が急激に長くなるため、タッチの判別ができないということがあった。

一方で、処理に使用している Adfruit Feather M0 with ATWINC1500 WiFi の処理速度は非常によく、クロック周波数も 48MHz で高速処理が可能である。wifi に関しては自動接続機能がないため、一度接続が切れてしまうと再接続しなければならないが安定動作を保っている。また 3.3v で起動し、3.7v・500mAh のリチウム



①アルミホイル ②銅板

図 4.6: アルミホイルと銅板によるデータの違い



図 4.7: AC アダプターとタッチセンサ



図 4.8: 金属部分へのタッチセンサの装着

イオン電池で約2時間連続起動が行うことができる。タッチの検出・データの送信の一連の動作は、銅板コンデンサの充電時間にも左右されるがユーザーが触れてから約200ms～300msの間で処理が完了するため、リアルタイム性もある程度担保されている。また、この観測はシリアル通信によりディスプレイ上にArduinoIDEを通して出力して観測しているため、実際のスタンドアローンでの処理時間はそれよりも100ms程度早いものであると考えられる。結果として使用しているマイコンに関しては今のもので十分であると評価できる。しかし、同一の性能で小型化が進んだ場合は変更する可能性は十分にある。

これらの評価から、タッチセンサ全体の評価としては十分に動作しているものであると考察する。理由としては約90%以上のタッチ検知率と処理速度が十分であると考えるためである。

#### 4.2.2 データベースサーバー

データベースサーバーの評価手法として、本研究ではタッチセンサからのデータの取得から触覚振動デバイスまでの送信までの処理速度と安定的な処理を行えるかの二点で考察する。

まず、今回のデータベースサーバーでは主にメッセージのやり取りのみを行っている比較的軽量のサーバーである。サーバーの作成にはデバッグのしやすさからUnityとC#をもちいて作成しており、データベースとしてはCSVファイルで保存している。Unityではタッチセンサ付き情報端末からパケットを受信し、パケット内容に沿ってどの情報端末から送信されてきたのかの識別子（IPアドレスの末尾8bit分）と任意のデータを梱包して触覚提示センサに送信する。最初の実験では情報端末からパケットを受信した後に任意のディレクトリの保存されているCSVファイルにアクセスし、任意の情報を取得していた。この時、ディレクトリのCSVファイルにデータを問い合わせる処理時間が約100～200msかかってしまう。そのためデータ送信までの処理速度が必然的に増加してしまい、リアルタイム性が確保できなくなってしまう恐れがある。そこで、ユーザビリティテストで使用した実験環境ではデータベースサーバー起動時にキャッシュとして保持しているデータすべてを配列として取得し続け、そのデータにアクセスすることで処

処理速度の高速化を図った，その結果として処理速度は約 50ms となりリアルタイム性を担保するには十分な結果になった．処理の安定性には並列に行うべき処理と取得するデータ量の総量が少ないため不安定な動作は見られなかった．処理速度に関してもばらつきもなく平均して 100-200ms ですべての処理が完了していた．しかし，現段階では水道・ガス・電気といったインフラの情報化が行われていないため擬似的で簡単なデータベースを作成した．スマートメーターが普及された場合，詳しいデータ構造を現在知ることはできないが，間違いなく大量のデータ量になることは間違いないと考えられる．例えば，1 時間に一度の取得なら 1 日に 24 個，10 分に一度のデータ取得の場合は 144 個のデータ量になる．これを 30 日分にした場合，720 個-4320 個のデータ量となり CSV データを取得する処理時間のオーダーが秒単位になってしまうことは確実である．また、すべてのデータを今回用いたような配列にキャッシュした場合はデータ量が多すぎ、マシンスペックが要求されることになりラップトップパソコンだけでは処理しきれない可能性が出てくる．

### 4.2.3 RaspberryPi3

RaspberryPi3 はの RAM:1GB 802.11n Wireless LAN を保有しているため，グラフィックや大量のデータ処理を行わない本研究では十分なメモリ量であり無線に関して最大通信速度 600Mbps の 802.11n を有しているため通信速度の面でも申し分ないものである．ここでは，データベースサーバーから送信されてくるパケットからタッチセンサ付き情報端末の種類を把握し，それに沿った音声データを再生するという処理を行っている．通信が行われていない場合でも待機状態として処理は常に動いており，この時の平均処理速度が 50ms 程度である．触覚を再生する処理を行い始めた場合は，任意の音声を再生しタッチセンサからの応答を待つ．タッチセンサからの応答がなくなった場合，被験者が触れていないと判断し，即座に音声を停止する処理を行う．また，タッチしている時間が音声データよりも長い場合はリピート再生を音声終了する 1 秒前に行うことで，あたかも連続している音声データであるように見せている．これは python のライブラリに搭載されている音声ストリームで行っているため，最初の音声データの再生を

行ったデータが残っているために可能な動作である。実験の結果、パケットを受信してから音声データの再生開始まで約 400ms 程度・終了までは 100ms 以下の処理時間がかかってしまうことがわかった。

これらからタッチセンサから触覚提示デバイスが再生し始めるまでに、タッチセンサ・データベースサーバー・触覚提示デバイスで 200ms・100ms・400ms の合計 700ms 程度の時間がかかることがわかる。この処理時間はインタラクション全体のリアルタイム性が担保されているかという点に関しては被験者 5 人の実験から、後述するルーター等のネットワークの影響により、触れてから平均的に 1000ms を超える処理時間かかった場合において動かないのではないかという意見や首をかしげると言った行動を起こすことが観測できたため、1000ms 以上の遅延はインタラクションのリアルタイム性を担保できていないことがわかった。そこで、全体的なインタラクションとして音声再生にかけられる時間は 600ms 以内ということであると考えられるため今回の 400ms という処理時間は十分に良い評価ができると考えられる。また、今音声の停止動作時には 100ms を切る時間で処理を行うため同じくリアルタイム性は確保出来ているものであると評価した。

また音声データ再生までの時間を短縮するために、最初から音声データをストリーミングしておくという手法がある。しかし、この手法では大量のメモリを使用するため適切な処理を行えない可能性があった。今回においてはストリーミングでの安定動作という点の評価が行えなかったため使用しないという判断をした。

これらの評価から、RaspberryPi3 で音声データの再生は適切であると評価した。ソフトウェアの実装次第では音声データを最初からストリーミングすることで音楽再生までの時間を大幅に短縮できるということがわかった。

#### 4.2.4 振動触覚

振動触覚については、振動の強弱と振動の移動を用いる方法を導入した。

振動の強弱については、1つの触覚提示デバイスを用いて触覚提示の際の音声データの音量を変化させることで可能にしている。

振動の移動については、参考文献でも取り上げた Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display [2] からモーターの振動触覚によるファントムセンサー

ションの発生を参考にした。しかし、ファントムセンセーションの発生に関しては、

- 振動デバイスの振動の強さを等しくした場合、振動デバイス間の中心にファントムセンセーションが発生する
- 振動デバイスの振動の強さを等しくした場合、振動の強さの強弱によって中心に発生したファントムセンセーションの強度も同様に変化する

という考察しかないため、腕への振動の移動の提示には改良が必要であると考えた。よって、本研究の触覚提示の評価にユーザビリティテストによる被験者の意見から腕へのファントムセンセーションの提示についての考察をおこなった。

### ファイ現象とファントムセンセーション

まず基本的な振動の移動の提示については、ファイ現象とファントムセンセーションがある。ファイ現象とは、静止している画像の連続表示によって仮想的な運動を知覚する現象である。これを仮現運動といい見かけ上の運動が行われている代表的な例である。振動触覚においてもファイ現象は有効であると言われており、単一振動の on/off によって振動が移動しているように感じるというものである。一方、ファントムセンセーションは、2つの振動を同時に発生させた場合、2つの振動の間に触覚振動が現れるという皮膚による触覚の錯覚のひとつである。ファイ運動では運動の移動感を発生させることができるが、2つの振動感の任意の場所で振動を停止させることはできないということがわかっている。

### ファントムセンセーションの発生

ユーザーの腕への振動の移動の提示が発生するかの実験と検証を行った。実験内容としては、2つの触覚提示デバイスを腕に装着し両デバイスから同じ音量 (RaspberryPi3 の音声設定値 b は 90 (-6.63dB)) で振動を発生させた。2つのアンプについても検流計をもちいて電圧上昇を 10.0V に調整した。被験者 5 人に対する実験の結果として、5 人においてファントムセンセーションが発生し、振動の移動を感じ取ることが可能であることがわかった。しかし、同じ強度に振動に対

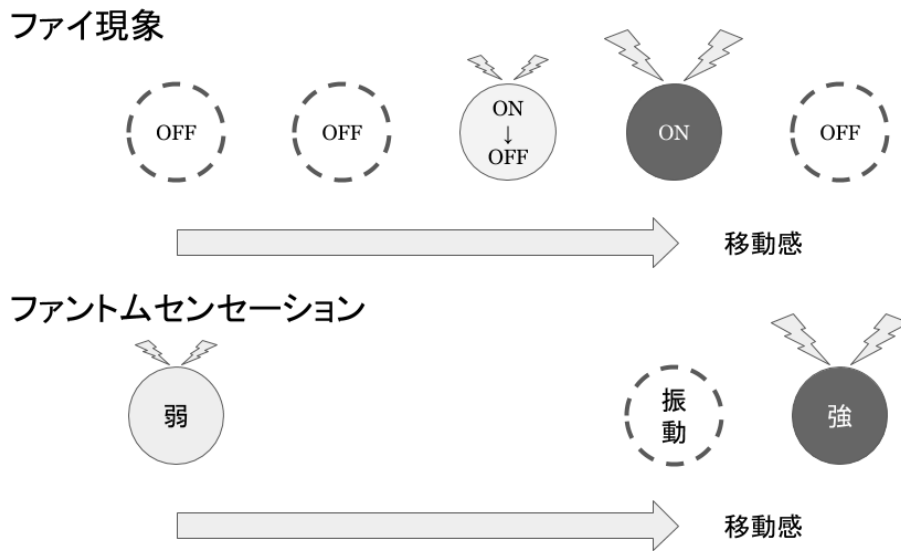


図 4.9: ファイ現象とファントムセンセーション

して被験者 5 人の感じている振動の強度が違い、「振動が弱い気がするといった」意見を得た。これにより、腕の太さと腕の長さについての検証を行った結果太さに関係なくデバイス間の距離に関係していることがわかった。結果としてはデバイス間の距離が伸びるほど同じ振動に対するファントムセンセーションが弱くなることがわかった。これらのことから実験においてデバイス間の距離を一定にすることを決め、また腕による振動の分解能は 4.5cm 以上であるため手首から肘までの 20cm とした。

#### ファントムセンセーションによる移動感

次に振動の移動が一定の振動の強さをと持ちつつ行うことが可能であるかどうか、また振動の位置を等間隔で制御することが可能かの考察を行った。まず、Ali Israr らの Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display [2] で述べられている通り、運動量の総量が一定になるように振動デバイスを調整する手法を検証した。本実験では音声信号を LR のステレオを分岐することで左右の振動の強弱を振動の強さで変化させることができ、運動量 = 音量とし位置づけること



にすることで音量調整でLRの振動の運動量を変化させることにした。音量の変化と運動量に関しては図4.22に示す。ここで示されている音量の0.8という数値は現在の音量の80%で出力すること表している。

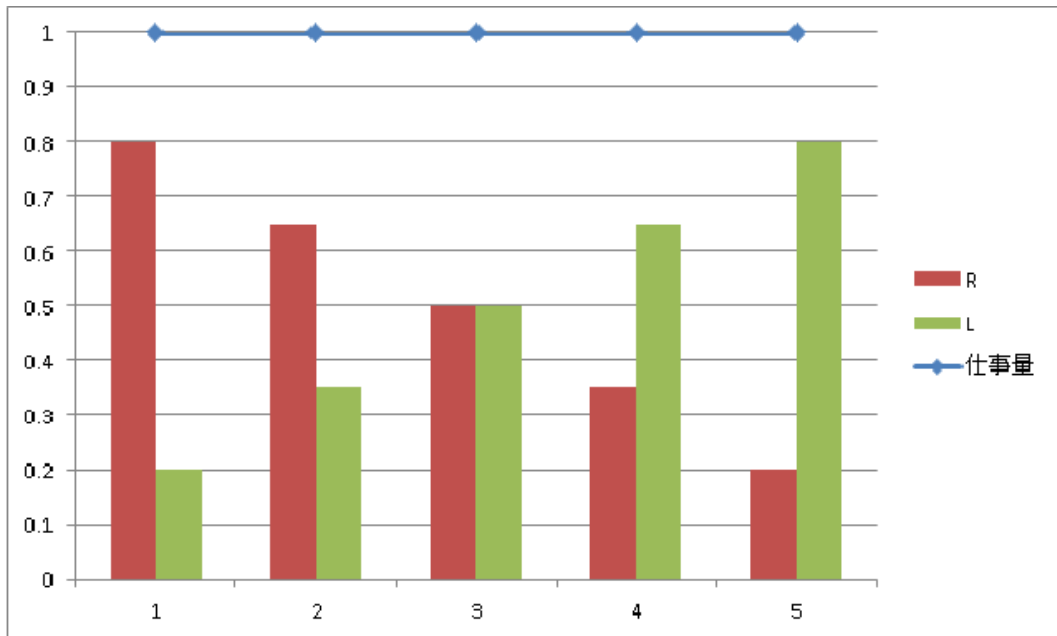


図 4.10: 音量の変化と運動量の相関

はじめに、図4.22に示されている5種類の音量のパターンを用いてそれぞれ腕のどこにファントムセンセーションを感じるかを検証した。ここでの1~5は振動触覚が現れるであろう位置と対応しており、図4.11に示す。この実験ではひとつの振動を3秒間提示し3秒間振動を停止するといったものをランダムですべてのパターンで行った。各パターン5回ずつ計25回提示した。実験における評価方法としては、被験者には振動を与え得ることを事前に伝え、振動を腕のどこで感じるかを明示してもらうことでファントムセンセーションが発生しているかを検証した。仮定としては、1~5の振動を等間隔に同じ強度で感じるはずであると考えた。

結果としては、「教えてもらいながら実験を行うとそこに振動がそこに有るようを感じる」「5段階の実験なので4cmずつの振動提示を感じるはずだけど、少し2と4は1と5の触覚に近い位置を感じる気がする」というものが得られた。この



図 4.11: ファントムセンセーションで発生する振動触覚の位置

ことから 20cm の距離においては Ali 氏の手法では等間隔で一定の強さで触覚を提示することができないことが確認できた。

次に、ファントムセンセーションを用いた移動感の提示についての実験を行った。これによって振動がどこで弱くなるのかを明らかにすることで振動の移動を可能にすることができると考えた。提示手法としては、音量の変化としては先ほどとは違い、更に細かく分け 1~7 の音量を提示するものとし、動的に音量を変化させることで移動の提示を行った。例として 1-2 の 10% の音量の変化を 5 段階で 4 秒間かけて (1 変化あたり 0.8 秒) 変化させることで移動感を提示することを試みた。この連続動作を 1~7 で行うことでデバイス間を等速で振動が移動するのではないかと仮定し、1~7 と 7~1 の上下の動きを 3 回ずつ交互に提示した。本実験では被験者に振動を与えるということと上下に振動が動くということを伝え、動いている時に感じたことに対して意見を求めた。結果として、「始まった時と終わるときは動いていた」「真ん中の触覚が感じられなかった」「最初から 5cm くらいまでうごいた後、ワープしたように最後の 5cm くらいのところに触覚が現れた」という意見が得られた。

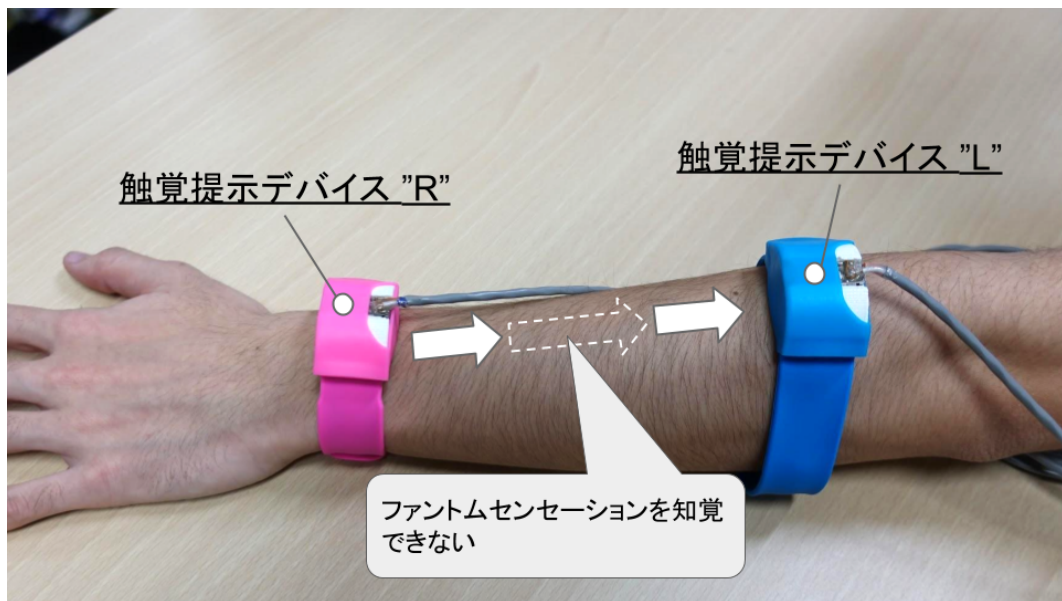


図 4.12: 振動触覚がワープするイメージ図

この2つの実験から上記の被験者5人の意見を元に現状の振動の仕事量の総和と振動する位置の関係性を考察し図4.13にまとめた。これを見てわかる通り真ん中の触覚を感じらないとした時に中央に下がったグラフになっていると仮定した。そこで仕事量の総和を考えた場合、足りていない部分の仕事量を補うことで、人間が知覚できるファントムセンセーションが仮定していたものに近づくのではないかと考えた。仮定を元に作成したグラフが図4.14である。この図形のように音量による仕事量の総和を比例するように増減させることで感じることでできる触感を一定にできると仮定した。

#### 実装したファントムセンセーション

仮定のように増減させた仕事量の総和を触感提示デバイスで分配し提示する方法を示す。今までは左右の触感提示デバイスに音量による仕事量の総和が一定になるように分配し、0.8秒毎に比例するように音量を変化させていた。今回仮定した手法としては、図4.14で示した通り1~4の間で0.6の上昇を行う。よって1-2の間では0.2の上昇であり、また、1-2の間では先に述べた通り5段階に分かれて

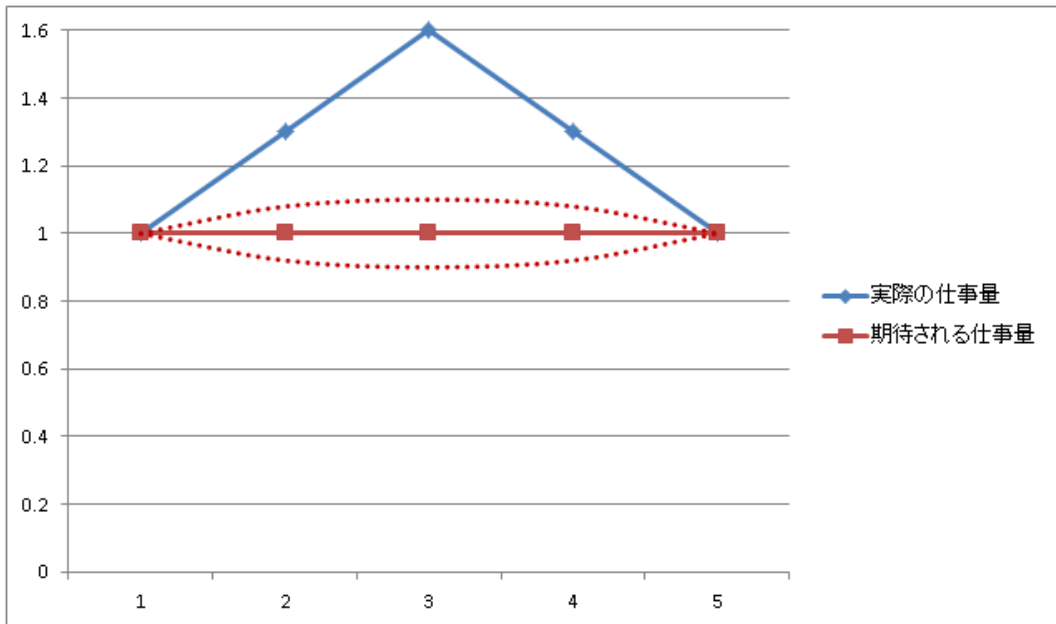


図 4.13: 実際の音量による仕事量と被験者の感じた触感の仕事量

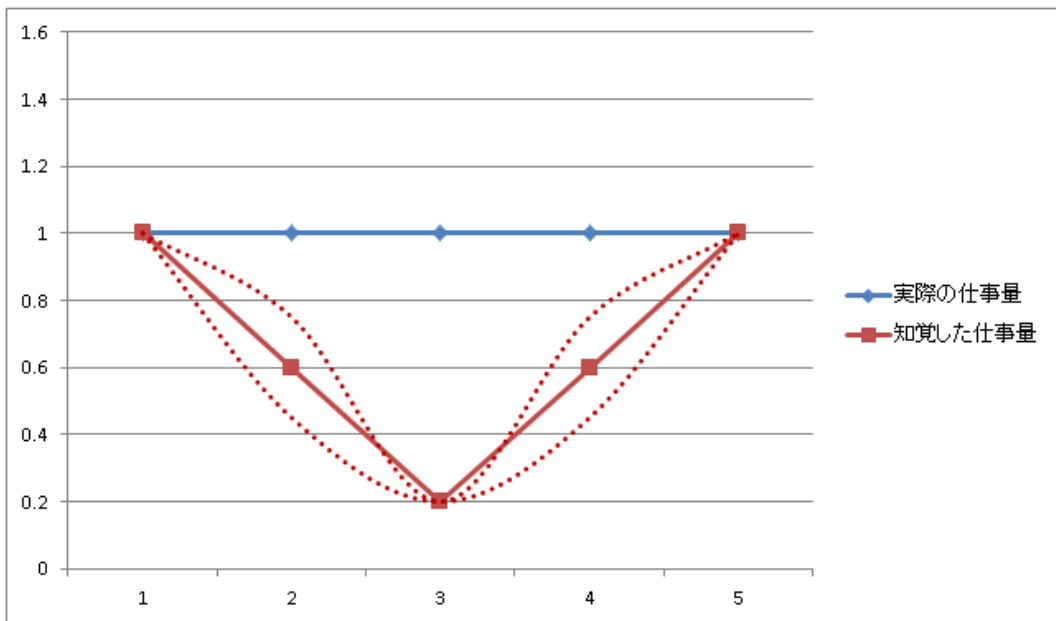


図 4.14: 新たに仮定した仕事量と想定される仕事量

いる為、1段階の辺りの仕事量の上昇は0.04となっておりこの1段階あたりの上昇を今度は左右のデバイスに分配する。この分配方法は $\{R, L\} = \{0.8, 0.2\}$ から $=\{0.78, 0.22\}$ の変化を例とした場合

- 0.78と0.22を対比を利用して0.04を分配する
- $0.04 * 0.78 = 0.0312$ と $0.22 * 0.22 = 0.0088$ という分配になる
- 分配はプログラムの関係上、少数点第3位を四捨五入した0.03と0.01を分配する
- 結果として $\{0.81, 0.23\}$ が算出される

この計算をすべての段階で実行した。その結果を図4.15に示す。ここまでで被験者から得られた知見を元に仮定した仕事量の変化を実装することが可能になった。これをもとに再びユーザビリティテストを行い仮定した仕事量の変化からファントムセンセーションによる触覚の移動が知覚できるかの評価を行った。ここでの実験フローは上記と同様であり、1~7と7~1の上下の動きを3回ずつ交互に提示した。

結果としては、被験者5人全員が触覚の上下への移動を知覚することが可能になった。意見としては「前回わからなかった中央の振動の動きがわかるようになった」「振動が等速で動いているのがわかる」というものが挙げられた。また、「移動速度を早くしたほうがわかりやすいかもしれない」という意見から1段階で0.8秒かけていた時間を0.2秒に短縮して再び実験を行った結果、速度を4倍にしてもファントムセンセーションによる移動を知覚することができた。これにより、ファントムセンセーションによる振動触覚の移動はさまざまな速度で制御できるということが得られ、さらに「移動が早いほうがわかりやすい」という意見が多く出たため情報を触覚として提示する際は触覚の移動速度を上げるべきであるという知見を得ることが可能になった。本研究においては、この新しく考察した振動触覚の変位を用いた手法を用いることとする。

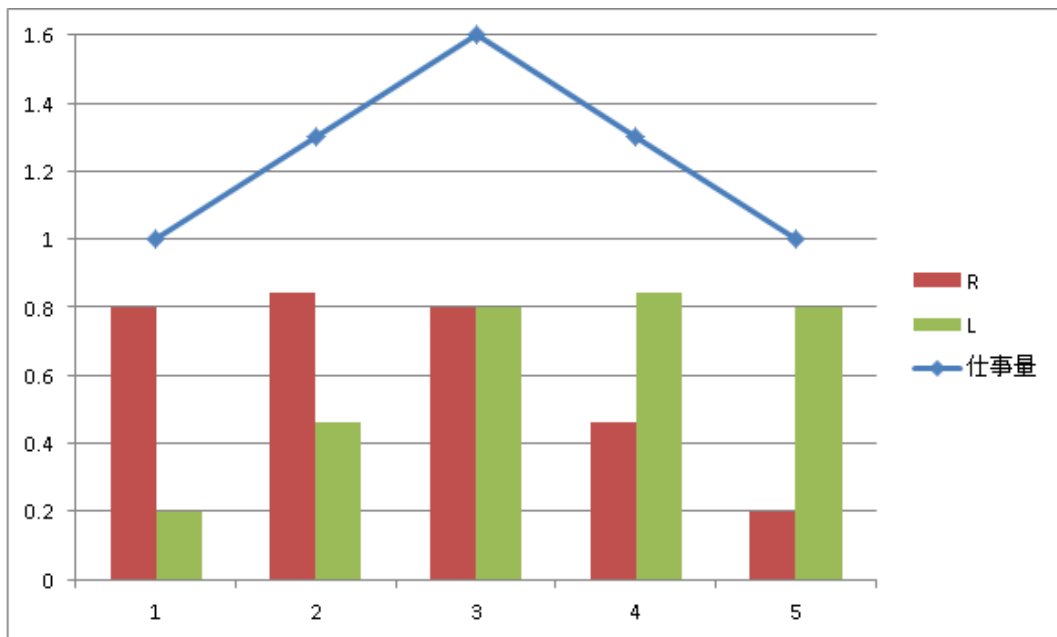


図 4.15: 新たに仮定した仕事量の総量と仕事量の分配

### 4.3. プロトタイプの考察と検証

以上のことから，本試作システムの現状をまとめる．タッチセンサ

- 銅板を用いることでタッチセンサの精度を向上させることができる
- 正常な動作を 90%程度で行えるためデバイスとしては有効である

データベースサーバー

- 現在のデータ量では十分は動作を行うことが可能である
- スマートメーターの普及などによって情報量が増えた場合はデータベースサーバーの構築を考える必要がある

RaspberryPi3

- ソフトウェア上，音声の再生まで 400ms ほどの遅延が発生してしまう

- 実験から触覚提示の全工程において1秒以内の遅延が許されるため、音声信号を出力するデバイスとしては十分な性能であると考えられる
- 消費電力が多いため、モバイルバッテリーでの運用に限りがある。

#### 振動触覚

- 振動の強弱と振動の移動による触覚提示デバイスを制作した。
- 振動の移動に関して、ユーザーの腕に提示することを可能にするためにユーザビリティテストを行うことで考察・実装し、移動感の提示を可能にした。

また、実装したプロトタイプにおける人間の行動の誘発や情報の理解についての検証を行った。本研究で構築したシステムは、日本科学未来館の Cyber Living Lab のキッチンスペースを実際の生活空間に見立てて導入した。触覚提示デバイスに関しては、実装した振動触覚の強弱による情報の提示と振動触覚の移動についての情報の認識の違いをユーザビリティテストを行うことで考察した。また、本システムは電子レンジを用いたモノの温度変化を例にして構築を行い、構築したシステムによって行動の誘導が可能かどうかのユーザビリティテストを行うことで本研究の検証とした。

#### 4.3.1 振動の提示手法の評価と考察

振動触覚による情報の理解について振動の強弱と振動の移動によるユーザビリティテストを行った結果を示す。本実験を行った目的としては電子レンジを用いた温度変化における情報の認識とユーザーの次の行動の誘発という点において、ユーザーがある程度正しく情報を判断し、また、情報判断までかかる時間が極力少ない方、つまり、直感的な判断が可能なかどうかということをも明らかにするために、どちらの方式が有効であるかを考察するためである。この実験の結果から実際に生活空間に実装した際の身体化の方法を定めるものとする。

### 4.3.2 ユーザビリティテストと結果

今回実装した振動触覚提示において1つの振動子を用いた振動触覚の強弱だけでの判断と、本研究で用いている2つの振動子を使用したファントムセンセーションによる情報理解の評価を行うための実験を行った。実験としては、被験者には1~5の5段階にわけられた振動を認識することができるかを評価した。振動子がひとつの場合は振動の強弱のみで、本手法を用いる場合はファントムセンセーションにおける移動感で1~5段階の触覚を提示する。被験者は20代の男子5人であり、振動子の装着は各被験者の利き腕とした。また、これらの実験での公平性を保つために、使用する振動の強さを最小0.2~最大0.8(音量におけるパーセンテージ)とした。また評価方法としては、最初に15の振動をランダムにすべて2回ずつ提示する。そのとき現在提示されている振動が何番のものであるかを同時に提示することで、被験者の振動と数値への対応付けを行うためのイントロダクションとし、その後すぐに本実験を行った。本実験では、同様に1~5段階のランダムな振動を3秒提示し、3秒間の安静時間をとるといった流れを各振動5回ずつ25回を連続で行った。被験者には3秒の安静時間の際にチェックシート4.164.17に提示された振動がどれであるかを書いてもらうものとした。また被験者には事前に振動が全部で何回提示されるかは明示しなかった。以下に結果をまとめる。

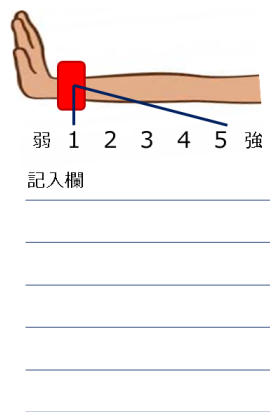


図 4.16: 単一振動の場合

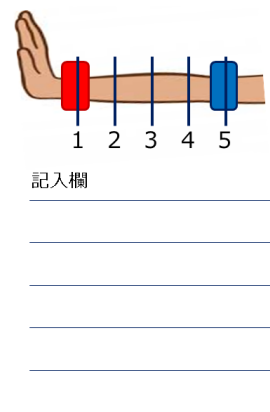


図 4.17: ファントムセンセーションの場合



## 単一振動の強弱の場合

この実験では、1が一番弱く（音量0.2）5が一番強く（音量0.8）になっており、音量の変化は0.15ずつの5段階である。単一振動における正答率は図4.18のようになった。

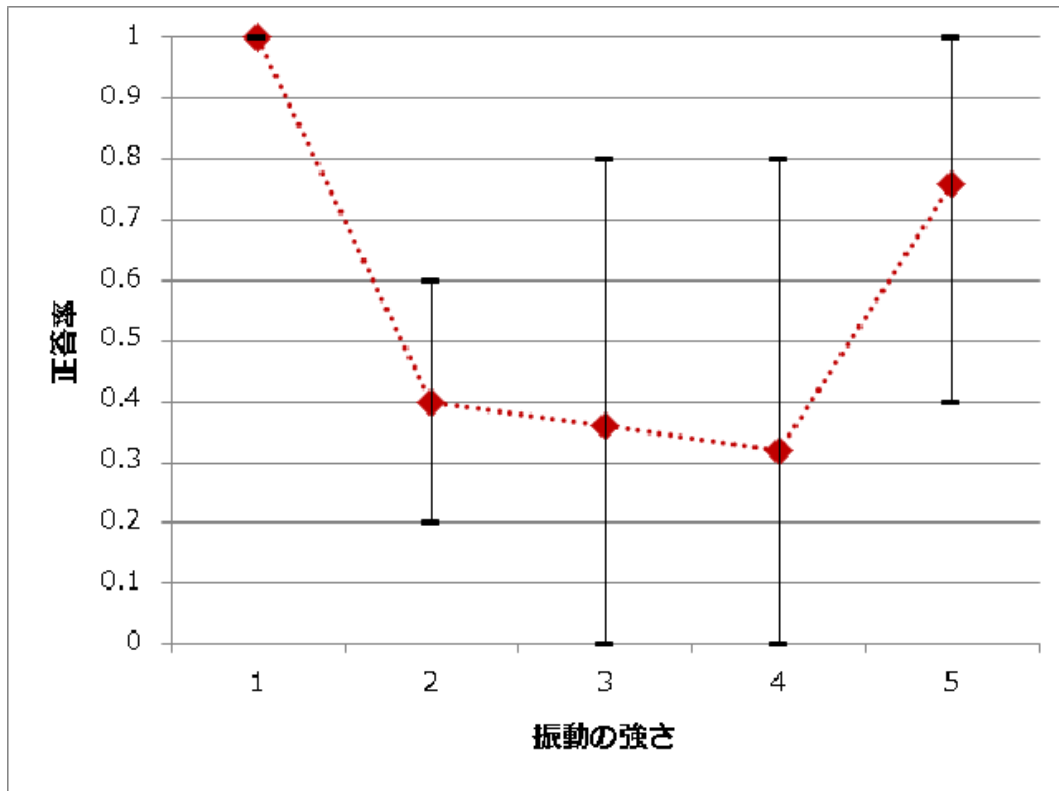


図 4.18: 単一振動の強弱における正答率

以上から、2-3-4の正答率が40%以下と極めて低くなった。この時の被験者の意見としては、「2と3と4は正直違いがよくわからなかった」「1と5のちがいはわかる」「連続で近い振動が来るとさっぱりわからない」といった意見が多かった。正答率の幅も大きく、3と4に関しては0%~80%と個人差が大きくあることもわかった。また、「集中しないとわからない」「環境の雑音でよくわからなくなる」といった意見が見られ、認識に時間がかかることが見て取れた。

## ファントムセンセーションの場合

この実験では、腕における触覚提示の場所で判断を行った。振動の強さの分配も本研究で仮定したものをしようした。ファントムセンセーションを用いた場合における正答率は図 4.19 のようになった。

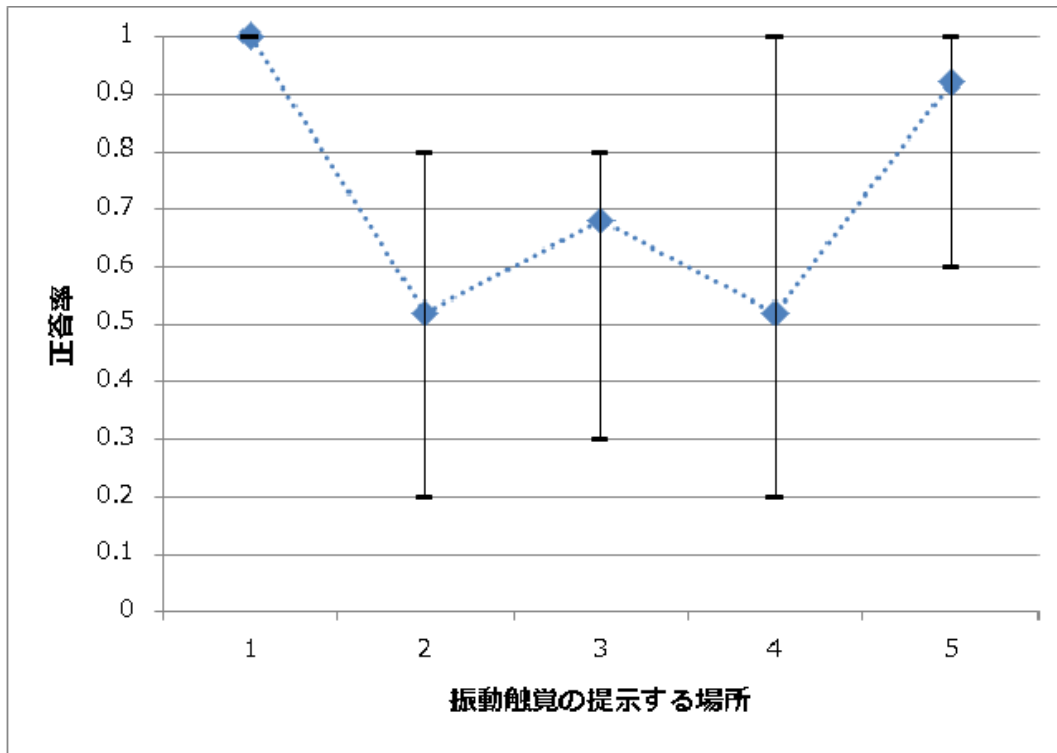


図 4.19: ファントムセンセーションによる正答率

以上から、2-3-4 の中心部分の振動が単一振動の正答率よりも上昇していることがわかった。特に真ん中の振動に対する認識率が非常に大きく、間違っていた回答の約 80% が隣接する振動との間違いであった。また、大きな変化としては全体の正答率のばらつきが抑えられていることが挙げられる。被験者からの意見としては「腕の先にあるのか手間にあるのははっきりとわかる」「真ん中の位置がはっきりとわかるからどっちに振動があるか迷わない」と言った正答率よりも振動の位置感がはっきりと認知できていることがわかった。また、「途中から提示を感じることができるようになった」「慣れれば考えなくてもわかる」「振動している

腕を見ていると振動の場所がわかる」と言った意見が多かった。

考察

これらの結果から、情報の認識においては触覚提示デバイスを2つ用いた際の振動の移動を用いたほうが有効であることがわかった。図4.20からも読み取れる通り、情報を正しく理解できるという観点において正答率が中央に寄っていることから見ても、振動の移動を用いることが妥当であると考えた。また、行動の誘導という点に関しても同様であり、正しい情報判断とユーザビリティテストから得られた「考えなくても理解できる」ということを利用することで、ユーザーに次の行動を誘発することが可能であると考察できる。よって、次項の生活空間における電子レンジを用いた実験においては振動の移動を用いることとした。

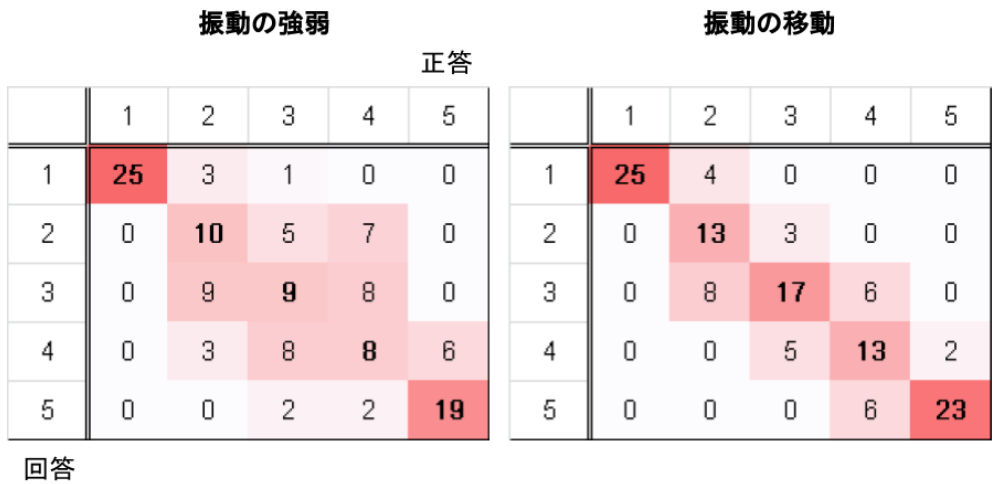


図 4.20: 振動の強弱と振動の移動の正答と回答

### 4.3.3 電子レンジを用いたユーザビリティテスト

触覚提示の評価を元に，本研究では移動感のあるファントムセンセーションを用いた電子レンジ内の温度変化と触覚提示のユーザビリティテストを行った．内容としては，電子レンジで飲み物を温めていることを想定し，ユーザーが電子レンジにカップを入れ電子レンジのドアを閉め，温めを開始した際にドアに触れている腕に温度情報を提示することでユーザーが電子レンジのドアを任意のタイミングで開けるという行動が誘発されるかを観察するものである．被験者には中のモノの温度が触覚振動として提示されていることのみを伝え，どのような触覚を提示するかは明示せず，ユーザーの実際の行動と意見から本研究の持つ気である情報の身体化の考察と評価を行った．具体的な触覚提示を 4.21 に示す．



図 4.21: レンジの中のモノの温度を提示するデモ

### 4.3.4 ユーザビリティテストの詳細

今回の実験としては，ユーザーの利き手に振動触覚提示デバイスを2つ装着し，振動の移動によって温度情報を提示するものとした．振動は図 4.22 に示すピンク

のデバイスと青のデバイスの間を移動する。ピンクのデバイスの位置は10度青のデバイスの位置は100度と設定し、データベースサーバーに事前に用意している温度データを参考にして振動触覚をアクチュエートした。振動提示のために使用した音声データは、電子レンジの使用時の音を今回の実験と同様の2分間で直接サンプリングを行った。実験の体験者は本デバイスの実験を行った男性3人、初めて触覚提示デバイスを装着する男性2人で行った。また、実験のプロセスとしては2段階の工程で行い、まずはじめに基本的な情報のみを伝えて自由に行動させ、その後、事前に開けるべき温度を設定し、適当なタイミングでユーザーに電子レンジを開けてもらうという実験を行った。



図 4.22: 温度上昇による振動触覚の移動

#### 4.3.5 結果と考察

ユーザビリティテストの結果を示す。まず、ユーザーの行動の観察についてを考察する。

### ユーザーによる行動の変化

先にも述べた通り，ユーザーへの事前情報としては振動触覚として電子レンジ内の温度が提示されるということのみを伝えている．まず，基礎実験を行ったことのある被験者3人は振動の移動と温度の情報との対応付けがなされており，温度上昇による触覚提示が一番上まで上昇した際に，「今，最高の温度だね」「もう開けてもいいってことなの?」といったコメントを得た．また，振動が移動している最中においても「ちょうど真ん中くらいだね」「80度くらいかな」というコメントを得ることができた．また，コメントだけではなくユーザーの1人は振動が一番上に来た際に電子レンジのドアを開けると行動が見られた．

次に本研究の触覚提示を初めて体験する2人の行動を示す．この2人に関しても先のユーザーと同様に「温度上がってる」といったコメントを得ることができた．しかし，温度が上昇しているということを認識はできているものの次の行動に結びつけようとするコメントや行動を得られることはできなかった．その後，ユーザーの希望により連続して複数回同様の実験を行った．するとユーザーは本システムをすぐに理解し，先の3人のユーザーのように「温度上がらないみたいだから，開けてもいいの?」という次の行動をほのめかすコメントを得ることができた．

このことから，事前の情報が全く無い状態のユーザーにおいては次の行動への誘発が難しいことが考察できる．しかし，温度情報の認識はスムーズでありユーザー5人全員が温度の変化を理解することができていた．さらに，数回の実験を繰り返し替えることで，ユーザー自身が学習し次の行動を起こすことができることが確認できた．この考察から本研究で提案した情報の身体化を実装することで本プロトタイプからわかるとおり，ユーザーの次の行動を誘発することが可能であると評価する．

### 温度の指定と行動の変化

次にユーザーへ温度を提示し，その温度付近で電子レンジのドアを開けてもらうという実験を行った．今回の実験においては70度に設定した．70度を設定した理由としては，図4.22において振動の移動を十分に知覚することができると考

えたためである。また、本実験は、前回の実験から連続して行ったため被験者5人には本デバイスに対して予備知識が十分にある状態でおこなった。

結果としては、触覚提示デバイスの評価である図4.20でも明らかになった通り、すべてのユーザーがおおよそ同じ地点で電子レンジのドアを開けるという結果を得られた。また、ユーザーになぜこの時にドアを開けたのかという質問から、図4.22でも示した通りユーザー自身で真ん中での振動はおおよそ50度だという認識があり、それをもとに振動の位置と情報の対応付けを行っていることがわかった。実際に提示した温度データをデータベースサーバーからの温度データの送信履歴から確認したところユーザーがドアを開けた時点での提示温度は70~80度であった。本実験では1度の変化を1秒で行っているため、すべてのユーザーはこの10秒の間に収まっていることがわかった。5人のドアを開けた時の温度提示の平均は75度(72,74,74,76,79)であり、70度からの誤差は+5度であり10度から100度までの提示を行ったため誤差は5.56%(小数点第三位切上)であった。

結果として、ユーザーの温度の認識と実際の温度との誤差から見ても十分に情報の身体化としても利用できる範囲内ではないかと考察した。

#### 4.3.6 プロトタイプの評価と情報の身体化

以上から、本研究で構築したプロトタイプによって電子レンジの温度情報を触覚提示からユーザーが判断し、ドアを開けるといった次の行動を誘発すること。また、認識している情報と実際の情報との誤差が5.56%であったことから考察した結果として、日常生活を送る際において本システムは、ユーザーの次の行動を誘発する手法として十分に有効であると考察した。しかし、構築したプロトタイプではあくまでもローカル環境での検証のみを行ったため、インターネットから直接データや情報を取得するために工夫が必要であると考え。リアルタイム性が必要なデータをインターネットから直接取得する場合においてはネットワークの遅延が発生する。また、データベースサーバーに事前に取得する場合に置いてはユーザー自身による取舍選択を行う必要がある。そのため、プロトタイプでは、インターネット上のリアルタイム性が重要なデータ、例としては、株価・為替のトレードなどの情報の身体化は適していないと考える。

## 4.4. 本章のまとめ

本章では、提案した情報の身体化システムのプロトタイプを実装し生活空間における検証を行った。実装したプロトタイプは大きくわけてタッチセンサ部・データベースサーバー・触覚提示デバイスで構成されている。タッチセンサは、Adfruit Feather M0 with ATWINC1500 WiFi を用いて静電容量方式を採用した。データベースサーバーは Unity を用いてメッセージサーバーの構築と生活空間に存在するであろう情報やデータを CSV で仮想的に作成した。触覚提示デバイスには RaspberryPi3・オーディオアンプ・Forcereactoe Hybrid Tough Type を用いてバンド型のデバイスを作成した。これらのシステムは一般家庭で用いられる性能のルーターを用いてネットワークを構築し、JSON 形式での通信がすべて無線で行われている。振動触覚の提示については、前章で提案したように音声信号をもちいて触覚をアクチュエートしており、RaspberryPi3 に送られてくる情報から音声データを選択し、音量を調節することで情報に対応した触覚の提示を可能にしている。また、ユーザーへの提示手法としては、バンド型のデバイスを 1 つ用いた振動の強弱による提示と 2 つ用いた振動の移動による提示を行った。振動の強弱は音声データの強弱を用いて振動の移動はファントムセンセーションと仮現運動を用いた。

また、今回実装したプロトタイプの検証を行った。検証としては提示手法の違いによる情報認識の違いと実際の生活空間へのプロトタイプの実装によるユーザビリティテストを行った。結果としては、振動の強弱よりも振動の移動による提示を用いるほうがユーザーの情報の認識率が高く、解答の分布が正解に近付くことがわかった。また、生活空間によるユーザビリティテストでは日本科学未来感の Cyber Living Lab のキッチンスペースにて実施した。目的としては電子レンジに実装した本システムから得られる温度情報をもとにユーザーがどのような行動を起こすのかの検証とこちらで指定した温度でユーザーがドアを開けるといった検証を行った。結果としては、ユーザーは振動触覚から自らで判断しドアを開けるといった行動が見られた。また、指定した温度におけるドアの開閉ににおいても、実際に提示している温度情報とユーザーが認識している温度情報の誤差が 5.56% という本研究においては比較的小さい誤差であることがわかった。よって、プロト



タイプにおいて行動の誘導が可能であると評価した。

インターネットからリアルタイム性を必要とするデータ身体化する場合においては、遅延と言う点で本プロトタイプは適していないと考察する。

1 Qrio Smart Lock<https://qrio.me/store/smartlock/>

## 第5章

# 結 論

本論文では、日常的な情報を身体化することでユーザーを次の行動に誘発させるための環境構築・システム開発・触覚の提示手法の評価・実際の生活空間でのユーザビリティテストからの考察と評価を行った。インターネットを介してモノとモノだけが情報のやり取りを行っている現在の情報社会に対して、この情報を人間が理解することで新たな恩恵を受け、ユーザーの次の行動へ繋げることができると考えた。その方法として、モノの現在保持している情報を理解するために情報の身体化の手法を提案し、今後も情報化する社会において生活インフラと家電について焦点を定め、実際に生活空間においてこれらの情報を身体的に理解することで次の行動を誘発することが可能なシステムの開発を本論文の目的とした。

まず、情報の身体化の定義とその手法の提案を行った。日常的にモノがやり取りしている数値データを人間にとって有益な情報に変換し、さらにこの情報を人間が直感的に理解することができるように触覚に置き換えることでユーザーが直感的に理解することができるシステムの考察と提案を行った。情報を身体化するために、関連研究等から腕に振動触覚を与えることで情報を理解する手法を用いた。触覚提示に関しては音声信号を振動触覚としてアクチュエートする方法をもちいた。これにより、触覚提示による情報の解像度が上がり、よりモノの持っている情報を理解できるようになるのではないかと仮定した。また、人間が情報を認識することにおいてほしい情報を持っているモノを手にとるといった行動原理から、モノに触れることで情報を取得できるようなシステムであるべきだと考察した。IoTにおける身体化を行うための数値データや情報のあり方を考察し、日常生活から電子レンジ・玄関・生活インフラを例に情報の形式と身体化におけるユーザーの次の行動の誘発の手法を提案した。またIoTにおける数値データ・情

報・触覚への変換と通信のあり方に関しては OSI 参照モデルを用いて提案した。

情報の身体化の提案を元に、実際に情報の身体化システムの構築と生活空間への実装を行った。さまざまなモノから情報を取得することを考え、ユーザーが自由に空間を移動できさまざまなモノに触れることを考慮し通信を無線化した。全体の構成としてはタッチセンサ・データベースサーバー・触覚提示デバイスとなっており、タッチセンサはIoT 機器から情報を得るトリガーとして用いた。データベースサーバーはさまざまなセンサからの情報を保存し、提供するために用いた。触覚提示デバイスは送られてきた情報を元に保持している音声データを再生すること触覚を提示するために用いた。タッチセンサとして Adfruit Feather M0 with ATWINC1500, データベースサーバーとしては Unity, 触覚提示デバイスとしては RaspberryPi3 と Alps の Forcereactor Hybrid Tough Type を用いてプロトタイプを構築した。

最後に、実際のユーザビリティテストを行い本研究でのプロトタイプを元に情報の身体化の考察と評価を行った。振動触覚の提示については、振動の移動を利用した触覚提示を用いることでユーザーの情報の理解を可能にすることが可能になった。実際の生活空間におけるユーザビリティテストでは、本システムを利用した際のユーザーの次の行動への誘導が行えるかの考察を電子レンジを利用した触覚提示によって行った。結果としては、ユーザーは電子レンジの保持している温度の変化を直感的に理解し、任意のタイミングでドアを開けるといった行動を観測できた。これによって本研究の提案手法を用いることで生活空間において情報を身体的に理解することで次の行動を誘発することが可能であると評価した。

今後の展望としては、日常的にさらに自由に扱うことができる数値データや情報が増加した環境で本システムを用いて身体化された情報をさまざまな箇所に埋め込むことで、スマートフォンや情報端末を利用せずに日常生活における自然な行動のみで得られる情報量が増加し、モノとコミュニケーションをとっているような円滑で快適な生活を実現することが可能であると考えられる。また、人間の物理的な行動を誘発するだけでなく、現在利用しているリモコンのような情報出力デバイスを介することなく直接的に自分の意思を IoT 機器に働きかけることが可能になるシステムとしても期待を持てる。

# 謝 辞

本研究の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南澤孝太准教授に心から感謝いたします。本研究において幅広い知見からの確な指導と暖かい励ましやご指摘，また本論分の執筆においても最後の最後までお世話になりました。多忙なスケジュールにおいても深夜までさまざまな相談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。

研究指導や論文執筆だけではなく，学内外のセキュリティやネットワークに関する活動において数多くの助言や指導を賜りました，同学の砂原秀樹教授，加藤朗教授に心から感謝いたします。

同学に入学してから，拙い英語でのコミュニケーションでありながら研究に対するさまざまなご意見・ご指導をしていただきました。Liwei Chan 特任講師に心から感謝いたします。

私の無理な要望を常に応えてくださった秘書の児島さん，平山さんには多大な迷惑をおかけいたしました。

各自の研究が忙しい中，修士一年時の多くの苦楽を共にした-ニヨキニヨキ豆の木-NULNULL'sの杉本将太，佐々木智也，中尾拓郎，前田智祐，伏見はるな，修士二年時のプロジェクトで共に夜を明かした柳原一也，村田遙人，本論文の執筆において支えてくれた山本漣，さまざまなプロジェクトで共に歩んできた Embodied Media のみなさんに多大なる感謝を示します。あなた達が私の心の支えでした。本当にありがとう。

最後に，学業と生活のすべてを支えてくれた両親，妹，祖父母に感謝の意を示す。

## 参 考 文 献

- [1] N. Hanamitsu, H. Nakamura, M. Nakatani, and K. Minamizawa. Twech: A mobile platform to search and share visuo-tactile experiences. In *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, SA '15, pages 26:1–26:2, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [2] A. Israr and I. Poupyrev. Tactile brush: Drawing on skin with a tactile grid display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 2019–2028, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [3] A. Israr, S. Zhao, K. McIntosh, J. Kang, Z. Schwemler, E. Brockmeyer, M. Baskinger, and M. Mahler. Po2: Augmented haptics for interactive gameplay. In *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '15, pages 21:1–21:1, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [4] A. Israr, S. Zhao, K. McIntosh, Z. Schwemler, A. Fritz, J. Mars, J. Bedford, C. Frisson, I. Huerta, M. Kosek, B. Koniaris, and K. Mitchell. Stereohaptics: A haptic interaction toolkit for tangible virtual experiences. In *ACM SIGGRAPH 2016 Studio*, SIGGRAPH '16, pages 13:1–13:57, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [5] Y. Jansen, P. Dragicevic, and J.-D. Fekete. Evaluating the efficiency of physical visualizations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pages 2593–2602, New York, NY, USA, 2013. ACM.

- [6] D. Leithinger, S. Follmer, A. Olwal, and H. Ishii. Physical telepresence: Shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pages 461–470, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [7] V. Levesque, L. Oram, K. MacLean, A. Cockburn, N. D. Marchuk, D. Johnson, J. E. Colgate, and M. A. Peshkin. Enhancing physicality in touch interaction with programmable friction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 2481–2490, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [8] T. Maeda, R. Peiris, N. Masashi, Y. Tanaka, and K. Minamizawa. Hapticaid: Wearable haptic augmentation system for enhanced, enchanted and empathised haptic experiences. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Emerging Technologies*, SA '16, pages 4:1–4:2, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [9] K. Minamizawa, Y. Kakehi, M. Nakatani, S. Mihara, and S. Tachi. Techtile toolkit: A prototyping tool for designing haptic media. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '12, pages 22:1–22:1, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [10] H. Nakamura, N. Hanamitsu, and K. Minamizawa. A(touch)ment: A smartphone extension for instantly sharing visual and tactile experience. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, AH '15, pages 223–224, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [11] Y. Nakamura, Y. Arakawa, T. Kanehira, and K. Yasumoto. Senstick 2: Ultra tiny all-in-one sensor with wireless charging. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, UbiComp '16, pages 337–340, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [12] J. Rekimoto. Traxion: A tactile interaction device with virtual force sensation. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '14, pages 25:1–25:1, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [13] A. Sato, K. Watanabe, and J. Rekimoto. Mimicook: A cooking assistant system with situated guidance. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pages 121–124, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [14] P. Schoessler, S.-w. Leigh, K. Jagannath, P. van Hoof, and H. Ishii. Cord uis: Controlling devices with augmented cables. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pages 395–398, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [15] V. Varga, L. Kriara, V. Vukadinovic, T. Gross, and S. Mangold. Demo: Bringing the internet of toys to life. In *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '15, pages 461–461, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [16] S. Zhao, J. Lehman, A. Israr, and R. Klatzky. Using haptic inputs to enrich story listening for young children. In *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children*, IDC '15, pages 239–242, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [17] 岡安光博. 視覚障害者用非接触障害物検知システム, 2009.
- [18] 仲谷正史, 筧康明, 三原聡一郎, and 南澤孝太. 触楽入門 はじめて世界に触れるときのよう. 朝日出版社, 2016.
- [19] 仲谷正史, 筧康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, and 館. 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践 (特集ハプティックコンテンツ). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 19(4):593–603, dec 2014.

- [20] 渡邊淳司 and 黒木忍. 触覚の時空間知覚・属性知覚に姿勢が及ぼす影響 (特集ハプティクスとvr). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16(3):489–496, sep 2011.