

博士論文

新しい触覚呈示装置の研究

学籍番号 09514988

近井 学

指導教員 三宅 仁

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科

生物統合工学専攻

# 新しい触覚呈示装置の研究

近井 学

学籍番号 09514988

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科

生物統合工学専攻

2014年2月

## 論 文 要 旨

触覚に関する工学的研究は、ロボット工学などの産業応用や感覚代行などでの利用を目指し、センサ開発や触覚呈示デバイスの開発が行われている。一方、これらの研究では圧覚や振動覚という単一感覚のセンシングや触覚呈示が行われているだけであり、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を工学的に再現する呈示デバイスの開発には至っていない。このことから、本研究はヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する新しい触覚呈示装置の開発を目的とした。ここで、本研究の基礎研究として、要素感覚（触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚）を合成させて、触覚の呈示を行うという考え方の簡易評価実験を行った。この評価結果から、要素感覚を機械的に生成し、それらを合成して呈示することで、被験者に触覚を惹起させることが可能であるという結果が得られた。一方で、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する必要があることが示唆された。以上から、目的を達成するため、触覚呈示手法の提案と触覚呈示装置の開発を行った。そして触覚呈示装置の医学・福祉工学的応用として、触覚過敏・触覚鈍麻の早期発見を目指した装置としての利用を提案した。ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する手法を提案するため、本研究の基礎研究・他の触覚研究を調査し、それらをまとめ、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）Haptic Map を構築した。この方法は、圧力軸（単位： $\text{N}/\text{m}^2$ ）・温度軸（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）・振動軸（単位： $\text{Hz}$ ）の3軸で構成されると定義した。この方法に基づいた触覚呈示装置は、圧力軸呈示物理量の制御を圧力センサ、温度軸の呈示をペルチェ素子、そして振動軸の呈示を音響用スピーカーによって行うという構成になっている。Haptic Map に従って要素感覚を呈示する呈示物理量は心理物理実験を実施してその結果に基づいて決定した。そして、Haptic Map による、任意の触覚を要素感覚の合成により呈示する方法の有効性を確認するための評価実験を行った。評価実験結果から、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合や温度軸と振動軸を合成して呈示した場合、触覚呈示装置が生成した感覚以外を

知覚した被験者が多いことが示された。以上から、触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つの要素感覚により構成されている触覚を工学的に再現するための呈示手法・呈示装置の有効性が確認された。装置の医療として、近年増加傾向にある発達障害児のスクリーニングを目指した、触覚機能検査ツールとしての利用を提案した。発達障害児用の触覚機能診断装置の実現可能性を評価するため、健常大学生での評価実験を実施した。その結果、健常者が知覚しやすい座標をまとめた痛覚刺激感度マップが触覚機能診断に有用であることが示された。また、触覚過敏者・触覚鈍麻者への追評価実験を行い、継続的な利用による触覚治療に応用可能であるという結果が示された。以上の結果をもとに、触覚呈示装置の産業応用や医学応用について考察し、触覚呈示装置と Haptic Map には触覚フィードバックや発達障害児触覚機能診断などの応用が期待できることを論じた。他方、基礎実験として実施したヒトが物体に触れた時の触知覚メカニズムの感性工学実験の方法についての評価を行い、触知覚メカニズムの評価実験時の基準試料の重要性や触知覚時の視覚の重要性を指摘した。

# Study of a New Haptic Device

Manabu CHIKAI

No.09514988

Integrated bioscience and technology course

Nagaoka University of Technology

Nagaoka, Niigata, JAPAN

Feb. 2014

## Abstract

The primary interests of researches in haptics are confined to the development of haptic devices and the elucidation of haptic sensations. This study, on the other hand, focuses on generation of haptic sensations, “pseudo-haptic,” as if they were generated when touching objects. An engineering method of generating haptic presentations has to build on the established psychological evidences concerning haptic sensations, and the sound knowledge concerning how to construct electromechanical devices. This study develops a new haptic device that is capable of generating the following five haptic sensations: pressure, vibration, warmth, coldness and pain. This study proposes a method, called “Haptic Map” for representing any haptic sensations by combining of the following three physical stimuli; pressure, temperature, and vibration, measured by Newton per square meters, Celsius, and Hertz, respectively. In addition, this paper proposes a device for presenting haptic sensations defined by the method of Haptic Map, i. e., pressure, temperature, and vibration, by a pressure sensor, a peltier device, and a speaker, respectively. An experiment was conducted to evaluate the performance of the proposed device. A total number of eight participants evaluated the haptic sensations generated by the proposed method. The results indicated that the participants perceived the haptic sensations, such as tickle, sore and itch. Application of the proposed device in the area of medical is discussed. It is argued that it is useful for screening developmental disorder children in terms of their capability of perceiving haptic information; when it is insufficient, they may have problem in communication due to their inability of expressing haptic-related topics. An experiment was conducted to examine the validity of the idea of using the device for screening. A total number of twelve participants evaluated the haptic sensations, such as sore and itch. The results showed that a “Pain Sensitivity Map,” could be drawn after statistically manipulating the obtained data.

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 感覚とは	1
1.2 触覚の生理学的知見	1
1.3 触覚の心理学的知見	6
1.4 現代の触覚研究	9
1.5 本研究の基礎実験	15
1.6 本研究の位置づけと研究目的	17
1.7 本論文の構成	17
<b>第2章 新しい触覚呈示装置の開発</b>	<b>20</b>
2.1 本章の目的	20
2.2 触覚実験の先行研究調査	21
2.3 機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）の提案	21
2.4 新しい触覚呈示装置の仕様・条件	22
2.5 触覚呈示装置による呈示感覚量の定義	23
2.6 触覚呈示装置が呈示すべき物理量の検討	24
2.7 触覚呈示装置の設計	26
2.8 触覚呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚	34
2.9 評価実験方法	36
2.10 評価実験結果	37
2.11 本章の考察	39
2.12 本章のまとめ	42
<b>第3章 触覚呈示装置の医学的応用</b>	<b>43</b>
3.1 本章の目的	43
3.2 触覚機能診断装置の仕様	43
3.3 評価実験方法	45
3.4 評価実験結果	45
3.5 本章の考察	46
3.6 本章のまとめ	49
<b>第4章 考察</b>	<b>51</b>
4.1 研究目的と目的達成度	51
4.2 触覚呈示装置の産業応用	53

4.3	触覚呈示装置を用いた産業応用の一例	53
4.4	触覚呈示装置の医療応用	54
4.5	触知覚メカニズムの感性工学実験	56
4.6	新しい触覚技術の展望	56
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>58</b>
	倫理的配慮	60
	謝辞	61
	参考文献	62
<b>付録A</b>	<b>触知覚メカニズムの感性工学実験</b>	<b>A1</b>
A.1	本章の目的	A1
A.2	評価実験方法	A1
A.3	評価実験結果	A9
A.4	本章のまとめ	A11
<b>付録B</b>	<b>Touch Blendの確認実験</b>	<b>B1</b>
B.1	本章の目的	B1
B.2	評価実験方法	B2
B.3	評価実験結果	B8
B.4	本章のまとめ	B9
<b>付録C</b>	<b>触覚呈示装置の産業応用の一例</b>	<b>C1</b>
C.1	本章の目的	C1
C.2	評価実験方法	C1
C.3	評価実験結果	C3
C.4	本章のまとめ	C3
	学会発表等	D1
	研究会・学会発表等（その他）	E1
	発表論文	F1

# 目 次

1.1	機械受容器の構造	2
1.2	Touch Pyramid	9
1.3	Touch Blend の概念図	10
1.4	触覚に関する先行研究	16
1.5	本研究のアプローチ方法	19
2.1	要素感覚を機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法） Haptic Map	23
2.2	触覚呈示装置本体の概略図	27
2.3	触覚呈示装置の構成図	27
2.4	触覚呈示装置の外観図	28
2.5	触覚呈示装置の実装例	28
2.6	触覚呈示装置に用いた圧力センサ FSR406	29
2.7	圧力値測定回路	29
2.8	圧力センサ抵抗特性試験結果をもとに換算した結果	30
2.9	フーリエの法則と呈示すべき温度	32
2.10	ペルチェ素子の温度特性試験結果	33
2.11	音圧レベル試験方法	34
2.12	振動覚の知覚閾値測定結果	35
2.13	触覚提示装置の物理的制御方法 Haptic Map の仕様	36
2.14	個体値の測定方法	37
2.15	圧力軸の値が $1.5 \text{ N/m}^2$ の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果	38
2.16	圧力軸の値が $15 \text{ N/m}^2$ の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果	39
2.17	圧力軸の値が $45 \text{ N/m}^2$ の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果	39
3.1	2軸を合成して呈示した場合の痛覚刺激感度マップ	47
3.2	3軸を合成して呈示した場合の痛覚刺激感度マップ	47
3.3	感覚過敏者の痛覚刺激感度マップ	49
3.4	感覚鈍麻者の痛覚刺激感度マップ	50
4.1	研究目的と目的達成度	52

A.1	比較1・物体に触れた時の触知覚における視覚の影響を評価する実験	A3
A.2	比較2・物体に触れた時の触知覚における基準試料の影響を評価する実験	A3
A.3	比較3・視覚による物体の触知覚の影響を評価する実験	A4
A.4	20種類の球形被験物	A4
A.5	基準試料に用いたひのきボール	A5
A.6	匿名方式のウェブアンケートシステム	A9
A.7	基準試料の役割	A11
B.1	物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法	B4
B.2	簡易呈示装置本体の概略図	B6
B.3	簡易呈示装置の構成図	B6
B.4	簡易呈示装置の外観	B7
B.5	簡易呈示装置の実装例	B7
B.6	簡易呈示装置の仕様確認実験	B10
B.7	簡易呈示装置を用いた評価実験結果	B10
C.1	自動車の運転中などに生じる手腕系振動 (Hand-transmitted vibration) のメカニズム	C2
C.2	単極尺度を用いた評価実験結果	C4
C.3	振動覚刺激と冷覚刺激を同時に呈示した場合の評価実験結果	C4
C.4	振動覚刺激のみを呈示した場合の評価実験結果	C5
C.5	振動覚刺激と温覚刺激を同時に呈示した場合の評価実験結果	C5



# 表 目 次

1.1	機械受容器の特徴 . . . . .	3
1.2	機械受容器の存在位置, 受容する力成分の方向 . . . . .	3
1.3	感覚受容器が取得する情報とその特徴 . . . . .	7
2.1	Haptic Map の 3 軸が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚 . . . . .	35
2.2	触覚呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚 . . . . .	35
2.3	被験者 8 名の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長) . . . . .	36
3.1	被験者 12 名の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長) . . . . .	46
3.2	被験者 12 名の触覚過敏者・触覚鈍麻者の分類 . . . . .	48
A.1	被験物の質量・直径・表面積・体積・密度・熱伝導率 . . . . .	A6
A.2	本研究で新たに選定したオノマトペ言語 . . . . .	A7
B.1	簡易呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚 . . . . .	B6
B.2	簡易呈示装置を用いた要素感覚の合成による評価実験結果 . . . . .	B9
C.1	評価実験被験者 12 名の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長) . . . . .	C2

# 第1章 序論

## 1.1 感覚とは

我々ヒトは常に外界の状況を目で見、耳で聴き、舌で味わい、鼻で嗅ぎ、手で触れて知覚している<sup>1)</sup>。生理学では視覚・聴覚・味覚・嗅覚・触覚と呼び、これら総称し感覚と呼んでいる。これらの感覚の中でも触覚は、ヒトと外界をつなぐために感覚の中で重要な役割を果たしている<sup>2)</sup>。例えば、触れるや押すなどの刺激や痛みなどの刺激を知覚し、これらの情報を元に状況を判断し、行動している<sup>3)</sup>。ヒトは機械受容器・温度受容器・侵害受容器と呼ばれるセンサにより情報を取得し、その情報が感覚中枢へと送られることで、物体に触れた時に知覚する触覚を知覚することができる。それぞれの受容器は対象物に触れた際の触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つを取得し、これらの情報を感覚中枢で合成することでくすぐったいや引っ張られているなどの感覚が知覚される。

触覚の役割は大きく2つに分類できる。1つ目は任意の物体を滑り落とすことなく適切な把持力で把持するフィードバック制御のための情報の取得である。2つ目は物体の表面の状態・弾性といった対象物の物性の知覚である。これらの情報の取得は、ヒトが物体を把持・操作・認知するために必要不可欠であるといわれている<sup>4)</sup>。この触覚メカニズムの解明や触覚が得ている情報を工学的に再現・呈示・センシングする技術を開発することは、ヒトと機械との共生、さらに医療・福祉における感覚代行を実現するために必要である。

## 1.2 触覚の生理学的知見

触覚は、生理学<sup>5)</sup>において触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つの要素感覚により構成されているとされている。これらが神経線維を通じ感覚中枢へ伝搬されることで、ヒトは物体を知覚している<sup>1)</sup>。これらの情報は機械受容器・温度受容器・侵害受容器により取得されているといわれている。ここでは、感覚情報を取得している感覚受容器の特徴について概説する。

機械受容器は、皮膚が対象物により押される触圧覚、皮膚の接線方向の伸びである

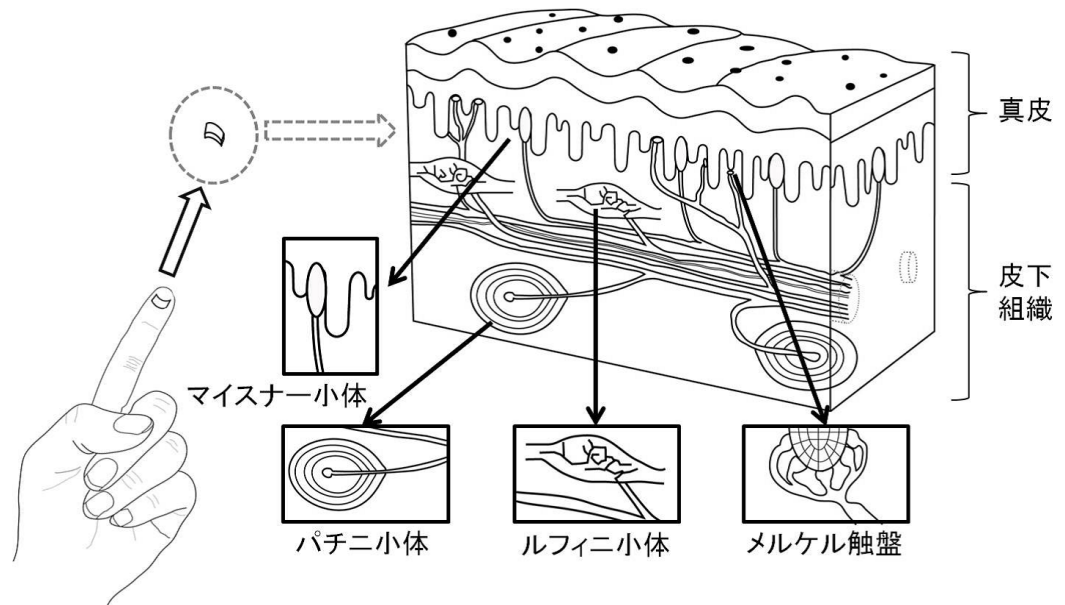


図 1.1: 機械受容器の構造

(文献<sup>7)</sup>を改変.)

皮膚伸展，そして皮膚が対象物の振動を知覚している振動覚の3つの情報を取得している．これらは，マイスナー小体 (Meissner's corpuscle)・メルケル触盤 (Merkel's disk)・パチニ小体 (Pacinian corpuscle)・ルフイニ終末 (Ruffini ending) の4つの機械受容器と呼ばれる感覚受容器により取得されている<sup>6)</sup>．

図 1.1 にヒトの皮膚無毛部の構造，機械受容器の配置を示す<sup>7)</sup>．皮膚組織は表面から表皮，真皮，皮下組織と呼ばれる3層の粘弾性体により構成されている．また4つの機械受容器の組織は最も表面に近い表皮から真皮，皮下組織と奥深くに入るに従って柔らかくなり，指先では皮膚の表面から0.7 mm程度の深さに硬い層 (表皮) と柔らかい層 (真皮) の境界ができています．境界は平面ではなく食い込み合っており，表皮の側から見て凹部にマイスナー小体が凸部にメルケル触盤が配置されている．これら4つの機械受容器は応答特性及び受容野の広さによって，FA / SA, I / II型に分類される．

表 1.1 に4つの機械受容器の特徴を示す<sup>8)</sup>．FAはFast Adapting, SAはSlowly Adaptingの略であり，それぞれ応答の速い・遅いということを示している．また，FA / SAの後のI / IIはそれぞれ機械受容器が狭い・広いことを示している．ここで，受容野とはある触覚受容ユニット (1本の神経線維につながった触覚受容器群) が刺激を検出できる皮膚の範囲のことを意味している．受容器が刺激を明確に知覚することができる範囲 (受容野) は，受容器の位置に深く依存しているといわれている．

表 1.2 に各受容器の存在している位置，また受容する力成分の方向を示す．はじめに，皮膚表面の浅い箇所が存在するマイスナー小体とメルケル触盤は受容野が明確であるといわれている．マイスナー小体は真皮乳頭付近に存在し，メルケル触盤は表皮基底部分に存在している．次に，パチニ小体とルフィニ終末は受容野の境界が不鮮明であるといわれている．パチニ小体は皮下組織に，ルフィニ終末は真皮深部に存在している．これらの受容器の位置関係により，各受容器は物体から受容する触知覚情報を干渉せずに知覚することができる．

さらに，それぞれの機械受容器の特徴を述べる．機械受容器の詳しい特徴は，生理学の分野において研究されている<sup>9)10)</sup>．マイスナー小体・メルケル触盤は法線（垂直）方向の圧迫力センサとして，またパチニ小体・ルフィニ終末は接線（摩擦）方向の摩擦力センサとして定義されている．以下に，触圧覚・皮膚伸展・振動覚を知覚している感覚受容器の構造と特性を概説する．

### 触圧覚

触圧覚は主にマイスナー小体，メルケル触盤により知覚されている．マイスナー小体は真皮乳頭（表皮の下層に飛び出しているもの）の中に存在している．有髄神経が不規則に分枝していることから，神経終末は卵型の小包に包まれている．長さ約 100  $\mu\text{m}$ ，横幅約 30  $\mu\text{m}$  と非常に小さいのが特徴である．ただし加齢と共に

表 1.1: 機械受容器の特徴

(文献<sup>8)</sup>を改変)

機械受容器	機械受容ユニット	受容野の面積	順応性
マイスナー小体	FA-I	狭い	速順応，速度感応
メルケル触盤	SA-I	狭い	遅順応，速度・圧感応
パチニ小体	FA-II	広い	速順応，加速度感応
ルフィニ終末	SA-II	広い	遅順応，伸展順応

表 1.2: 機械受容器の存在位置，受容する力成分の方向

機械受容器	存在位置	受容する力成分の方向
マイスナー小体	真皮乳頭の中	法線方向（垂直方向）
メルケル触盤	表皮層の突起最深部	法線方向（垂直方向）
パチニ小体	真皮下層・皮下組織	接線方向（水平方向）
ルフィニ終末	真皮下層・皮下組織中小包	接線方向（水平方向）

に大きさは増加するが、老齢になると大きさが減少することがわかっている。マイスナー小体の受容野は明確である。動的特性として、振動検出の振幅値が周波数に反比例し数 10 Hz で最高感度に達すること、指紋の影響を強く受けてしまうことが挙げられる。また、速順応型で持続的な皮膚圧迫には急速に順応し応答しなくなる。マイスナー小体は 40 Hz 以下の粗振動を検出するのに適し、その特性を利用した触刺激による皮膚変位の速さの検出に適することがわかっている。更に、Nolano<sup>11)</sup>らは、生体組織検査法 (biopsy) を用いてマイスナー小体の形状の測定を行っている。メルケル触盤は皮膚表面の浅い箇所が存在している。特に表皮層の突起最深部にある。これにより直接仕事を行うので、神経細胞の密度が高いといわれている。しかしながら、感度は低く抑えられている。メルケル触盤の受容野は明確である。この触盤は、触圧刺激に対して持続的な皮膚変位を受容し、順応の遅い応答を示す。

### 皮膚伸展

皮膚伸展 (接線方向の伸び) は主にルフィニ終末により知覚されている。皮膚伸展については、皮膚と対象物が接触した際の皮膚の横方向の伸び方が摩擦係数によって異なることが示されている<sup>12)</sup>。ルフィニ終末は真皮下層や皮下組織にある小包に包まれている神経終末であり受容野の境界は不鮮明である。構造は、長さ 500 ~ 1000  $\mu\text{m}$ 、中心部の軸径は 200  $\mu\text{m}$  である。そして厚さ 3  $\mu\text{m}$  の皮膜で覆われていて、その中に液体を含んでいることも知られている。この組織はメルケル触盤と同じく遅順応型の受容器である。動的特性は持続的な皮膚変位の大きさに比例した応答を示すが、メルケル触盤と異なり真皮層に存在するため、やや遠い部位に加わった変位 (例えば皮膚がひっぱられることなど) を検出するのに適することがわかっている。

### 振動覚

振動覚はパチニ小体により知覚されている。これは、最も研究が進んでいる細胞であり、近年動的特性が解明されてきている<sup>13)14)</sup>。この小体は 4 つの機械受容器のうち最も奥深くに配置されており、真皮下層や皮下組織に存在している。そのため、受容野の境界はルフィニ終末同様不鮮明である。構造は、長さ 0.5 ~ 2 mm、直径約 0.7 mm であり、ラメラと呼ばれる同心円状の薄い細胞が 20 ~ 70 層にわたって重なる層状構造を示す。このラメラによる層状構造により、空間的変形モードのフィルタリング機能が実現されていると考えられている。パチニ小体の最小検出可能振幅は周波数の 2 乗に反比例して減少するという同調曲線が生理実験により示されている。動的特性は 200 ~ 300 Hz において最も感度が良く全体としてバンドパス特性を示す。またこの組織は低周波であれば大変形にも反

応しないため、ヒトが対象物を強く握り締めた時に接触部位に加わったわずかな振動を感度良く検出可能であることがわかっている。そして、皮膚変位の加速度を検出することもわかっている。すなわち非常に順応が速く 200 Hz 前後の繰返し刺激を与えたとき閾値が最低となることや、接触のとき最も速く興奮するのはパチニ小体と推測されている。パチニ小体は皮下組織のほか、深部組織たとえば骨膜・骨間膜・内臓にも広く分布して、伝播してくる振動を捉える特徴がある。パチニ小体の最大の特徴は無毛部や有毛部を問わず真皮下層や皮下組織に存在しているため感度が良く、物体の皮膚への接触を最初に感知することができることである。また、触覚機能の研究として、例えば Verrillo<sup>15)</sup> は振動覚知覚受容器に関する実験から低周波の振動感覚検出受容器と高周波振動感覚検出受容器があるという二重機械受容器理論を提唱した。また Geldard<sup>16)</sup> は振動覚知覚閾値が 200 Hz において最小になり、閾値変化が U 字型になることを解明した。

温度受容器は、近年まで機械受容器にも含まれているルフィニ終末やクラウゼ小体であるといわれていた。Iggo ら<sup>17)</sup> は、温覚と冷覚の受容器が異なっていると定義した。そのため、ここでは機械受容器とは異なり感覚器官の詳細を示さず、それぞれの感覚の特性を示す。

### 温覚

温覚は、温点により知覚されている。この受容器は近年まではルフィニ終末であると考えられていたが、現代生理学では特定の受容器は示されていない。温点は、35 ~ 43 °C という極めて狭い領域での温度変化を知覚している。特に、接触点の温度が 45 °C 以上となると、熱傷を伴い火傷や二次痛覚の刺激へと変化する。この範囲の中で最も敏感な領域はどこになるのかなどの詳細は未だわかっておらず、感覚受容器を含めた知見の早期発見が望まれている。

### 冷覚

冷覚は、冷点により知覚されている。この受容器は近年まではクラウゼ小体であると考えられていたが、温覚と同様、現代生理学では特定の受容器は示されていない。冷点は、20 ~ 40 °C の範囲での温度変化を知覚している。特に、30 °C に知覚のピーク値をもち、接触点の温度が 15 °C 以下となると冷傷を伴い二次痛覚の刺激へと変化する。特に 35 ~ 40 °C では温点と同一の領域であり、ヒトはこの範囲での温度変化は鈍感となるといわれている。この範囲ではヒトの体温の領域に近いことから、そのような構造となっていると考えられている。

侵害受容器にはルフィニ終末やポリモーダル受容器などさまざまな感覚受容器があるといわれているが、詳細は解明されていない。痛覚には一次痛覚と二次痛覚があり、これらは刺激の閾値が異なるほか、感覚中枢へと刺激情報を伝える神経線維が異なっている。一次痛覚は早く鋭い痛みということから刺激情報の伝達が速く A $\delta$  線維により伝達されている。それに比べ二次痛覚は遅く鈍い痛みということから刺激情報の伝達が遅く C 線維により伝達されている。それぞれを以下に概説する。

### 一次痛覚

一次痛覚は、強い機械的刺激や高温により生じ、主に侵害受容器により知覚されている。これはヒトが生活においてぶつける、刺す、また切るなどという物理的な作用に起因する侵害性の痛みにより生じている。これらの痛みが生じたとき、ヒトは刺激が与えられた部位を正確に判断し、対象物からの素早い退避行動を行うことができることから、脊髄レベルで知覚されているといわれている。

### 二次痛覚

二次痛覚は、内臓感覚を含む複数種（ポリモーダル）の刺激により生じ、主にポリモーダル受容器により知覚されている。これらの刺激は、前述の一次痛覚の痛みが生じた後に遅れて到達する刺激情報により生起する感覚である。例えば、指を切った後しばらくしてくるずきずきする感覚である。また、触圧覚における強い機械刺激、冷覚における 15 °C 以下の冷却、温覚の 45 °C 以上の加熱、そして刺激性化学物質による刺激も二次痛覚として扱われている。このことから、すべての感覚受容器の刺激レベルが一定値以上となった場合に知覚する感覚と定義されている。

このように、ヒトの触覚は機械受容器・温度受容器・侵害受容器により情報を取得し、この情報が脳に送られ合成されることで触覚を知覚している。これらの受容器の特徴を表 1.3 にまとめた。ヒトは 8 種類の触覚に関する受容器を用い、外界の状況を知覚していることがわかる。

## 1.3 触覚の心理学的知見

上記のような触覚の生理学的知見は、それぞれの感覚受容器の特徴・機能に関するものである。過去、触覚研究の歴史において、触覚の機能を評価した研究として、2点弁別閾を計測する主観的方法と、神経活動により触覚機能を解明した客観的方法がある。また、触覚の機能を解明する研究として、触覚体験は 1 つの全体的要素と仮定し

表 1.3: 感覚受容器が取得する情報とその特徴

機械受容器	取得する情報	特徴
マイスナー小体	触圧覚	時間に依存せず，変位に依存する
メルケル触盤	触圧覚	変位に依存せず，時間に依存する
パチニ小体	振動覚	接触面で生じている振動を知覚する
ルフィニ終末	皮膚伸展	接触面における接触方向に依存した時間変化を知覚する
温点	温覚	35 ~ 43 °C の温度を知覚する
冷点	冷覚	20 ~ 40 °C の温度を知覚する
痛覚受容器	一次痛覚	速痛 (物体にぶつけるなど)
ポリモーダル受容器	二次痛覚	鈍痛 (指を切る，火傷するなど)

た全体論と，複数の感覚（要素）が組み合わさることで触覚体験が構成される要素論がある．それぞれの研究を以下に詳述する．

### 主観的方法と客観的方法

触覚の機能を主観的な方法で評価した研究の一例として，Ernst Heinrich Weber (1795 ~ 1878) の2点弁別閾計測がある．2点弁別閾とは，コンパスなどを用いて皮膚上の2点を刺激し，その刺激が2点に知覚できる限界値のことである．例えば，Stevens ら<sup>18)</sup>は被験者の身体各部位において2点弁別閾を測定しており，その結果から若年層の被験者の場合，手指や口唇での2点弁別閾値は他の部位よりも相対的に小さく2 ~ 3 mm，一方，上腕・背中・大腿などの部位での2点弁別閾値は他の部位よりも相対的に大きく15 ~ 30 mm に達していることを示した．

触覚の機能を客観的な方法で評価した研究の一例として，触覚機能を神経活動により解明する研究がある．Johannes Peter Müller (1801 ~ 1858)<sup>19)</sup>は，特殊神経エネルギーの法則 (The law of specific nerve energies) を提案した．この法則でMüllerは，感覚の知覚に関してある一部の神経を刺激することで同一の感覚を起こすこと，また神経走行のどの部位を刺激しても同様の感覚を起こすこと，そして刺激する神経を変化させることで感覚が変化することを示した．また，Sir Henry Head (1861 ~ 1940)<sup>20)</sup>は，自らの前腕の触覚神経を切断し，感覚の回復が段階的に起こることを観察した．20世紀になり神経活動を記録することが可能になったことから，新たな知見が得られてきている．例えば，John Paul Nafe (1888 ~ 1970)<sup>21)</sup>は神経インパルスの時間的・空間的パターンにより，知覚の質が決定することを示した．



## 全体論と要素論

触覚体験を1つの全体的要素と仮定した全体論の研究について説明する。例えば、ゲシュタルト心理学者の David Katz (1884 ~ 1953)<sup>22)</sup> は、触覚体験を知覚する機械受容器の中で、振動覚受容器と圧覚受容器を区別した。また、生態心理学者の James Jerome Gibson (1904 ~ 1979)<sup>23)</sup> は、触覚体験を受動触知覚体験 (Passive touch) と能動触知覚体験 (Active touch) に大別した。

次に、触覚体験が複数の感覚 (要素) が組み合わさることで構成されるとする要素論の研究について説明する。例えば、心理学者の Hermann von Helmholtz (1821 ~ 1894)<sup>24)</sup> は感覚の種類 (Sensory Modality) という言葉を導入した。この概念は、被験者の主体的体験である内観に基づいている。生理学者の Max von Frey (1852 ~ 1932)<sup>25)</sup> は、Helmholtz が提案した感覚の種類に関する実験的分析と 1.2 に示されている触覚の生理学的知見をもとに、触覚機能を触覚・温覚・冷覚・痛覚の4つにより構成されている、言い換えると触覚・温覚・冷覚・痛覚の4つが触覚の感覚の種類であると定義し、互いに独立している感覚であると述べた。構成主義心理学者の Edward Bradford Titchener (1867 ~ 1927)<sup>26)</sup> は、触覚を触圧覚・振動覚・皮膚伸展・温度覚 (温覚と冷覚)・痛覚 (一次痛覚と二次痛覚) の5つの基本要素のうちいずれか2つの感覚を機械的に合成することで、痒みや熱などの触覚が再現できるという Touch Blend という試みを提案した<sup>26)27)28)</sup>。この研究はうちいずれか2つの感覚をものである。例えば、濡れた感じを再現するためには、触圧覚と温度覚 (この場合は冷覚) を組み合わせることで再現でき、またべたべたした感じを再現するためには、触圧覚 (柔軟性) と温度覚 (この場合は冷覚) を組み合わせることで再現できるとしている<sup>26)</sup>。Titchener はヒトの感覚受容器から送り出される触覚情報の分析を行い、その情報が合成されて触覚が得られるという点に着目した。そして、それらを用いて触覚を再現する手法としてこれら5つの基本要素を四角錐 (Touch Pyramid) の頂点に配置して触覚を表現することを提案した<sup>29)</sup>。図 1.2 に Touch Pyramid を示す。頂点には、触圧覚・振動覚・皮膚伸展・一次痛覚・二次痛覚の感覚受容器から得られる情報を配置し、辺には痒み・熱・ひっぱられた感じなどの感覚情報の合成により表現される感覚中枢で知覚する触覚を配置している。Titchener はこの Touch Pyramid により、ヒトが普段物体に触れて知覚しているという触覚体験を説明できるとした。Touch Blend は、図 1.3 に示している通り、ヒトの触知覚メカニズムの解明結果を踏まえて構築される Touch Pyramid に基づいた要素感覚 (Touch Pyramid の頂点) の呈示によって触覚を再現するという考え方を表している<sup>30)31)32)</sup>。

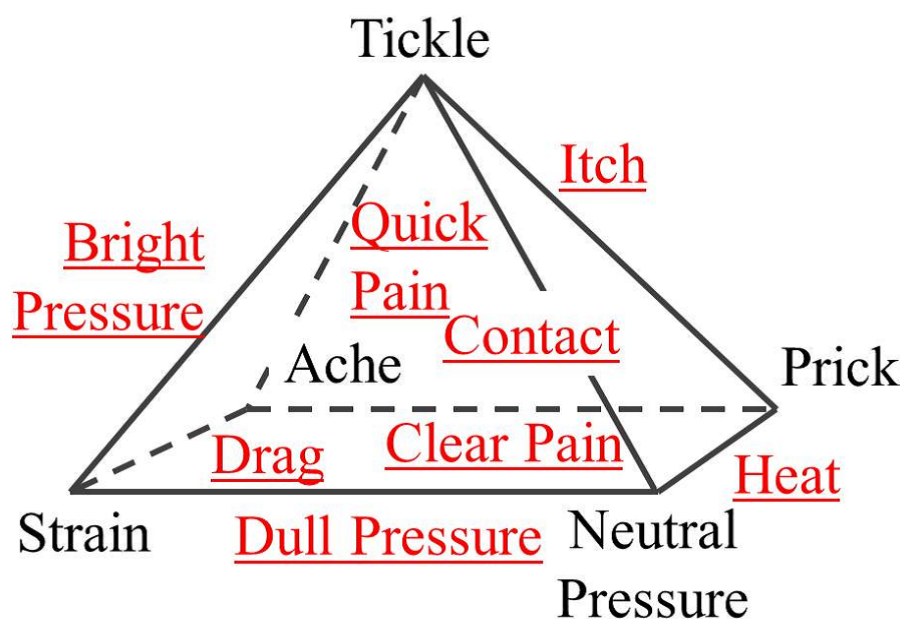


図 1.2: Touch Pyramid

(文献<sup>29)</sup>を改変. 原文のまま, 英語表記としている.)

## 1.4 現代の触覚研究

前述の通り, 触覚機能の研究はおよそ1世紀前から行われており, これらの知見を礎に触覚に関する研究が行われている. ここではこれらの研究を触覚の心理学的研究, 触覚の感性工学的研究, 触覚デバイスの研究に大別し詳述する.

### 触覚の心理学的研究

触覚の心理学的研究には, 触知覚メカニズムを解明する心理物理学的研究, 触覚のマルチモーダル情報の統合過程を解明する基礎心理学的研究, 触覚の錯覚現象を解明する認知心理学的研究がある.

触知覚メカニズムを解明する研究は近年幅広く行われており, 特に素材・材質を変化させた場合の触知覚メカニズムの解明が進んでいる. 井野ら<sup>33)</sup>は, 5種類の試料を用いて材質感の識別実験を行い, 早川ら<sup>34)</sup>は16種類の試料を用いて触り心地の分類を行い, また前野<sup>35)</sup>は, 20種類の試料を用いてヒトの触知覚メカニズムの解析を行っている.

触覚のマルチモーダル情報の統合過程の解明に関する研究について概説する. ヒトは視覚83.0%・聴覚11.0%・嗅覚3.5%・触覚1.5%・味覚1.0%の割合で外界を知覚するといわれており<sup>36)</sup>, 視覚を通じて得る情報は極めて多い. 言い換え

## 心理物理学的評価

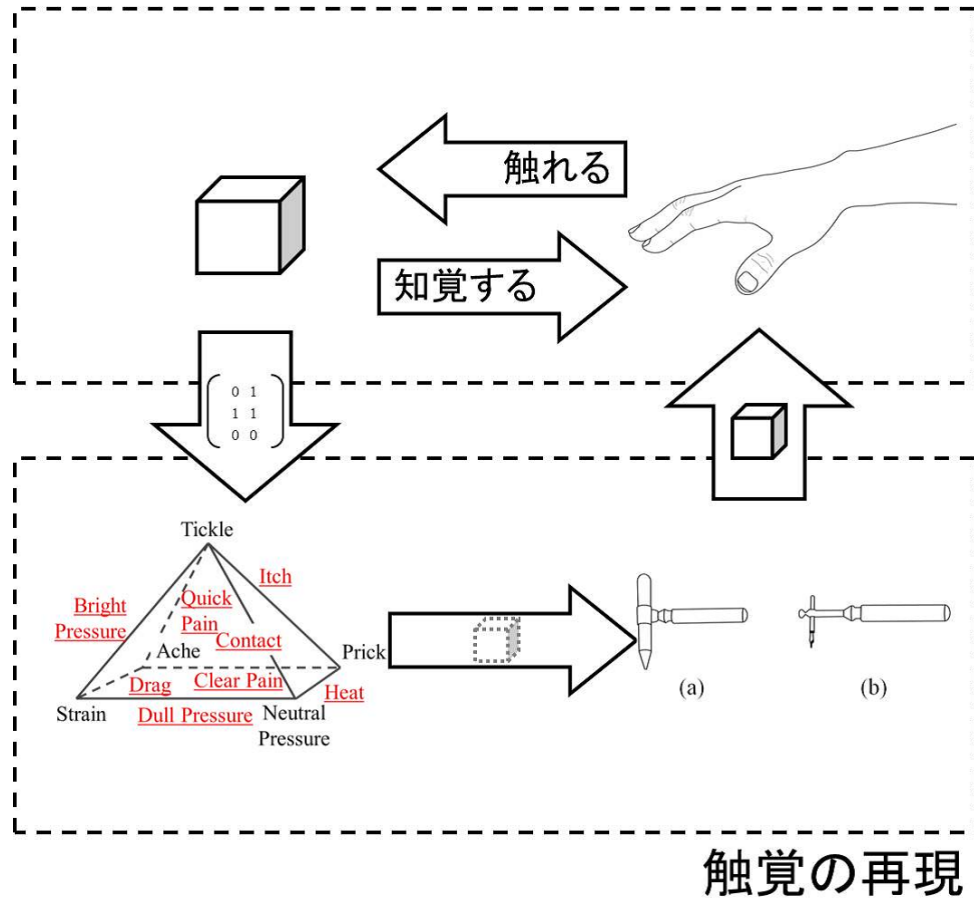


図 1.3: Touch Blend の概念図

ると、ヒトは物体に触れる時に視覚から得る情報と触覚を組み合わせることで物体を知覚している。赤松<sup>37)</sup>は、視覚情報に触覚呈示を付加したマウス型インタフェース装置を用いた評価実験を行い、その結果からポインティング操作の操作時間が従来のものに比べ短縮することを示した。Fujisaki<sup>38)</sup>は、被験者へ与える視覚情報を操作（視覚フィードバックを遅延させる、など）し、Purdue-pegboard-testを行った場合の脳機能の解明や触覚メカニズムの解析を行った。その結果から、視覚情報の遅れが、Purdue-pegboard-testの回答に影響を及ぼすことが示された。またFujisakiら<sup>39)</sup>は、視覚・聴覚・触覚の同調性知覚（共感覚）に関する研究を行っており、視覚・聴覚・触覚刺激の同時刺激時と非同時刺激時の同調性知覚弁別閾を測定した。その結果から、複数刺激時における同調性知覚弁別閾は、同時刺激を行う感覚により変化することが示された。飯塚ら<sup>40)</sup>は、視覚刺

激を操作することによる視覚と触覚と運動の感覚の運動主体感の喪失に関する評価を行っている。その結果から、被験者は視覚刺激を操作されたことによって、なぞり動作（触知覚）という運動主体感が喪失、もしくは減少するという傾向が示された。大森ら<sup>41)</sup>は、錯視図形の形の知覚において、触覚が視覚にどのような影響を与えるかを評価した。その結果、視覚における形の知覚に触覚が影響することを示し、特に目と手の動きの一致によって触覚がより影響することを示した。

触覚の錯覚現象に関する研究も行われている。前述の通り、触覚は視覚による影響を受けることが知られており、また Rubber hand illusions<sup>42)</sup> のような錯覚現象を起こすことも解明されている。Vincent<sup>43)</sup> は身近な触覚の錯覚現象をまとめており、例えばアリストテレスの錯覚（手の指を交差させ、その間にペンのような棒状のものを挟むことで棒状のものが2本に感じるという錯覚現象）などを述べている。温度に関する錯覚現象として、Thunberg の温度格子錯覚（Thermal Grill Illusion）<sup>44)</sup> がある。これは、温かさと冷たさのそれぞれを単独で呈示した場合には痛みを起こさない刺激を、1つおきに配置したグリルを用いて同時に刺激を呈示することで灼熱痛を起こす現象である。加えて、温度に関する錯覚現象として、Thermal Refferal<sup>45)</sup> がある。これは、温度刺激を呈示する部位の近傍に刺激（例えば振動覚）を呈示すると、刺激を与えた部位に温度刺激が知覚させるという現象である。更に、Fish-bone tactile illusion<sup>46)47)</sup> という錯覚現象がある。これは、魚の骨のような形状をしており、平らな中心部に対して周辺部には1周期 2.0 mm の空間周波数を持った格子形状を有している。体験者はこの平らな中心部をなぞると、物理的には平らな面であるにも関わらず、くぼみを知覚することができる。そして、という錯覚現象がある。これは、擬似的な筒の中を球状物体が転がっているように感じるという錯覚である。触覚の錯覚を利用した触覚呈示技術として、安藤ら<sup>48)</sup> は白黒に描かれた線をなぞるときの触覚を呈示する爪装着型触覚ディスプレイを開発した。この触覚ディスプレイは、紙に書かれた線や図形の視覚情報を凹凸という触覚をヒトへ惹起させることが可能になるというものである。南澤ら<sup>49)</sup> は、見たものを見たまま触ることが可能な触覚インタラクションシステムの開発を行っている。このシステムは、ハプティックディスプレイを指先に装着し、さらに視覚情報を付加し、拡張現実感による触覚呈示が可能になるというものである。水上ら<sup>50)</sup> は、ファントムセンセーション<sup>51)</sup> と呼ばれる錯覚現象を応用した方法を提案した。この方法では、掌部への微小振動刺激により、被験者へ粗い面の質感や凹凸感などの感覚を惹起させることが可能であると示した。大丘ら<sup>52)</sup> は、ファントムセンセーションを用いて指先への接触力

を代替し呈示する方法を提案した。この方法では、法線方向や接線方向の接触力の変化の表現が可能であると示した。Yaoら<sup>53)</sup>は、Virtual Rolling Stoneという錯覚現象を解明した。これは、中空円筒を用いて、筒の中を球状物体を転がっているように錯覚する現象である。最後に、触覚の錯覚現象を用いた応用として、触覚コンタクトレンズ<sup>54)</sup>がある。これは、物体の微小な凹凸を鋭敏に、そして素早く検出することが可能である。この錯覚現象の応用は技能伝承のツールとしての利用が目指されている<sup>55)</sup>。

## 触覚の感性工学的研究

ヒトの感覚を客観的に評価する手法として、物体の特性により引き起こされるヒトの感覚を測定する方法である官能評価法<sup>56)57)</sup>がある。この手法を用いた触覚評価が行われている。早川ら<sup>34)</sup>は、16種類の試料を用いて触り心地の分類を行った。この評価では触覚のオノマトペ表現に着目している。オノマトペ表現とは感覚の擬音語・擬態語の総称であり<sup>58)59)</sup>、この表現には触覚に関するものも多数存在する。例えば、日本語には「ふかふか」「ぐにゃぐにゃ」「ざらざら」などの擬態語がある。これらは一言で触覚を表現・再現することができるため、日本人同士の会話でよく使われている。前野<sup>35)</sup>は、20種類の試料を用いてヒトの触知覚メカニズムの解明を行った。この評価では、SD (Semantic Differential) 法を用いた官能評価を実施した。加えて前野は、官能評価で得られた結果の因子分析結果に基づいた触感センサを開発した。

ヒトの触り心地に関する研究は、布の風合いや化粧品開発において行われており、田中ら<sup>60)</sup>は、5種類の布を用いた官能評価実験を行った。この評価では、ヒトの触覚感性とセラミック圧電センサを用いて、ヒトの触覚感性量を計測した。鋤柄<sup>61)</sup>は複数の素材の布を用いて、ヒトの触覚感性の計測を行った。この計測結果からヒトが布から受ける手触り感を分析し、布から受ける心地よさの客観的指標を提案した。

本研究の基礎実験として、ヒトの触知覚メカニズムの感性工学実験を実施した<sup>62)63)</sup>。ヒトの触知覚メカニズムの解明に関する先行研究として、前述のように早川ら<sup>34)</sup>の研究、前野<sup>35)</sup>の研究、またヒトの触り心地に関する研究として、田中ら<sup>60)</sup>の研究、鋤柄<sup>61)</sup>らの研究がある。これらの研究では、被験者へ呈示する基準試料の条件について定められておらず、触覚の感性工学実験の指標が定められていない。そこで、ここでは、触知覚に関する評価実験において、評価基準(基準試料)の必要性に関して評価を行った。併せて、触知覚時の視覚情報の重要性について評価を行った。官能評価実験として、基準試料を用いて物体に直接接触れる実験、基準試料を用いて視覚による情報を含んだ状態での物体に直接触

れる実験，基準試料を用いずかつ視覚を遮断した状態で物体に直接触れる実験，物体に触れず視覚のみで評価する実験を行った．これらの実験では，ヒトが普段触れている物体を再現するため，すべての被験物の直径と質量は異なるように選定し，また，能動的触知覚による評価を行うため，形状による触知覚変化が生じないように，球形被験物を選定した．この評価実験結果から，呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について考察し，今後の触覚の感性工学実験の指標を示した<sup>62)63)</sup>．詳細については，付録 A に示す．

## 触覚デバイスの研究

触覚デバイスの研究は，産業用ロボットへ搭載することを目的として行われていた触覚センサ開発，感覚代行を目指して行われていた呈示装置開発や触知覚メカニズムの基礎研究，擬似的な触覚・力覚呈示装置の開発など多岐に渡っている．

はじめに，産業用ロボットへ搭載することを目的として行われていた触覚センサ開発について概説する．篠田<sup>64)</sup>によると，センサ開発は産業用ロボットに応用することが目的であった．このように開発されていたセンサだが，初期研究では産業上での触覚センサの利用は皆無であり，また触覚センサにより位置情報のセンシングを行うよりも機械を加工することにより作業の効率化が図れるなどの理由から，産業用ロボットへの触覚センサの搭載は実現されていなかった．2000年代に入り，デバイス開発技術の急速な発達により，センサ開発が急速に発展した．例えば本田技研工業株式会社製の二足歩行ロボット ASIMO<sup>65)</sup> は足裏のセンサにより床反力を計測しこの情報により歩行制御を行っている．Yamauchi<sup>66)</sup>らは圧覚センサを開発し，圧覚をリアルタイムに転送するマスタ・スレーブ型ロボットシステムの開発を行っている．ひとつのデバイスを用いて機械受容器と同等のセンシング能力を持たせるセンサ開発についてもコンデンサ・コイルを用いたもの<sup>67)</sup>，高分子圧電素子を用いたもの<sup>68)69)</sup>，磁気混合流体 (Magnetic Compound Fluid) を用いた導電性ゴム (MCF ゴム) を用いたもの<sup>70)</sup> などがある．触覚センサは，素子開発や開発したデバイスの評価などの基礎研究をはじめ，実際にロボットへ搭載されている．一方課題として，現在の触覚センサは，触圧覚をセンシングするという，単一感覚の情報を取得するのみに留まっている．

次に，感覚代行を目指して行われていた呈示装置開発や触知覚メカニズムの基礎研究について概説する．関<sup>71)</sup>によると，感覚代行とは傷病などにより機能が損なわれた感覚を残された他の感覚で代行し補助することである．例えば，島田ら<sup>72)</sup>の高齢者・視覚障害者への視覚補助を目的としたオプタコンに関する研究，渡辺ら<sup>73)</sup>の触地図の研究や，渡辺ら<sup>74)</sup>の点字に関する研究などでは，触覚情報

は補助圧覚として利用されている。更に和田ら<sup>75)</sup>のタクティルエイドを用いた聴覚代行における触覚の利用、雨宮ら<sup>76)</sup>の牽引力呈示などの研究が行われている。また、土井ら<sup>77)</sup>は消費生活製品の操作性向上に関する凸バーや凸点の識別性を評価した。この評価から、視覚障害者が知覚しやすい凸バーや凸点の指標が定められた。感覚代行を目指して行われている研究は、土井ら<sup>77)</sup>の基礎研究をはじめ、デバイスの開発においてはオプタコン<sup>72)</sup>、触地図<sup>73)</sup>、タクティルエイド<sup>75)</sup>などがあり、実社会において利用されている。感覚代行に関する研究では、基礎研究から装置開発、そして実社会への展開と、発展的に行われている。

最後に、擬似的な触覚・力覚呈示装置の開発について概説する。例えば、仮想現実・拡張現実技術で用いられている温覚・冷覚呈示を用いたビデオゲームでの触覚呈示<sup>78)</sup>、触覚ディスプレイ<sup>79)80)</sup>などがある。Choiら<sup>81)</sup>は、振動呈示による触覚呈示方法・研究動向をまとめており、振動呈示デバイスのコミュニケーションツール・ナビゲーションツールなどへの応用が期待されている。井野ら<sup>82)</sup>は、物体を把持したときに皮膚にわずかに生じる「ずれ」に対する感覚特性(ずれ覚)に基づいた触覚ディスプレイがある。また、擬似力覚を呈示する研究<sup>83)</sup>は、南澤ら<sup>84)</sup>の触力覚フィードバックの研究、Nakaoら<sup>85)</sup>のバーチャルリアリティシステムにおける力覚を呈示する研究、野崎ら<sup>86)</sup>のロボットハンドからの力覚伝達の研究、吉田ら<sup>87)</sup>の力覚伝達を応用した手術用鉗子に関する研究などがある。擬似的な触覚・力覚呈示装置に関する研究は、装置の開発や基礎評価が行われているが、実社会への展開は行われていない。

## 触覚の医学的応用

触覚の医学的応用として、触覚を用いた検査装置の開発が行われてきている。例えば、糖尿病の早期発見及び進行予防のため、音叉を用いた内くるぶしの振動覚検査やアキレス腱反射検査<sup>88)</sup>、モノフィラメントテスト<sup>89)</sup>、Pin-prick Testや末梢神経伝導速度検査が行われている<sup>90)</sup>など多くの検査が実施されている。しかし、いずれの検査においても簡便かつ短時間に、そして正確に定量的な評価を実施しにくいという問題点が挙げられている。これらの問題に着目し、井野ら<sup>91)92)</sup>は糖尿病による触覚感覚障害を簡便かつ短時間に定量評価するための末梢神経障害の定量的評価のための足底感覚測定システム・評価装置を開発している。現在この評価装置は、臨床応用するため、検査時の刺激呈示速度や刺激呈示部位などを明確にするための基礎実験が行われている<sup>92)</sup>。伊達<sup>93)</sup>は疼痛治療・検査に関する医療機器として痛覚を定量的に分析する装置の開発を行っている。この評価装置は、装置がヒトへ呈示する電気刺激の感覚と、ヒトが知覚した疼痛の大きさを比較し、客観的に疼痛の大きさを計測している。現在、この装置は市

販され、慢性疼痛患者 50 名を対象とした評価が行われている。

触覚機能による診断が有効と期待されている領域として、近年増加傾向にある発達障害児の触覚機能を検査するツールとしての利用が挙げられる。現在、日本における発達障害の診断基準は、米国神経医学会から刊行されている、DSM-IV-TR<sup>94)</sup> や DSM-V<sup>95)</sup> に基いており、この中に触覚機能（触覚過敏・触覚鈍麻傾向）の検査が現段階では含まれていない。一方で発達障害児の多くは、触覚過敏・触覚鈍麻の特徴を示し<sup>96)</sup>、そのことが原因となってヒトや物体に触れることを嫌がり<sup>97)98)</sup>、その結果、触覚の言語表現（触覚感性語）がうまく伝わらず、コミュニケーションが取れないという問題が生じる。その結果、児童はヒトや物体に触れることをますます嫌がる、という悪循環に陥る。以上のように、触覚機能の不具合がコミュニケーション障害という発達障害の特徴の一因となっていることから、触覚機能の不具合の程度を適切に把握するための検査ツールの開発は非常に重要である。触覚機能の不具合が確認されたら、機能改善を図ることにより、コミュニケーション障害の程度を軽減することが可能になる。以上のことから、触覚過敏・触覚鈍麻の早期発見を目指した装置の開発が望まれる。

以上のように、触覚に関する研究では、図 1.4 に示されているように、生理学的研究によりヒトが触覚を知覚するための受容器の特徴や神経線維の電気生理学的知見が示され、また心理学的研究により触覚のマルチモーダル情報の統合過程の解明や触覚の錯覚現象の解明が行われ、そして工学的研究により触覚の産業応用・感覚代行などへの展開が行われている。

## 1.5 本研究の基礎実験

本研究の基礎研究として、要素触覚を合成させて行うという考え方（要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の 2 点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法）の簡易評価実験<sup>99)100)</sup>を行った。この基礎実験では、触覚を呈示する手法を提案するため、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できるという考え方を証明することが必要であり、その有効性を確認するための評価実験を行った。はじめに、要素触覚を合成させて触覚呈示するという考え方が正しいと仮定し、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法を定め、次に、ヒトに知覚させる刺激は 1.2 節に示す触覚の生理学的知見を参考とし、呈示する感覚を定義した。そして、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために、心理物理実験と先行研究の調査を行い、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できる触覚生成方法を評価するための簡易的な感覚呈示装置（触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の 5 つの感覚を工学



的に生成する装置)を試作した。この試作した装置を用いて、ヒトに基本触覚を擬似的に合成して呈示し、触覚が惹起されるかをどうかを評価した。この評価実験は、ヒトに試作した装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚(ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など)を惹起することができるかどうかを評価指標とし、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法を評価した。評価実験結果から、振動覚と温覚・冷覚の合成呈示時に要素触覚以外の任意の触覚(ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など)をヒトに惹起することができることが示された。一方で、触圧覚と温覚・冷覚の合成呈示時、そして痛覚と温覚・冷覚の合成呈示時においては、温度知覚のみが特徴的であり、簡易呈示装置は呈示した要素触覚以外の任意の触覚を被験者へ惹起できないという結果となった。この原因として、簡易呈示装置は5つの要素感覚を擬似的に生成させるための刺激を1つの条件で検討していたこと、また提案した呈示方法は要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法を用いたことを踏まえ考察する。前者については、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を条件付けたことにより生じた問題として考えられる。この問題を解消するためには、Ledermanら<sup>101)102)</sup>が行っている心理物理学的観点からの触知覚メカニズムに関する研究を参考とし、呈示するための物理量を機械的に分別する必要があると考える。後者については、特定の要素感覚の合成の場合でのみ、要素触覚以外の任意の触覚を被験者へ惹起できないことがわかっているため、このような要素感覚を多面体の頂点に配置して任

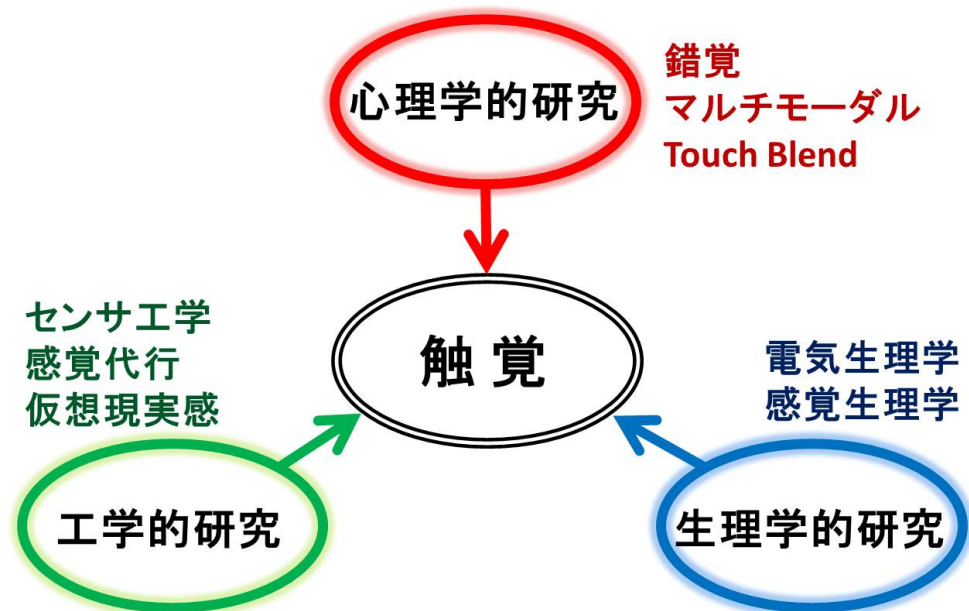


図 1.4: 触覚に関する先行研究

意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる触覚生成方法から、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する必要があると示唆された。詳細については、付録Bに示す。

## 1.6 本研究の位置づけと研究目的

現在の触覚デバイスの研究では、触圧覚や振動覚という単一感覚のセンシングや触覚呈示が行われており、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示することはできていない。一方で、1.4節に示しているように、糖尿病による末梢神経障害の定量的評価のための足底感覚評価装置や発達障害児の触覚機能を検査するための装置の開発など、触覚を用いた検査装置の開発が必要である。

以上から、本研究では1.4節に示している医学的な応用を目指し、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する新しい触覚呈示装置の開発を目的とする。はじめに、本研究の基礎研究として、要素触覚を合成させて触覚を呈示するという考え方の評価実験<sup>99)100)</sup>を行い、その結果から、機械的に合成可能な多次元空間モデルの必要性を示唆している<sup>100)</sup>ことから、基礎研究の成果や1.3節に示している触覚メカニズムの先行研究を調査し、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する。次に、提案した触覚呈示手法に基づいた触覚呈示装置の開発を行う。まず心理物理実験を行い、触覚呈示装置がヒトへ呈示する物理量を定める。そして、その心理物理実験結果から装置の仕様を定め、触覚呈示装置を開発する。開発した装置を用いて、ヒトへ触覚を生起することが可能であるかの評価実験を実施する。他方、触覚呈示装置の医学的応用として、1.4節に示している発達障害児の触覚過敏・触覚鈍麻の早期発見を目指した装置としての利用を提案する。

## 1.7 本論文の構成

アプローチ方法は、図1.5に示すように触覚呈示手法の提案と触覚呈示装置の開発である。

本論文の構成を以下に示す。

第2では、新しい触覚呈示装置を開発する。はじめに、触覚呈示手法として、1.3節に示している触覚メカニズムの先行研究を調査し、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する。次に、提案した触覚呈示手法に基づいた触覚呈示装置の開発を行う。ま

ず心理物理実験を行い，触覚呈示装置がヒトへ呈示する物理量を定める．そして，その心理物理実験結果から装置の仕様を定め，触覚呈示装置を開発する．開発した装置を用いて，ヒトへ触覚を生起することが可能であるかの評価実験を実施する．

第3章では，第2章で開発した触覚呈示装置の医療応用を目指し，1.4節に示している発達障害児の触覚過敏・触覚鈍麻の早期発見を目指した装置としての利用を提案する．ここでは，発達障害児の触覚過敏・触覚鈍麻診断装置を目指した評価実験を実施する．

第4章では，考察を述べる．はじめに，触覚呈示装置の産業応用の一例として，自動車の運転中などに生じる手腕系振動（Hand-transmitted vibration）のメカニズム解明に関する議論や，医療応用の一例として，触覚機能検査や触覚リハビリテーションへの展開について議論する．次に触覚の基礎評価として，ヒトが物体に触れた時の触覚メカニズムの感性工学実験の評価について述べる．この感性工学実験では，呈示する基準試料の条件や触覚時の視覚情報の重要性について議論し，今後の触覚の感性工学実験の指標を示す．そして，新しい触覚技術の展望について考察する．

最後に第5章では結論を述べる．

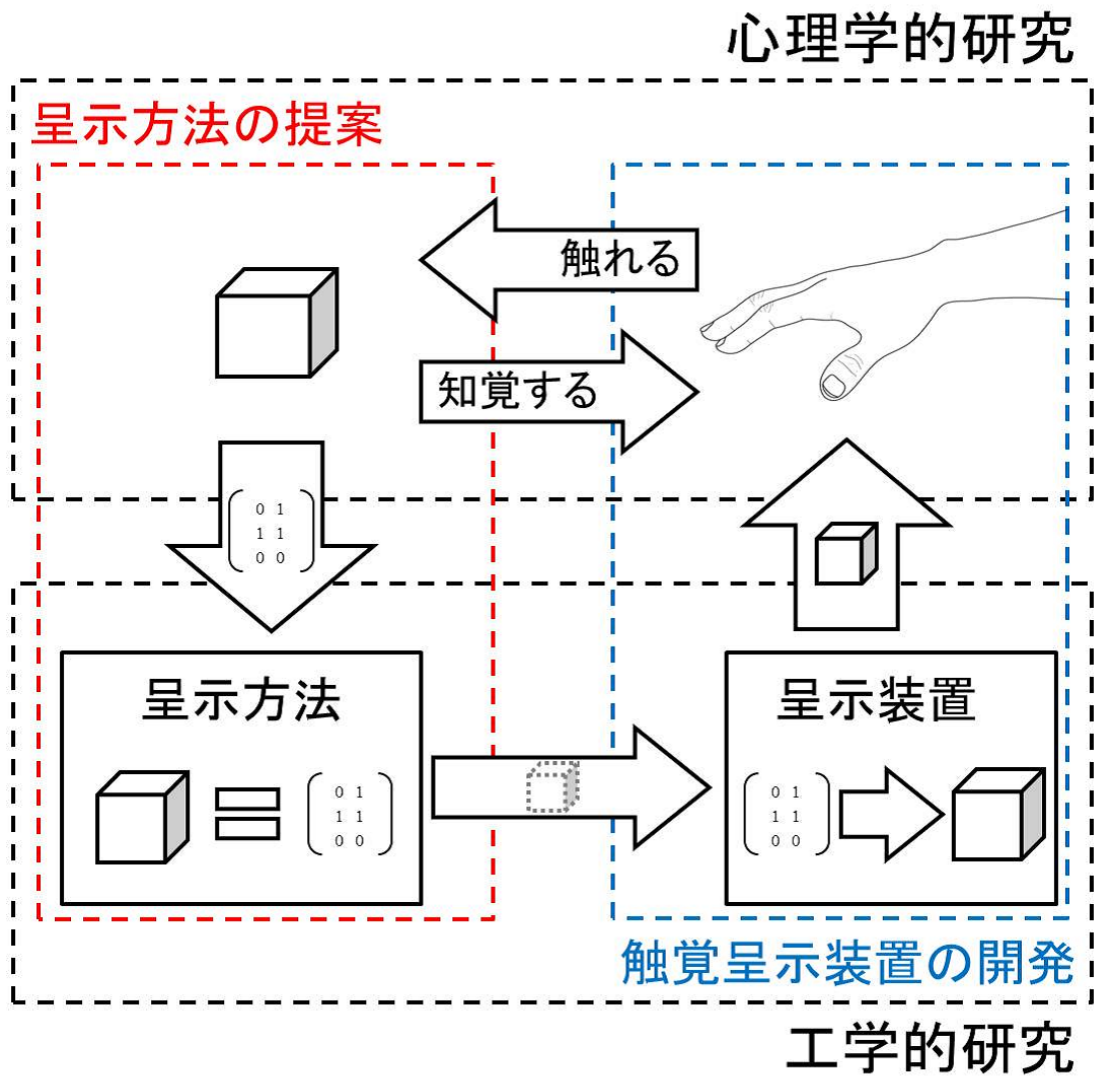


図 1.5: 本研究のアプローチ方法

## 第2章 新しい触覚呈示装置の開発

### 2.1 本章の目的

本章では、新しい触覚呈示装置を開発することを目指す。はじめに、触覚呈示手法として、第1章1.3節に示している触覚メカニズムの先行研究を調査し、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する。はじめに、本研究の基礎研究として要素触覚を合成させて行うという考え方（要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法）の簡易評価実験<sup>99)100)</sup>を行い、その結果から、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する機械的に合成可能な多次元空間モデルの必要性を示唆している<sup>100)</sup>。このことから、要素触覚を合成させて行うという考え方が正しいと仮定し、この方法に基づいた触覚呈示を実現するための要素感覚を定める。ここで、触覚呈示を実現するための必要な要素の選定のために、先行研究の調査を行う。素材・材質を変化させた場合の触覚メカニズムの解明に関する先行研究があり、例えば井野ら<sup>33)</sup>は5種類の試料を用いて材質感の識別実験を行い、早川ら<sup>34)</sup>は16種類の試料を用いて触り心地の分類を行い、また前野<sup>35)</sup>は20種類の試料を用いてヒトの触覚メカニズムの解明を行っている。加えて、ヒトが物体に触れるときの触覚メカニズムの解明として、Ledermanら<sup>101)</sup>の物体知覚時に知覚する情報をまとめたものがある。これらの研究を参考とし、触覚呈示を実現するための必要な要素の選定を行う。次に、ヒトに知覚させる刺激は第1章1.2節に示す触覚の生理学的知見を参考とし、呈示感覚量を定義する。そして、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために、心理物理実験と先行研究の調査を行う。これらを踏まえ、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できるという考え方を証明するための、触覚呈示装置を開発する。開発した装置を用いて、ヒトに基本触覚を擬似的に合成して呈示し、触覚が惹起されるかをどうかを評価する。この評価実験は、開発した装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）を惹起することができるかどうかを評価指標とする。この評価結果から、触覚呈示を実現する要素触覚を合成させて行う手法の有効性や装置の医学的な応用を考察する。

## 2.2 触知覚実験の先行研究調査

触知覚実験の先行研究を調査すると、心理物理学的観点におけるヒトが物体に触れるときの触知覚メカニズムの研究として、Lederman ら<sup>101)102)</sup>が物体との垂直方向知覚（硬さや全体形状、体積）、水平方向知覚（テクスチャや輪郭探索）、静止時知覚（温覚や冷覚）に加えて、深部感覚である物体重量を知覚していると定義した。また順応反応とは、持続刺激を受けることで刺激閾値が変動する現象である<sup>51)</sup>。これらの心理物理学的観点からの触知性を考慮し、感覚呈示において重要な要素は触圧覚・温覚と冷覚（温度変化）・呈示時間と考えられる。触圧覚は生理学的観点からも明らかな通り、感覚受容器である機械受容器の配置が最も多く、加えて順応反応が起こりやすいことでも知られている<sup>51)</sup>。温度変化は順応反応でも重要な要素として考えられる。呈示時間はヒトが物体を知覚するための順応反応や刺激の微細な変動により生じる振動覚もこれに含まれていると考えられる。

弾力性・硬度に関しては、機械受容器の中で領域が狭く圧力などのセンシングを行っているFA-I（マイスナー小体）、また領域が広く触圧刺激に対して持続的な皮膚変形をセンシングしているSA-I（メルケル触盤）への神経発射を促すことが必要であることが示唆される。粘度に関しては、井野ら<sup>33)</sup>の物体把持動作によるずれ知覚の閾値評価の先行研究により、刺激呈示速度 m/sec に依存する傾向（呈示速度依存性）が示されている。つまり、刺激を呈示する時間によりモダリティが変化することが考えられる。これと同様にテクスチャに関しても、刺激呈示速度に依存する傾向が考えられる。このことから、心理物理学的観点からの触知性で考察した呈示時間が要素として必要であることが考えられる。これらの情報をセンシングしている機械受容器として、Bensmaia ら<sup>103)</sup>はテクスチャに関する研究を行い、FA-II（パチニ小体）であると示されている。併せて、粘度などの摩擦係数による皮膚の横方向の伸びは、SA-II（ルフィニ終末）により情報をセンシングしていると考えられる。このことから、これらへの神経発射を促すことが必要であると示唆される。最後に、温点や冷点に関しては、触知覚メカニズムにおいて重要な要素である。温度受容器は機械受容器と複雑に神経発射が生じていると考えられる。

## 2.3 機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）の提案

先行研究で示されている成果から、心理物理学における物体の触知覚メカニズムを考慮し、感覚呈示において重要な要素は触圧覚・温覚と冷覚（温度変化）・呈示時間と

考察し、図 2.1 に示す、要素感覚を機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）“Haptic Map”（以下、提案した呈示手法を Haptic Map と記す）を提案する。

Haptic Map は、物理的に生成することが可能な 3 つの物理量を軸にもち、圧力軸（単位： $\text{N}/\text{m}^2$ ）・温度軸（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）・振動軸（単位： $\text{Hz}$ ）である。また、これらの軸に基づいた感覚呈示の他、複数の軸を機械的に合成し、触覚を呈示することができる。ここで、ヒトの触覚は生理学において、触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の 5 つの感覚要素により構成されていると示されている。一方で Haptic Map において、温覚・冷覚呈示の呈示物理量は温度変化で呈示することができ、また痛覚刺激は圧力値変化（面積一定の条件下）により呈示することができるため、5 つの物理量を 3 軸で機械的に合成し、触覚を呈示することが理論的には可能である。Haptic Map は、第 1 章 1.5 節で示した基礎研究<sup>100)</sup> で得られた結果から議論した、試作した装置の欠点である、5 つの要素感覚を擬似的に生成させるための刺激を 1 つの条件で検討していたことと、提案した物理的に生成することが可能な要素感覚により構成される触覚生成方法は要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の 2 点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法を用いたことの欠点を解消している。

Haptic Map は、ヒトが知覚している感覚の一般論であるウェーバー・フェヒナーの法則<sup>104)</sup> に従い、感覚中枢で知覚する感覚の強さ  $E$  と、末梢で知覚する物理的な刺激の強さ： $R$  を区別する。他の触覚を再現する研究ではこの区別が曖昧であり、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などが呈示できていないという問題が挙げられる。また被験者の触知覚の方法は、能動的触知覚<sup>3)</sup> を用いる。

## 2.4 新しい触覚呈示装置の仕様・条件

新しい触覚呈示装置（以下、触覚呈示装置と記す）を開発するため、以下のような条件を設定する。

- 指先などの末梢で知覚する物理量と感覚中枢で物体を知覚する感覚量を区別する。
- 触覚呈示装置は、電子素子を用いて物理量を生成し呈示するものであり、感覚量を呈示するものではない。
- 呈示方法は、被験者が自ら触覚呈示装置に触れ擬似的な触覚を体験する能動的触知覚<sup>3)</sup> とする。

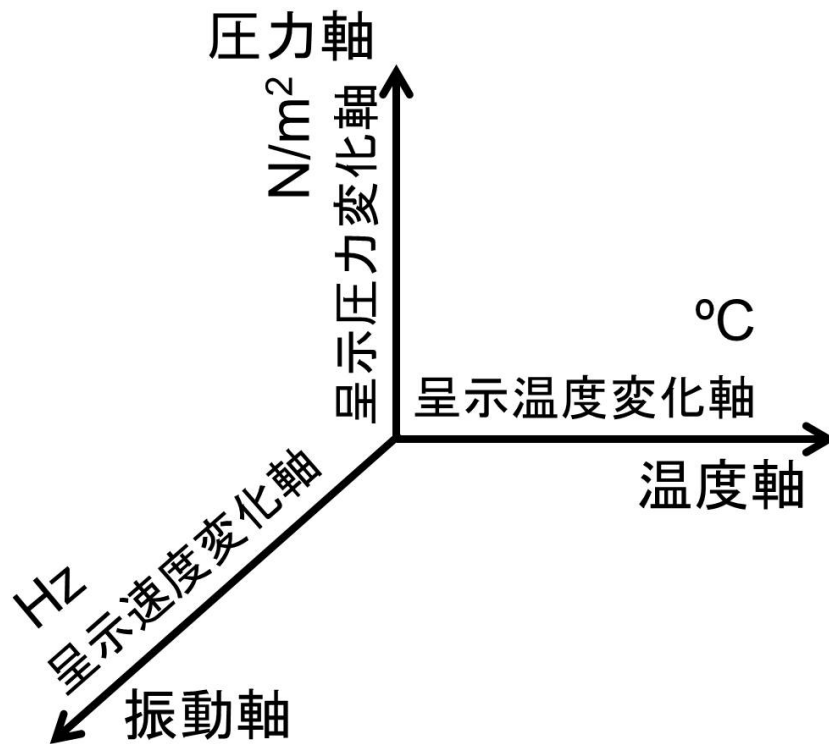


図 2.1: 要素感覚を機械的に合成可能な多次元空間モデル (呈示装置の制御方法) Haptic Map

## 2.5 触覚呈示装置による呈示感覚量の定義

触覚呈示装置が呈示し、ヒトに知覚させる刺激は第 1 章 1.2 節に示す触覚の生理学的知見を参考とし、以下のような素子を用いて生成する。

- 触圧覚を擬似的に生成させるための刺激は、被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とする。
- 振動覚を擬似的に生成させるための刺激は、音響用スピーカーを用いて呈示する物理刺激とする。
- 温覚を擬似的に生成させるための刺激は、ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする。
- 冷覚を擬似的に生成させるための刺激は、ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする。



- 痛覚を擬似的に生成させるための刺激は、触圧覚を擬似的に生成させるための刺激と同様、被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし、この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする。

## 2.6 触覚呈示装置が呈示すべき物理量の検討

2.5節で定義した基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために、心理物理実験と先行研究の調査を行う。

### 触圧覚

触圧覚は、ヒトが物体に触れた時に生起する感覚である。能動的触知覚により触圧覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、触覚呈示装置では圧力センサによる圧力値制御方法を用いる。圧力センサにより装置表面の圧力値（被験者が触れている圧力値）をアナログオシロスコープで実験者が計測する。この計測結果を被験者へ口頭でフィードバックし、被験者自身が触覚呈示装置から被験者に加えられる圧力を制御する。これにより、被験者へ能動的触知覚により触圧覚を擬似的に生成させるための刺激を生起させることができる。はじめに、ヒトが触覚呈示装置に触れている状態での触圧覚の物理量を測定する被験者10名の心理物理実験を実施した。実験結果から、ヒトが簡易呈示装置に触れている状態での触圧覚の物理刺激強度は $1.5 \text{ N/m}^2$ 得られ、触圧覚を擬似的に生起させるための圧力を $15 \text{ N/m}^2$ とする。なお、この値は心理物理実験により得られた刺激強度 $1.5 \text{ N/m}^2$ と区別すること、またウェーバー・フェヒナーの法則に従い、感覚量としては2倍相当とするを考慮して設定した。

### 振動覚

振動覚は、ヒトが物体に触れた時の時間変化により生起する感覚である。振動覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、音響用スピーカーを用いる。Geldard<sup>16)</sup>はヒトが最も敏感に反応する振動周波数を $200 \text{ Hz}$ と心理物理学実験よりに明らかにしている。そのため、被験者に振動覚を擬似的に生成させるための刺激は、1章1.2節の触覚の生理学的知見から、振動周波数を最大 $300 \text{ Hz}$ 程度と設定した。

### 温覚

温覚は、ヒトが物体に触れている状態が続くことで生起する感覚である。温覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、ペルチェ素子を用いる。被験者に呈示する感覚量  $T$  は、第1章 1.2 節の触覚の生理学的知見からおよそ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  とする。

### 冷覚

冷覚は、温覚同様、ヒトが物体に触れている状態が続くことで生起する感覚である。冷覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、ペルチェ素子を用いる。被験者に呈示する感覚量  $T$  は、第1章 1.2 節の触覚の生理学的知見からおよそ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  とする。

### 痛覚

痛覚は、ヒトが物体に触れる面積変化や圧力変化により生起する感覚である。能動的触知覚により痛覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、触覚呈示装置では、触圧覚と同様、圧力センサによる圧力値制御方法を用いる。被験者が簡易呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし、この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする。なお、この呈示方法は、力 (N) 変化と面積 ( $\text{m}^2$ ) 変化があるが、本研究では力変化 (呈示面積一定) とする。痛覚を擬似的に生起させるための圧力は、触圧覚の閾値  $1.5\text{ N/m}^2$  や触圧覚の物理量  $15\text{ N/m}^2$  と区別し、 $45\text{ N/m}^2$  程度とする。

次に、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための3軸を用いた呈示方法を述べる。

### 圧力軸

圧力軸では、5つの物理量のうち触圧覚と痛覚を呈示する。能動的触知覚により触圧覚と痛覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、触覚呈示装置では圧力センサによる圧力値制御方法を用いる。

### 温度軸

温度軸では、5つの物理量のうち温覚と冷覚を呈示する。温覚と冷覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、ペルチェ素子を用いる。

## 振動軸

振動軸では、5つの物理量のうち振動覚を呈示する。振動覚呈示するため、入力インピーダンス  $8\ \Omega$ 、電力量  $0.25\ \text{W}$  の音響用スピーカー ( $\phi 18\text{mm}$ )、入力アンプ、正弦波信号発生装置 (GEINSTEK 社製, SFC-2110) を用いる。本スピーカーにより、呈示する振動の周波数を変化させることが可能である。周波数変化は、ファンクションジェネレーター (GEINSTEK 社製, SFG-2110) を用いて振動を生成し、この信号をこのスピーカーにアンプを入力し信号を増幅させた後、スピーカーへ信号を入力する。

## 2.7 触覚呈示装置の設計

触覚呈示装置は、図 2.2A に音響用スピーカー (入力インピーダンス  $8\ \Omega$ 、電力量  $0.25\ \text{W}$ 、 $\phi 18\ \text{mm}$ )、図 2.2B に触覚呈示装置表面保護用合成ゴム、図 2.2C に圧力センサ (Interlink Electronics 社製, FSR406,  $W43.7 \times D43.7 \times H1.2\ \text{mm}$ )、図 2.2D に温覚・冷覚呈示用ペルチェ素子 2 枚 (どちらも HB Electronic Components 社製, TEC1-12706,  $W40 \times D40 \times H3.8\ \text{mm}$ )、図 2.2E に放熱フィン、図 2.2F に放熱ファンにより構成されている。併せて、触覚呈示装置は、図 2.3 に示す通り、装置本体、直流安定化電源 (TEXIO 社製, PW18-1.8AQ)、アナログオシロスコープ (TEXIO 社製, CS-4125A)、入力アンプ、正弦波信号発生装置 (GEINSTEK 社製, SFC-2110) により構成されている。触覚呈示装置本体は、およそ  $W100 \times D150 \times H120\ \text{mm}$  である。

### 圧力センサの校正

能動的触覚により触圧覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、触覚呈示装置では圧力センサによる圧力値制御方法を用いる。具体的な方法は、アナログオシロスコープ (TEXIO 社製, CS-4125A) に、図 2.6 に示す圧力センサ (Interlink Electronics 社製, FSR406,  $W43.7 \times D43.7 \times H1.20\ \text{mm}$ ) の値を表示させることで、圧覚値を制御することができる。図 2.7 に計測回路を示す。ここで、圧力センサと直列に  $1.0\ \text{k}\Omega$  を接続した。原理として、圧力センサは抵抗値の変化により荷重  $\text{kgf}$  を出力するものであり、抵抗値ではアナログオシロスコープにより制御を行うことができない。そのため、抵抗分圧回路を用いて圧力センサの抵抗値を電圧値に変化させる必要がある。加えて、圧力センサの特性において負荷がかかることで対数的に減少することが示されており、無負荷時の抵抗値は約  $1\ \text{M}\Omega$  であることから、ヒトが僅かに触れた時の圧力値を正確に出力で

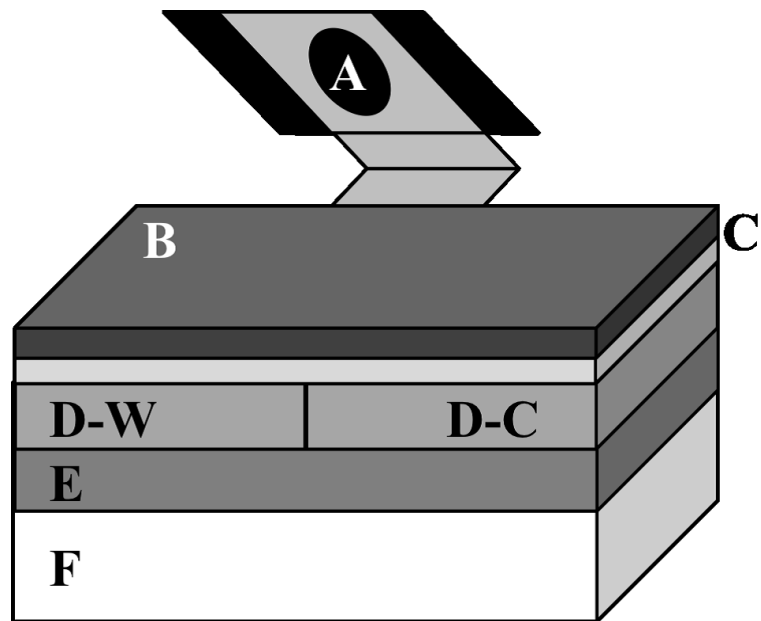


図 2.2: 触覚呈示装置本体の概略図

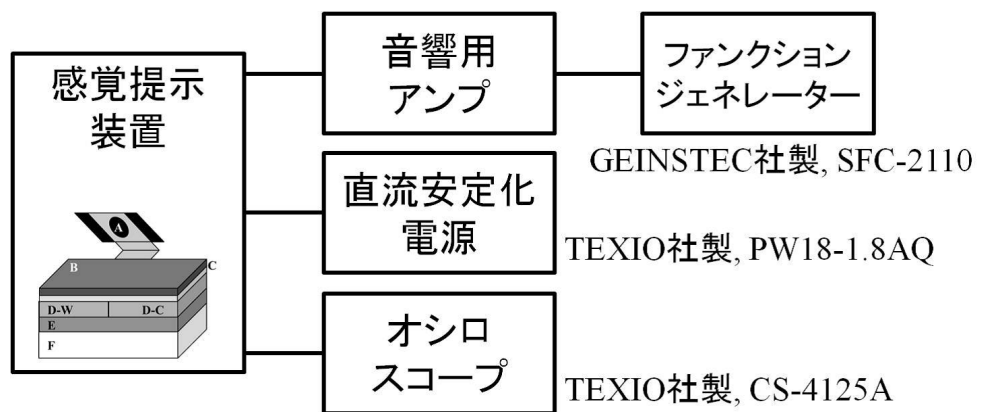


図 2.3: 触覚呈示装置の構成図

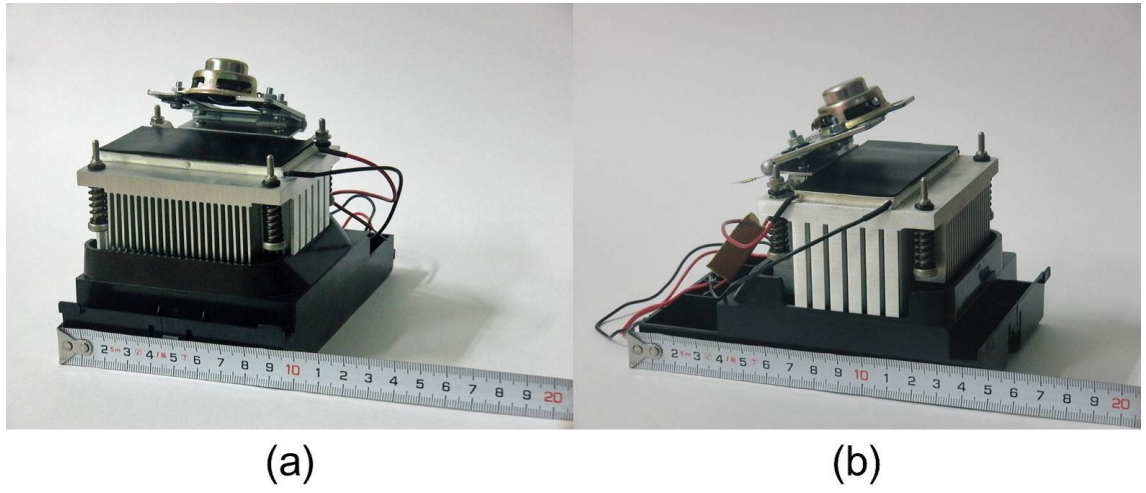


図 2.4: 触覚呈示装置の外観図

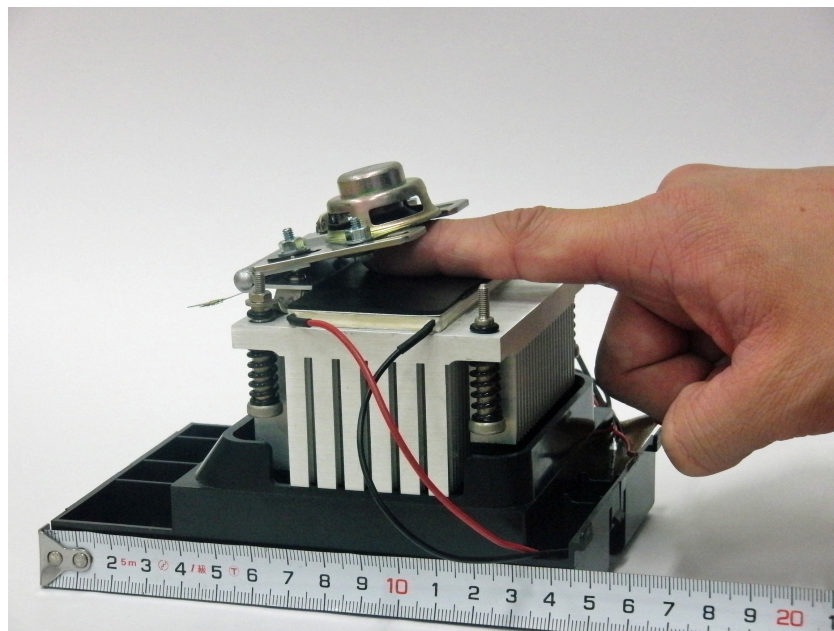


図 2.5: 触覚呈示装置の実装例

きないため、200 k $\Omega$  の抵抗を並列に接続することでこの問題を解消した。抵抗分圧回路を用い、その分圧電圧の出力値をアナログオシロスコープへ入力する。この圧力センサの校正を行う。

はじめに、入力電圧  $V_F$  は式 (2.1) で示される。

$$V_F = \frac{r}{1.0 \times 10^3 + r} \times 3[V] \quad (2.1)$$

ここで、 $r$  は式 (2.2) で示される。

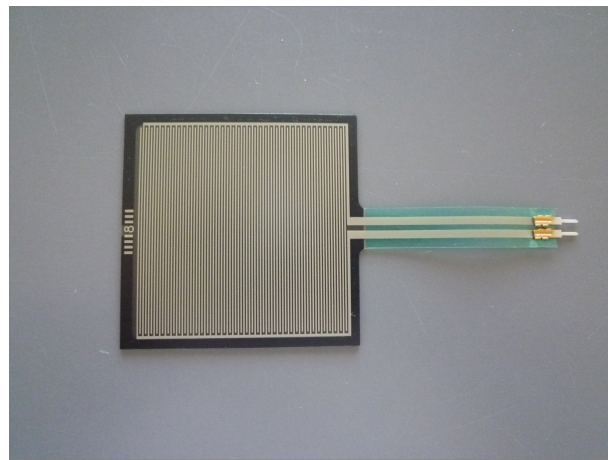


図 2.6: 触覚呈示装置に用いた圧力センサ FSR406

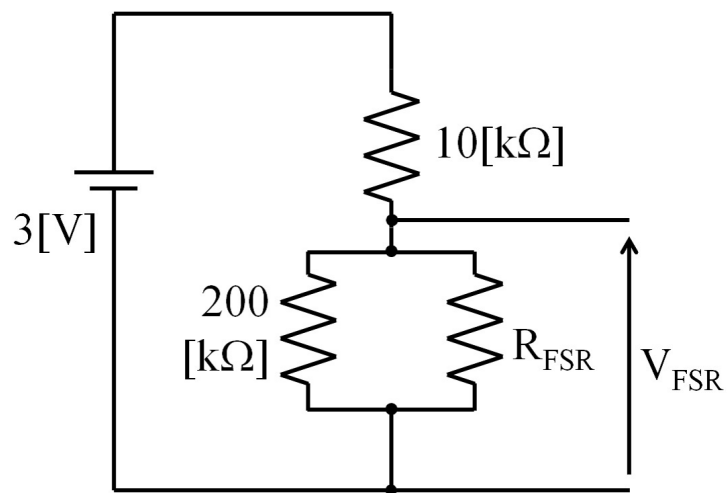


図 2.7: 圧力値測定回路

$$r = \frac{200 \times 10^3 \times R_{FSR}}{200 \times 10^3 + R_{FSR}} [\Omega] \quad (2.2)$$

以上の式(2.1), 式(2.2)より, 出力電圧は計算することが可能である. 次に, 圧力センサに0.1 kg から5.0 kg の荷重を与えた場合の抵抗値特性試験を実施し, 評価実験において式(2.1)と式(2.2)を用いて圧力センサに荷重を与えた場合の抵抗値を算出する. 算出した結果から, 呈示面積などを考慮したうえでの圧力  $\text{N/m}^2$  に換算した結果を図2.8に示す. この結果をもとに呈示すべき荷重, 測定すべき抵抗値を決定する.

### 触圧覚

2.6節に示している通り, 触圧覚を擬似的に生起させるための圧力は,  $15 \text{ N/m}^2$  とする. なお, この値は心理物理実験により得られた刺激強度  $1.5 \text{ N/m}^2$  と区別すること, またウェーバー・フェヒナーの法則に従い, 感覚量としては2倍相当とするを考慮して設定した. 図2.8より, 刺激強度が  $15 \text{ N/m}^2$  の場合の圧力センサの抵抗値はおよそ  $0.8 \text{ k}\Omega$  であることから, この時の出力電圧値は以下の式(2.4)より算出すると,  $3 \text{ V}$  から  $1.6 \text{ V}$  電圧値が降下した場合, 触覚呈示装置は触圧覚を擬似的に生起させるための圧力  $15 \text{ N/m}^2$  を生成することができる.

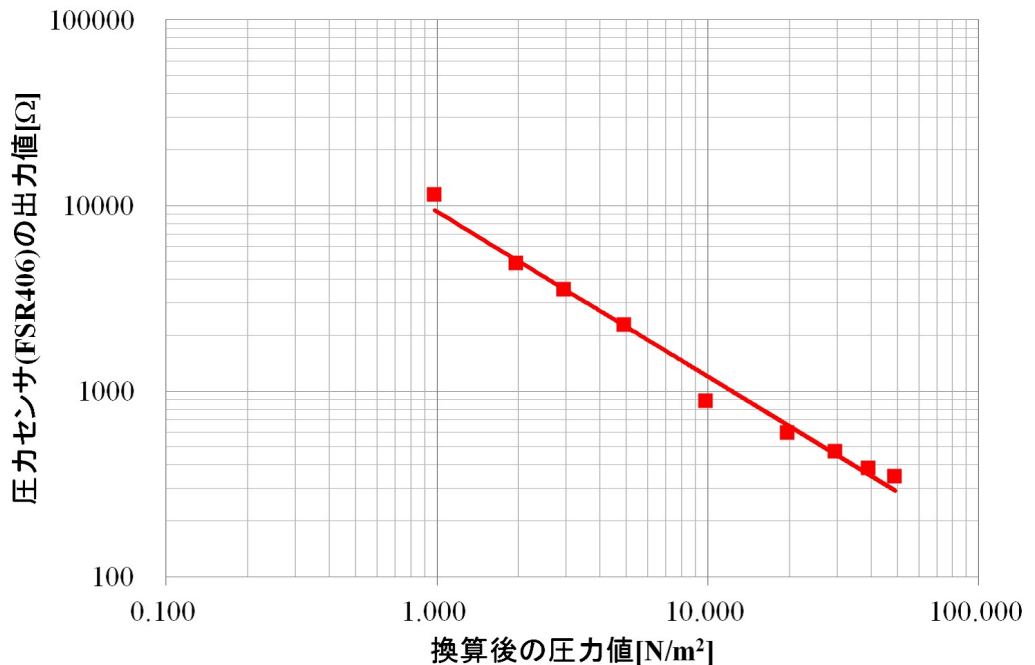


図 2.8: 圧力センサ抵抗特性試験結果をもとに換算した結果

$$r = \frac{200 \times 10^3 \times R_{FSR}}{200 \times 10^3 + R_{FSR}} = \frac{(200 \times 10^3) \times (0.8 \times 10^3)}{(200 \times 10^3) + (0.8 \times 10^3)} \cong 797[\Omega] \quad (2.3)$$

$$V_F = \frac{r}{1.0 \times 10^3 + r} \times 3 = \frac{797}{1.0 \times 10^3 + 797} \times 3 \cong 1.33[V] \quad (2.4)$$

## 痛覚

2.6節に示している通り，痛覚を擬似的に生起させるための圧力は，45 N/m<sup>2</sup> とする．これは，被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし，この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする．なお，この物理量では，力 (N) 変化と面積 (m<sup>2</sup>) 変化があるが，本研究では力変化（呈示面積一定）として定義する．図 2.8 より，物理刺激強度が 45 N/m<sup>2</sup> 場合の圧力センサの抵抗値はおよそ 0.3 k $\Omega$  であることから，この時の出力電圧値は以下の式 (2.6) より算出すると，3 V からおよそ 2.3 V 電圧値が降下した場合，触覚呈示装置は触圧覚を擬似的に生起させるための圧力 45 N/m<sup>2</sup> を生成することができる．

$$r = \frac{200 \times 10^3 \times R_{FSR}}{200 \times 10^3 + R_{FSR}} = \frac{(200 \times 10^3) \times (0.3 \times 10^3)}{(200 \times 10^3) + (0.3 \times 10^3)} \cong 300[\Omega] \quad (2.5)$$

$$V_F = \frac{r}{1.0 \times 10^3 + r} \times 3 = \frac{300}{1.0 \times 10^3 + 300} \times 3 \cong 0.69[V] \quad (2.6)$$

## ペルチェ素子の校正

温覚と冷覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示する物理量を算出するため，式 (2.7) の伊東<sup>105)</sup>による皮膚の温度変化の算出式を用いる．図 2.9 にフーリエの法則を示す．ここで  $\lambda_1$  はヒトの皮膚の熱伝導率：0.21， $\lambda_2$  は触覚呈示装置表面を覆う素材としてシリコーンゴムの熱伝導率：0.16 である．また， $T$  は皮膚表面の温度であり， $X$  は触覚呈示装置が呈示する温度である．

$$\lambda_1(36 - T) = \lambda_2(T - X) \quad (2.7)$$

温覚と冷覚を呈示した時の皮膚表面の温度  $T_W$ ， $T_C$  を定義した後，触覚呈示装置が呈示すべき温度呈示量  $X$  を決定する．

温覚と冷覚の物理量を呈示するため，直流安定化電源（TEXIO 社製，PW18-



1.8AQ) と IC 温度センサ (LM60, National Semiconductor 社製) を用いた触覚呈示装置表面温度特性試験を実施する。実験方法は装置中央 (図 2.2 (E) と図 2.2 (F) の境界) に温度センサを貼り入力電源 3.0 V から 6.0 V と入力電流 0.5 A から 1.5 A を印加 (全 21 パターン × 3 回実験実施) した時の温度特性を計測する。触覚呈示装置表面の温度は 80 秒経過時に一定値に収束している結果が示され, この時の温度変化は温覚呈示時でおよそ ± 1.38 °C であり, 冷覚呈示時でおよそ ± 1.35 °C である。触覚呈示装置表面の温度を被験者が触れることで, 温覚・冷覚を呈示する。ペルチェ素子の温度特性値試験結果を図 2.9 に示す。フーリエの法則により, 呈示すべき温度物理量を算出した後, この結果をもとにペルチェ素子に印加すべき電流・電圧値を決定する。はじめに, ペルチェ素子への無入力時の触覚呈示装置表面温度から被験者に呈示する感覚量  $T$  を算出した結果, およそ 30 °C と示された。

## 温覚

触覚呈示装置による温覚を擬似的に生成させるための刺激は, 算出した結果, 45.3 °C の物理刺激と設定する。また, その要求に対応する印加電圧・印加電流は, 図

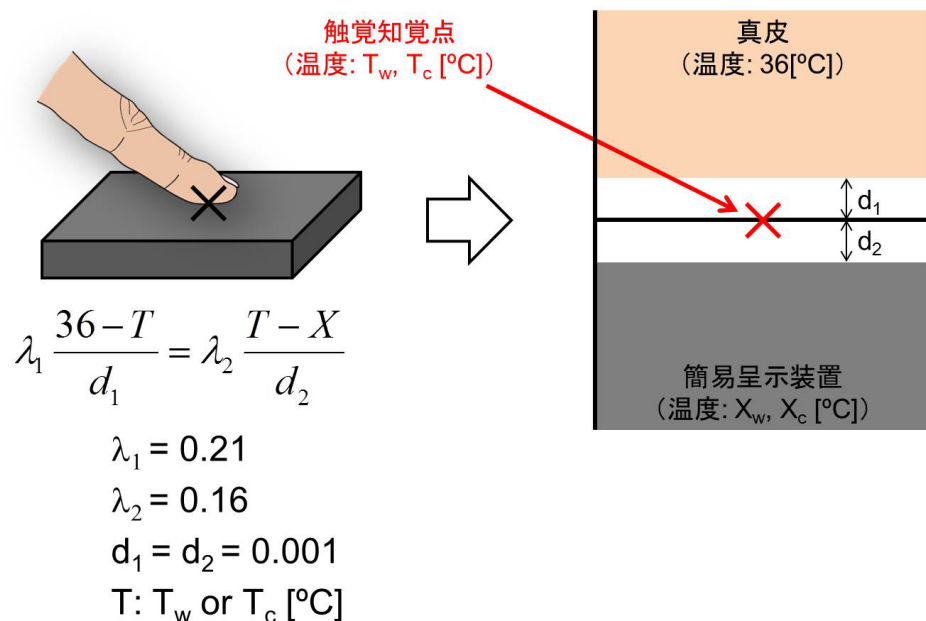


図 2.9: フーリエの法則と呈示すべき温度

文献<sup>105)</sup>を改変。

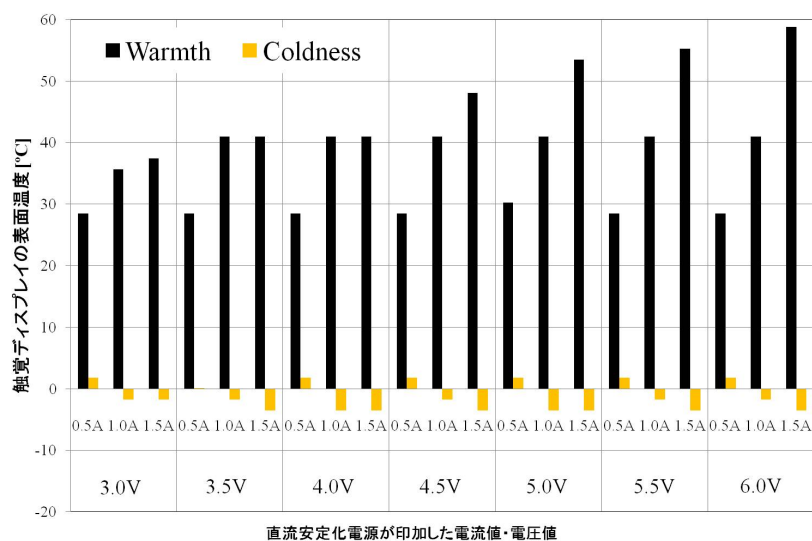


図 2.10: ペルチェ素子の温度特性試験結果

2.10 に示すペルチェ素子の温度特性試験結果から、印加電圧 4.5 V、印加電流 1.5 A の場合と示され、この印加電圧・印加電流と設定する。

## 冷覚

触覚呈示装置による冷覚を擬似的に生成させるための刺激は、算出した結果、 $-1.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  の物理刺激と設定する。また、その要求に対応する印加電圧・印加電流は、図 2.10 に示すペルチェ素子の温度特性試験結果から、印加電圧 4.5 V、印加電流 1.5 A の場合と示され、この印加電圧・印加電流と設定する。

## 音響用スピーカーの校正

触覚呈示装置に用いる音響用スピーカーの音圧レベルを計測するため、図 2.11 に示すような音圧レベルの計測実験を行った。その結果、印加周波数の変化による出力の変化はないことが示された。

ヒトが触覚呈示装置から受ける刺激の振動覚知覚閾値を測定する被験者 6 名の心理物理実験を実施した。振動覚の呈示物理量を定義するための予備実験では、触覚呈示装置が呈示する振動覚物理量の周波数を変化させた時の閾値を評価した。振動覚の呈示方法は上下法とした。実験環境は室内温度  $18.3 \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室内湿度  $58.0 \pm 5.8\%$  であった。図 2.12 に示す実験結果から、ヒトが触覚呈示装置から振動覚を知覚することができた振動周波数は  $80 \sim 300\text{ Hz}$  と示され、こ

の周波数帯を等分に分割した 100 Hz, 140 Hz, 180 Hz, 220 Hz, 260 Hz と設定した。

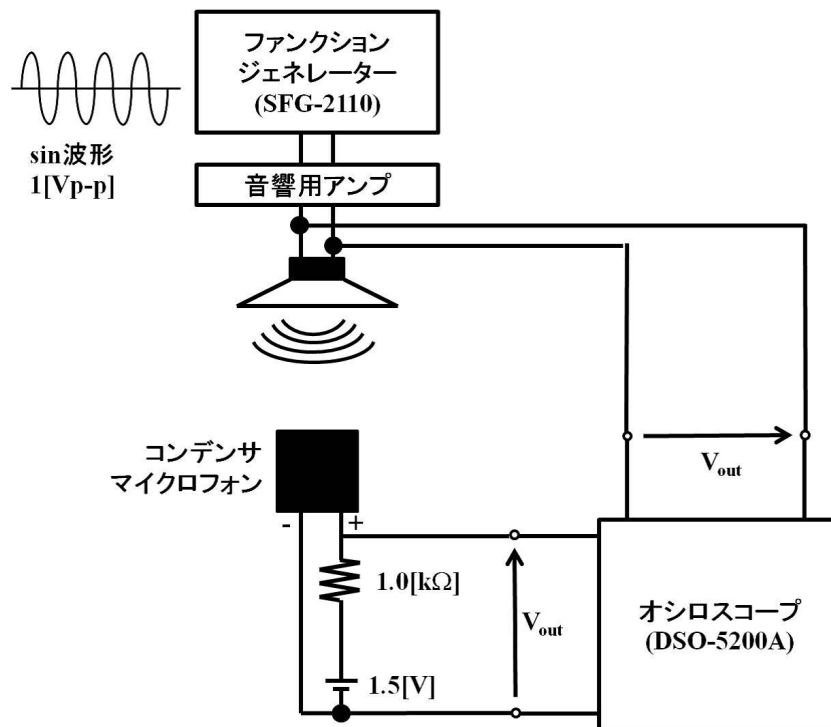


図 2.11: 音圧レベル試験方法

## 振動覚

触覚呈示装置による振動覚を擬似的に生成させるための刺激は、呈示する音響用スピーカーへ印加する信号の振動周波数が 100 Hz, 140 Hz, 180 Hz, 220 Hz, 260 Hz の正弦波と設定する。

## 2.8 触覚呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚

以上の心理物理計測実験や先行研究の調査から、Haptic Map の 3 軸が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚を表 2.1 に、また触覚呈示装置を用いて呈示する 5 つの要素感覚の物理量とヒトが知覚する感覚を表 2.2 にまとめる。これらの物理量が触覚呈示装置の要求仕様である。そして、図 2.13 に、3 軸が呈示する物理量と使用する電子素子をまとめる。

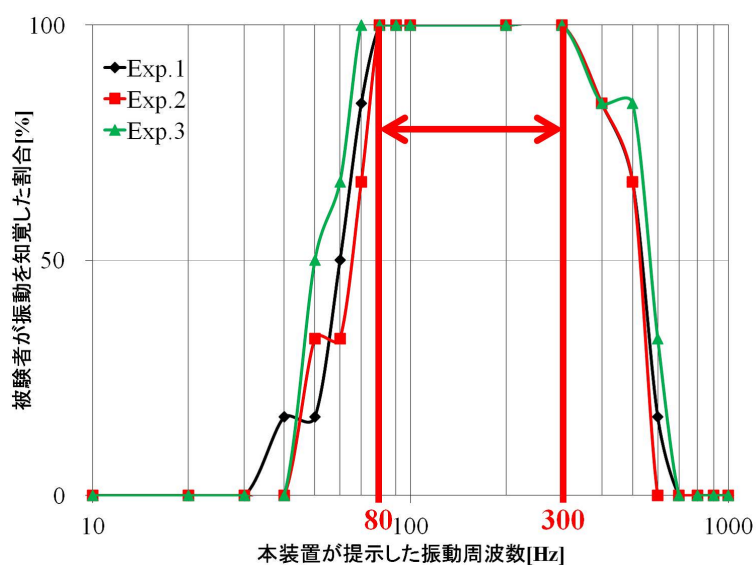


図 2.12: 振動覚の知覚閾値測定結果

表 2.1: Haptic Map の 3 軸が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚

3 軸	ヒトが知覚する感覚	使用する電子素子	呈示する物理量
圧力軸	触圧覚と痛覚	圧力センサ	1.5 ~ 45 [N/m <sup>2</sup> ]
振動軸	振動覚	音響用スピーカー	100, 140, 180, 220, 260 [Hz]
温度軸	温覚と冷覚	ペルチェ素子	-1.00 ~ 45.3 [°C]

表 2.2: 触覚呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚

ヒトが知覚する感覚	使用する電子素子	呈示する物理量
触圧覚	圧力センサ	15 [N/m <sup>2</sup> ]
振動覚	音響用スピーカー	100, 140, 180, 220, 260 [Hz]
温覚	ペルチェ素子	45.3 [°C]
冷覚	ペルチェ素子	-1.00 [°C]
痛覚	圧力センサ	45 [N/m <sup>2</sup> ]

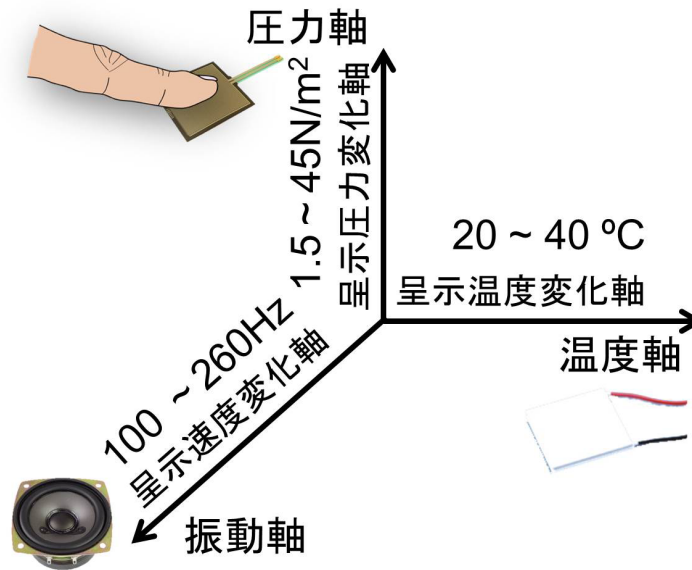


図 2.13: 触覚提示装置の物理的制御方法 Haptic Map の仕様

## 2.9 評価実験方法

本評価実験は、ヒトに試作した装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）を惹起することができるかどうかを評価した。被験者は被験者8名（男性6名，女性2名，年齢  $22.5 \pm 1.60$  歳）とした。表 2.3 に、図 2.14 のように測定した被験者8名の個体値（年齢，指長，指幅，指高，爪長）を示す。計測は，触覚提示装置に触れる中指とした。

評価実験方法は，触覚提示装置が図 2.1 に示す Haptic Map に基づき，2軸を合成して呈示した場合（圧力軸と温度軸，圧力軸と振動軸，温度軸と振動軸）と3軸を合成して呈示した場合（圧力軸と温度軸と振動軸），被験者がどのような感覚を知覚しているかを評価する方法とした。被験者の回答方法は，口頭回答方式とした。

回答結果の分類方法として，触覚提示装置が生成した感覚（触圧覚・振動覚・温覚・

表 2.3: 被験者8名の個体値（年齢，指長，指幅，指高，爪長）

被験者 番号	年齢 [歳]	指の 長さ [mm]	指の 幅 [mm]	指の 高さ [mm]	爪の 長さ [mm]
平均	22.5	74.4	15.3	12.4	11.5
偏差	1.60	3.37	1.76	1.81	1.46

冷覚・痛覚)以外の知覚した感覚(例えば、痒いや痺れるなど)を知覚しているかという点に着目する。

この回答結果を Haptic Map にプロットする。評価結果の Haptic Map の区分として、○(知覚した人数: 0 人, 0%), ●(知覚した人数: 0~4 人未満, 0~50% 未満), ●(知覚した人数: 4~8 人未満, 50~100% 未満), そして●(知覚した人数: 8 人, 100%)へと段階ごとに区分する。

## 2.10 評価実験結果

図 2.15 に圧力軸の値が  $1.5 \text{ N/m}^2$  の場合の振動軸と温度軸を合成して提示した Haptic Map を示す。この時の評価結果は、振動軸と温度軸を合成して提示した場合の結果である。図 2.16 に圧力軸の値が  $15 \text{ N/m}^2$  の場合の振動軸と温度軸を合成して提示した Haptic Map を示す。この時の評価結果は、圧力軸(触圧覚)と振動軸、温度軸の 3 軸を合成して提示した場合の結果である。図 2.17 に圧力軸の値が  $45 \text{ N/m}^2$  の場合の振動軸と温度軸を合成して提示した Haptic Map を示す。この時の評価結果は、圧力軸(痛覚)と振動軸、温度軸の 3 軸を合成して提示した場合の結果である。

これらの結果から、圧力軸と温度軸を組み合わせる場合、提示した感覚以外を知覚した被験者は比較的少ないことが示された。一方、圧力軸と振動軸を組み合わせる場合、多くのプロット点において、提示した感覚以外を知覚した被験者が多くであることが示された。例えば、圧力軸  $15 \text{ N/m}^2$  と振動軸  $140 \text{ Hz}$  を組み合わせる場合、被験者 A は中指腹部がぐにゃぐにゃするという表面テクスチャ

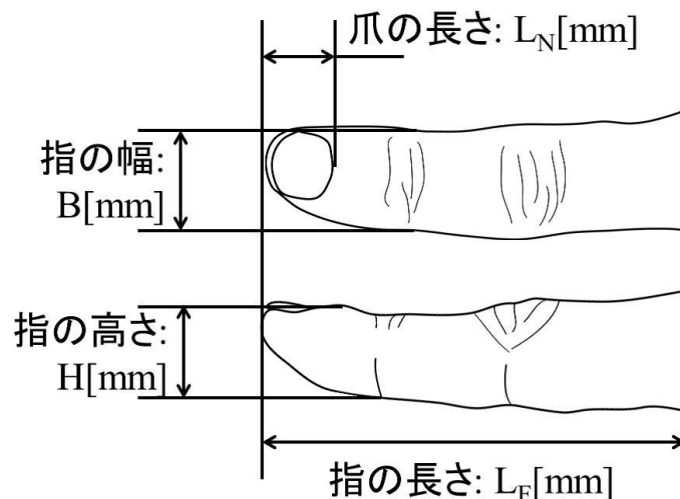


図 2.14: 個体値の測定方法

に関する回答があった。また、被験者 C, D, G, H は痺れのような感覚があると回答した。この場合、8名中5名の被験者は呈示した感覚以外の触覚を知覚した。

最後に温度軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合と同様に多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。例えば、温度軸 40 °C と振動軸 220 Hz を組み合わせて呈示した場合、被験者 B, C, H は痺れのような感覚があると回答し、被験者 D, G は痒みがあると回答した。特に痒みについては温度軸 20 °C の場合では生起されておらず痺れとは異なった温度変化により生じていると示された。以上のように、振動軸と圧力軸・温度軸を組み合わせることで、呈示した感覚以外の触覚を生起させることができることが示された。

図 2.16 と図 2.17 には、圧力軸・振動軸・温度軸の 3 軸を合成して呈示した Haptic Map を示す。この結果から、2 軸を組み合わせて呈示した結果とは異なり、呈示した感覚以外の触覚を知覚しやすいことが示された。これらのプロット点で最も触覚を生起させることができた点として、圧力軸 45 N/m<sup>2</sup> と温度軸 20 °C と振動軸 140 Hz, 圧力軸 45 N/m<sup>2</sup> と温度軸 40 °C と振動軸 220 Hz の 2 点が挙げられ、それぞれ 8 名中 6 名の被験者が呈示した感覚以外の触覚を知覚した。本評価結果から、Haptic Map に基づいた触覚呈示装置を用いて、被験者に触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚を工学的に再現し、それらの要素感覚を合成することで被験者の指先に呈示した感覚以外の感覚（表面テクスチャ変化や指先の痺れなど）を生起させることが可能であることが示された。

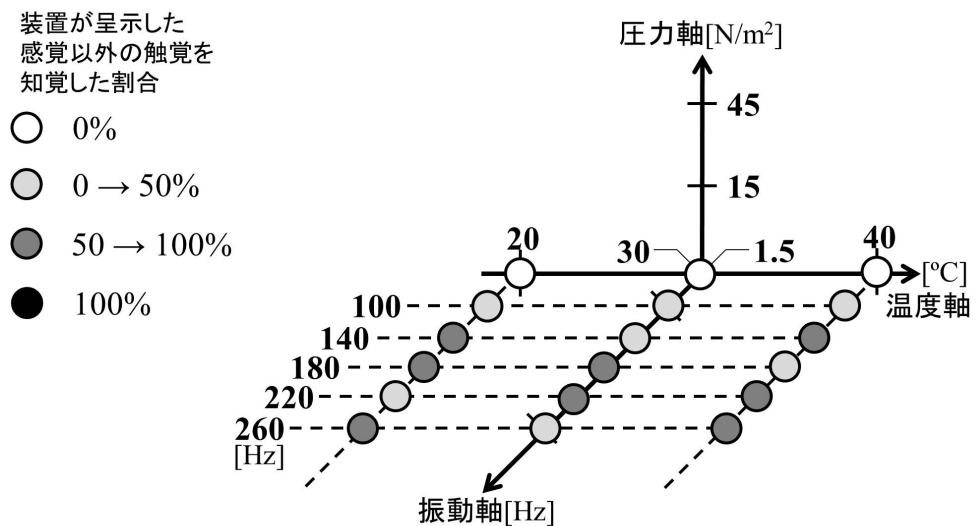


図 2.15: 圧力軸の値が 1.5 N/m<sup>2</sup> の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果

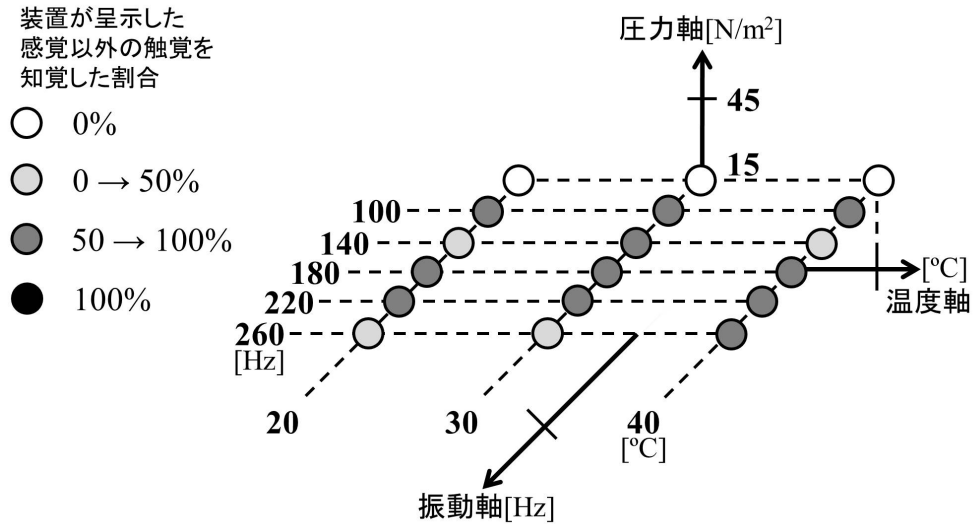


図 2.16: 圧力軸の値が 15 N/m<sup>2</sup> の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果

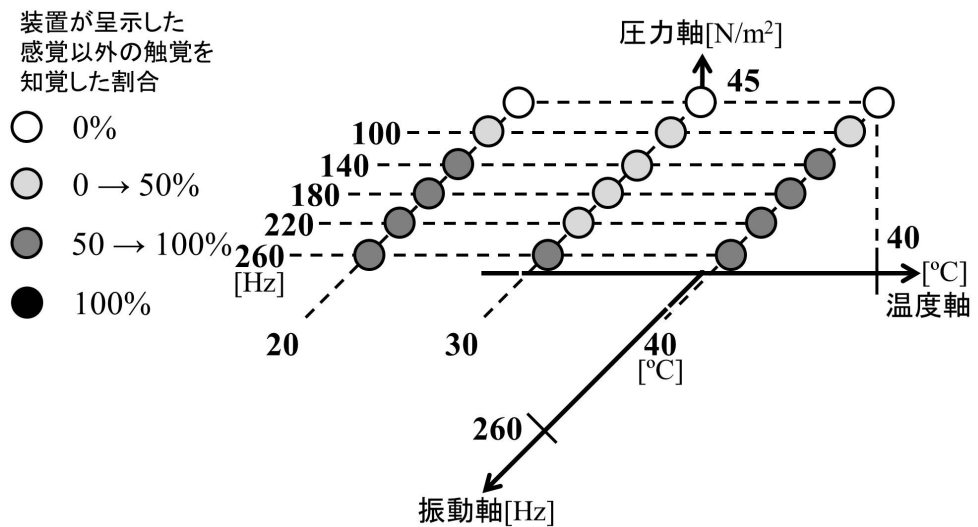


図 2.17: 圧力軸の値が 45 N/m<sup>2</sup> の場合の振動軸と温度軸を合成して呈示した評価実験結果

## 2.11 本章の考察

Haptic Map による、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示する方法の有効性を確認するための評価実験を行った。評価実験結果から、圧力軸と温度軸を組み合わせで呈示した場合、呈示した感覚以外を知覚した被験者は比較的少ないことが示された。



一方、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。温度軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合と同様に多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。本評価結果から、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）Haptic Mapに基づいた触覚呈示装置を用いて、被験者に触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚を工学的に再現し、それらの要素感覚を合成することで被験者の指先に呈示した感覚以外の感覚（表面テクスチャ変化や指先の痺れなど）を生起させることが可能であることが示された。

ここで、Haptic Mapや触覚呈示装置と、他の触覚デバイスの研究の比較を行う。はじめに、近年のバーチャルリアリティシステムにおける触覚を擬似的に再現する研究と比較すると、浅村ら<sup>106)</sup>が提案した上下に振動するピンによる機械的刺激による触感を呈示する方法や南澤ら<sup>84)</sup>が提案した物体把持時の指先の垂直力とせん断力を再現する機構によるバーチャルな物体の質量を呈示する方法などがある。これらの装置は、ヒトが普段触れているモノのテクスチャや重量を擬似的にフィードバックすることで、あたかも触れているような触覚をヒトの感覚中枢へ直接物体の触覚情報や力覚などの感覚量を呈示する特徴がある。特にアミューズメントでの利用に際しては、南澤ら<sup>84)</sup>の方法により、ヒトへ触感を直接呈示することでリアリティがあるという感情を想起させることができるため、研究の目的は達成されているといえる。一方で、触覚は生理学的分類<sup>5)</sup>によると触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つと定義されているが、これらの方法では触圧覚や触力覚という触覚の単一要素のみを限定的に呈示しているということから、生理学的分類による触覚とは言いがたい。さらに、他の研究者が行っている近年の触覚を再現する方法では、ヒトの指先などの末梢で知覚する物理量とヒトが感覚中枢で物体を知覚する感覚量を区別しておらず、被験者が感覚中枢で知覚した触覚を回答するという方法で評価実験を実施している。他方、本研究では物理量と感覚量を区別し呈示する方法により、触覚を惹起させることが可能であることが示された。また提案したHaptic Mapは、本研究の基礎実験<sup>99)100)</sup>で得られた結果から論じた、簡易呈示装置は5つの要素感覚を擬似的に生成させるための刺激を1つの条件で検討していたこと、また提案した触覚生成手法は要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法を用いたことを解消し、要素感覚を機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を目指し、圧力軸（単位： $\text{N}/\text{m}^2$ ）・温度軸（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）・振動軸（単位： $\text{Hz}$ ）の物理的に生成することが可能な3軸を用いて構築した。それぞれの軸で触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚を擬似的に生成させるための刺激を生成することで、合成して呈示することが可能

になる。この手法を用いることで、例えば、感覚量の“痺れ”は物理量的表現として“圧力 X と温度 Y”と触覚の数値化が可能となり、記録性を有した医療用ロボットや福祉分野における装置などへの応用が将来的に可能であると考えられる。

近年の触覚を再現する装置は、井野ら<sup>33)</sup>が行っていたような材質感評価などの生理学的観点からの装置開発のための触覚メカニズムに基づいた呈示方法の提案が少なく、工学的に触圧覚や振動覚が必要であるとのことから開発が主流である。また Haptic Map のような呈示手法に基づいた装置の開発は行われていない。一方、触覚呈示装置では、再現性のある触覚の工学的再現や呈示が可能になると考えられ、近年の触覚を再現する装置が呈示できなかった触覚（例えば、ぐにゃぐにゃするような感覚や痒み・痺れなどの痛み感覚など）が実現するものと考えられる。

またこの研究の医学的応用・工学的応用として、手術用ロボットや福祉用ロボットからの感覚フィードバックが考えられる。これらに関する現状の感覚フィードバックに関する研究では力覚に着目しており、触覚の要素である痛覚フィードバックが行われていない。痛覚は触覚でも生命維持に関わる重要な感覚であることから、生命に関わる手術や福祉に関するロボットからのフィードバックが重要であると考えられる。更に、本研究で提案した Haptic Map は他の研究とは異なり痛覚刺激を含めていることで、現状の装置が呈示できなかった触覚の呈示（例えば、ぐにゃぐにゃするような感覚や痒み・痺れなどの痛み感覚など）が実現すると考えられる。

更に評価実験の際、被験者によると圧力軸と振動軸を組み合わせる場合、被験者は呈示部の中指腹部以外に手のひら・手の甲に知覚する被験者が多く、特異な例として手首や前腕まで振動が伝搬し痺れが生じているという報告があった。また温度軸と振動軸を組み合わせる場合、被験者は呈示部の中指腹部以外の部位で感覚を知覚する割合が増加していた。例えば、被験者 B は温度軸 40 °C と振動軸 260 Hz を組み合わせる場合、前腕部から肘にかけて嫌な震え（嫌悪感）が生じると報告した。また特異な例として、温度軸 20 °C の時、振動軸を増加させるに従い振動の伝播が中指腹部から手の甲に振動が生じ、更に振動軸 260 Hz の場合には上腕部まで嫌悪感がある震えが生じると報告があった。このような触覚呈示方法の応用を考察する。触覚過敏・触覚鈍麻の発達障害児<sup>96)</sup>は、ヒトや物体に触れることを嫌がりこのことが原因となって触覚の言語表現（触覚感性語）がうまく伝わらず、コミュニケーションが取れないという問題が生じる。またその結果として、児童はヒトや物体に触れることをますます嫌がり、このことが発達上の問題とも考えられている。つまり、指先から得る触覚情報の他に、接触点（指先）から伝搬する振動による手腕部の嫌悪感を生起するような装置としての、触覚呈示装置を用いた発達障害児のための触覚機能診断装置としての利用や Haptic Map を用いた触覚機能の客観的評価方法の提案などの

医療応用が考えられる。

## 2.12 本章のまとめ

本章では、新しい触覚呈示装置を開発することを目指し、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する手法を提案するため、本研究の基礎研究・他の触覚研究を調査し、それらをまとめ、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）Haptic Map を構築した。この方法は、圧力軸（単位： $\text{N}/\text{m}^2$ ）・温度軸（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）・振動軸（単位： $\text{Hz}$ ）の3軸で構成されると定義した。そして、Haptic Map による、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示する方法の有効性を確認するための評価実験を行った。評価実験結果から、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。温度軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合と同様に多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。本評価結果から、Haptic Map に基づいた触覚呈示装置を用いて、被験者に触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚を工学的に再現し、それらの要素感覚を合成することで被験者の指先に呈示した感覚以外の感覚（表面テクスチャ変化や指先の痺れなど）を生起させることが可能であることが示された。更に評価実験の際、被験者によると圧力軸と振動軸を組み合わせて呈示した場合、被験者は呈示部以外に手のひら・手の甲に知覚する被験者が多く、特異な例として手首や前腕まで振動が伝搬し痺れが生じているという報告があった。このことから、医学的応用として、触覚呈示装置を用いた発達障害児のための触覚機能診断装置としての利用やHaptic Map を用いた触覚機能の客観的評価方法の提案などの医療応用が示唆された。

## 第3章 触覚呈示装置の医学的応用

### 3.1 本章の目的

本章では、触覚呈示装置の医学的応用を提案する。第2章の触覚呈示装置の評価実験における被験者の報告から、触覚呈示装置を用いることでヒトが違和感・嫌悪感を及ぼす、刺激を呈示された部位以外への震え・痒み・痺れを呈示することが可能であると示された。このような触覚の呈示の利用として、近年増加傾向にある発達障害児の触覚機能を検査するツールとしての利用を提案する。

社会的背景として、現在、日本における発達障害の診断基準は、米国神経医学会から刊行されている、DSM-IV-TR<sup>94)</sup>やDSM-V<sup>95)</sup>に基いており、この中に触覚機能（触覚過敏・触覚鈍麻傾向）の検査が現段階では含まれていない。一方で発達障害児の多くは、触覚過敏・触覚鈍麻の特徴を示し<sup>96)</sup>、そのことが原因となってヒトや物体に触れることを嫌がり<sup>97)98)</sup>、その結果、触覚の言語表現（触覚感性語）がうまく伝わらず、コミュニケーションが取れないという問題が生じる。その結果、児童はヒトや物体に触れることをますます嫌がる、という悪循環に陥る。以上のように、触覚機能の不具合がコミュニケーション障害という発達障害の特徴の一因となっていることから、触覚機能の不具合の程度を適切に把握するための検査ツールの開発は非常に重要である。触覚機能の不具合が確認されたら、機能改善を図ることにより、コミュニケーション障害の程度を軽減することが可能になる。そこで発達障害児の触覚過敏・触覚鈍麻に焦点を当て、従来存在しなかった発達障害児用の触覚機能診断装置<sup>107)</sup>への応用を検討する。

### 3.2 触覚機能診断装置の仕様

触覚機能診断装置は、第2章で示されているような触覚呈示装置の仕様で物理量を呈示を行うことが可能である。触覚呈示装置の仕様・呈示すべき物理量については、第2章2.6節の通りである。

- 触圧覚を擬似的に生成させるための刺激は、被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とする。

- 振動覚を擬似的に生成させるための刺激は、音響用スピーカーを用いて呈示する物理刺激とする。
- 温覚を擬似的に生成させるための刺激は、ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする。
- 冷覚を擬似的に生成させるための刺激は、ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする。
- 痛覚を擬似的に生成させるための刺激は、触圧覚を擬似的に生成させるための刺激と同様、被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし、この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする。

### 触圧覚

第2章2.6節に示している通り、触圧覚を擬似的に生起させるための圧力は、 $15 \text{ N/m}^2$ とする。なお、この値は心理物理実験により得られた刺激強度  $1.5 \text{ N/m}^2$  と区別すること、またウェーバー・フェヒナーの法則に従い、感覚量としては2倍相当とするを考慮して設定した。

### 振動覚

触覚呈示装置による振動覚を擬似的に生成させるための刺激は、呈示する音響用スピーカーへ印加する信号の振動周波数が  $100 \text{ Hz}$ 、 $140 \text{ Hz}$ 、 $180 \text{ Hz}$ 、 $220 \text{ Hz}$ 、 $260 \text{ Hz}$  の正弦波信号と設定する。

### 温覚

触覚呈示装置による温覚を擬似的に生成させるための刺激は、算出した結果、 $45.3 \text{ }^\circ\text{C}$  の物理刺激と設定する。

### 冷覚

触覚呈示装置による冷覚を擬似的に生成させるための刺激は、算出した結果、 $-1.00 \text{ }^\circ\text{C}$  の物理刺激と設定する。

### 痛覚

第2章2.6節に示している通り、痛覚を擬似的に生起させるための圧力は、 $45$

$N/m^2$  とする。これは、被験者が触覚呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし、この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする。なお、この物理量では、力 (N) 変化と面積 ( $m^2$ ) 変化があるが、本研究では力変化 (呈示面積一定) として定義する。

### 3.3 評価実験方法

触覚呈示装置により、被験者の指先・手首・腕部に児童が嫌がるような震え・痒み・痺れという刺激が生起されているかを評価する。実験被験者は健常な大学生男女 12 名 (男性: 10 名, 女性: 2 名, 平均年齢:  $22.7 \pm 1.3$  歳) とする。評価は、実験者が触覚呈示装置により擬似的な触覚を中指指先に呈示した時、呈示した部位 (中指指先) で知覚した振動刺激を除く、被験者の指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れという児童が嫌がる感覚が生起されているかを口頭で回答する方法とする。この時被験者には、震え・痒み・痺れを知覚した部位を回答してもらう。本評価実験の呈示順番は全被験者統一する。なお本評価実験は、痛覚刺激を生起させることから、本学倫理委員会から承認を受けた。

触覚呈示装置では、温度軸と振動軸の 2 軸同時呈示、圧力軸と温度軸と振動軸の 3 軸同時呈示を行い、それぞれの座標における感度 (被験者がどれだけ震え・痒み・痺れを知覚したか) を算出し、Haptic Map にマッピングする。その結果から、健常者が知覚しやすい座標をまとめた、“痛覚刺激感度マップ”を作成する。この時、条件として、全被験者の 80 % を超える被験者が震え・痒み・痺れを知覚した場合、触覚機能診断に有効なデータであると定義する。つまり、12 名中 10 名以上の被験者が震え・痒み・痺れを知覚した場合、“痛覚刺激感度マップ”にプロットすることができる。

### 3.4 評価実験結果

はじめに、表 3.1 に被験者の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長) を示す。計測は、触覚呈示装置に触れる中指とした。

2 軸同時呈示の評価結果を図 3.1 に示す。この結果から、図 3.1 の黒色プロット点において、12 名中 11 名の被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚していることが示された。具体的には、温度軸  $20^\circ C$ ・振動軸 220 Hz と温度軸  $20^\circ C$ ・振動軸 260 Hz の同時刺激時と、温度軸  $40^\circ C$ ・振動軸 220 Hz の同時刺激時である。併せて、図 3.1 の淡色プロット点において、12 名中 10 名の被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚していることが示された。具体的には、温度軸  $40^\circ C$ ・振動軸

表 3.1: 被験者 12 名の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長)

被験者 番号	年齢 [歳]	指の 長さ [mm]	指の 幅 [mm]	指の 高さ [mm]	爪の 長さ [mm]
平均	22.7	74.8	15.1	11.8	12.0
偏差	1.30	3.22	1.54	1.89	1.45

260 Hz の同時刺激時であった。以上のプロット点は、触覚機能診断に有用であることが示された。一方、温度軸と振動軸の上記以外の同時刺激時には有用なデータは得られなかった。

3 軸同時刺激の評価結果を図 3.2 に示す。この結果から、図 3.2 の淡色プロット点において、12 名中 10 名の被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚していることが示された。具体的には、圧力軸  $15 \text{ N/m}^2$ ・温度軸  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ・振動軸 220 Hz の同時刺激時と、圧力軸  $15 \text{ N/m}^2$ ・温度軸  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ・振動軸 220 Hz と圧力軸  $15 \text{ N/m}^2$ ・温度軸  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ・振動軸 260 Hz の同時刺激時である。以上のプロット点は、触覚機能診断に有用であることが示された。一方、圧力軸と温度軸と振動軸の上記以外の同時刺激時には有用なデータは得られなかった。以上の結果から、健常者が知覚しやすい座標をまとめた痛覚刺激感度マップ上の 7 点において、発達障害児の触覚機能診断が有用であることが示された。

### 3.5 本章の考察

本研究では、従来存在しなかった発達障害児用の触覚機能診断装置の開発を目的とし、評価実験結果から、健常者が知覚しやすい座標をまとめた痛覚刺激感度マップ上の 7 点が触覚機能診断に有用であることが示された。

一方、評価実験の順番を全被験者統一したことで、被験者間での相対的な触覚過敏・触覚鈍麻などの個体差を評価することが可能であり、触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者の分類を行い、それぞれ 1 名ずつ抽出した。表 3.2 に触覚過敏者と触覚鈍麻者の分類を示す。表の行は被験者 12 名 (A から L) を示し、表の列は被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚した／知覚できなかった場合を示し、表中の数字は被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚した／知覚できなかったプロット数を示している。この結果から、触覚呈示装置の“触覚治療”への応用を考察する。

評価実験結果から、被験者 2 名を抽出した。被験者 F は全員が知覚する感覚呈示部の指先以外の手首・腕部などさまざまな部位に震え・痒み・痺れを知覚する触覚過敏

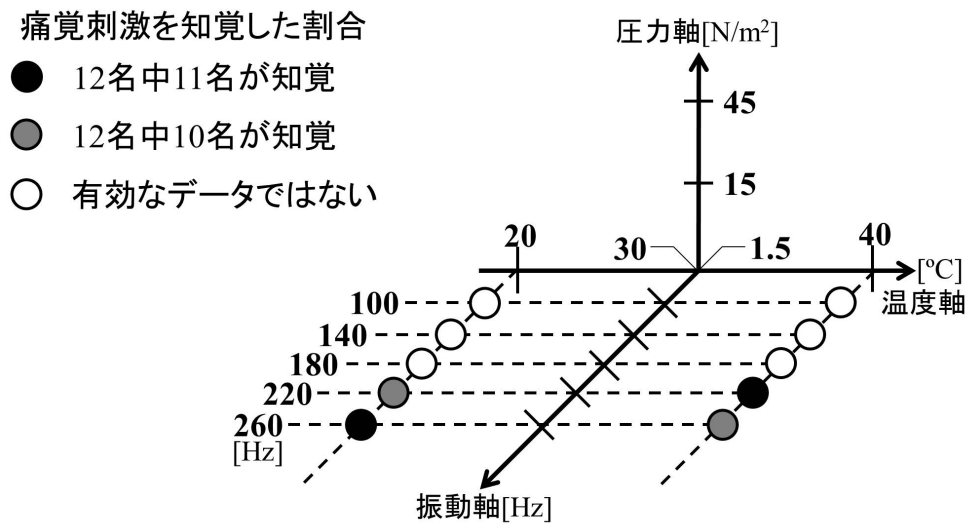


図 3.1: 2 軸を合成して呈示した場合の痛覚刺激感度マップ

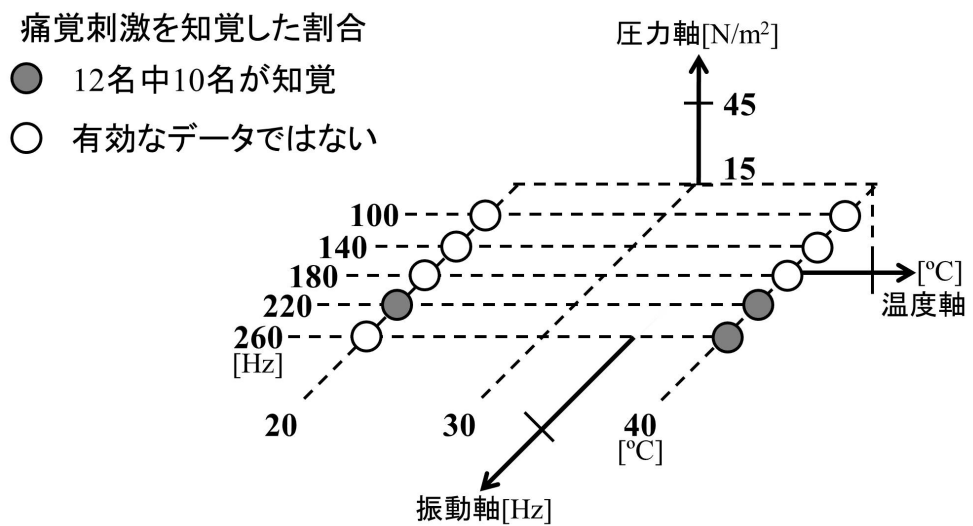


図 3.2: 3 軸を合成して呈示した場合の痛覚刺激感度マップ



表 3.2: 被験者 12 名の触覚過敏者・触覚鈍麻者の分類

被験者 番号	知覚した プロット点の数	知覚できなかった プロット点の数
A	14	6
B	12	8
C	17	3
D	18	2
E	13	7
F (感覚過敏者)	20	0
G	19	1
H (感覚鈍麻者)	3	17
I	12	8
J	14	6
K	17	3
L	13	7

な被験者（21 歳男性）である。一方被験者 H は感覚呈示部の指先のみには震え・痒み・痺れを知覚しており，他の被験者に比べ触覚鈍麻な被験者（22 歳男性）である。追評価実験では，評価実験で得られた健常者が知覚しやすい座標をまとめた痛覚刺激感度マップ上の抽出した 1 点の圧力軸  $15 \text{ N/m}^2$ ・温度軸  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ・振動軸  $220 \text{ Hz}$  において，本評価実験 1 日を含む，3 日間評価実験を行うという継続的な利用により，被験者 2 名の触覚領域が増加／減少するかという点を評価した。追評価実験の感覚呈示順番は，感覚の順応性<sup>51)</sup>を考慮し，本実験（1 日目）と追実験初日（2 日目），追実験 2 日目（3 日目）をそれぞれ変化させ，実験を実施した。

被験者 F（触覚過敏者）の追評価実験の評価結果を図 3.3 に，被験者 H（触覚鈍麻者）の追評価実験の評価結果を図 3.4 に示す。図 3.3，図 3.4 の図左部は，評価実験の結果である。また，図右部は，追評価実験の結果である。白色プロット点は被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚していない部分であり，黒色プロット点は被験者が指先・手首・腕部に震え・痒み・痺れを知覚している部分である。その結果，被験者 A（触覚過敏者）は，3 日間とも震え・痒み・痺れが，特定の部位（指・手のひら）にのみ知覚しており，他の被験者に比べ，複数の部位に拡散する事象が生じていなかった。図 3.3 に評価実験からの経過を示す。

一方で，被験者 H（触覚鈍麻者）は，初日は指先の振動以外知覚できなかったが，回数を重ねるごとに，前腕部や手首まで震え・痒み・痺れを知覚することが可能となった。また，被験者 H は他のプロット点でも感度が向上していることが確認された。図

3.4 に評価実験からの経過を示す。以上の追評価実験の結果から、触覚機能診断から、“触覚治療”への応用が示唆される。

### 3.6 本章のまとめ

触覚呈示装置の応用展望として、発達障害児用の触覚機能診断装置の実現可能性を評価するため、健常大学生での評価実験を実施した。評価実験結果から健常者が知覚しやすい座標を Haptic Map 上にプロットした痛覚刺激感度マップを構築し、このマップが触覚機能診断に有用であることが示された。一方、評価実験の順番を全被験者統一したことで、被験者間での相対的な触覚過敏・触覚鈍麻などの個体差を評価することが可能であり、触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者の分類を行い、それぞれ1名ずつ抽出した。その触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者への追評価実験の結果から、継続的な利用による触覚治療への応用展望が示された。

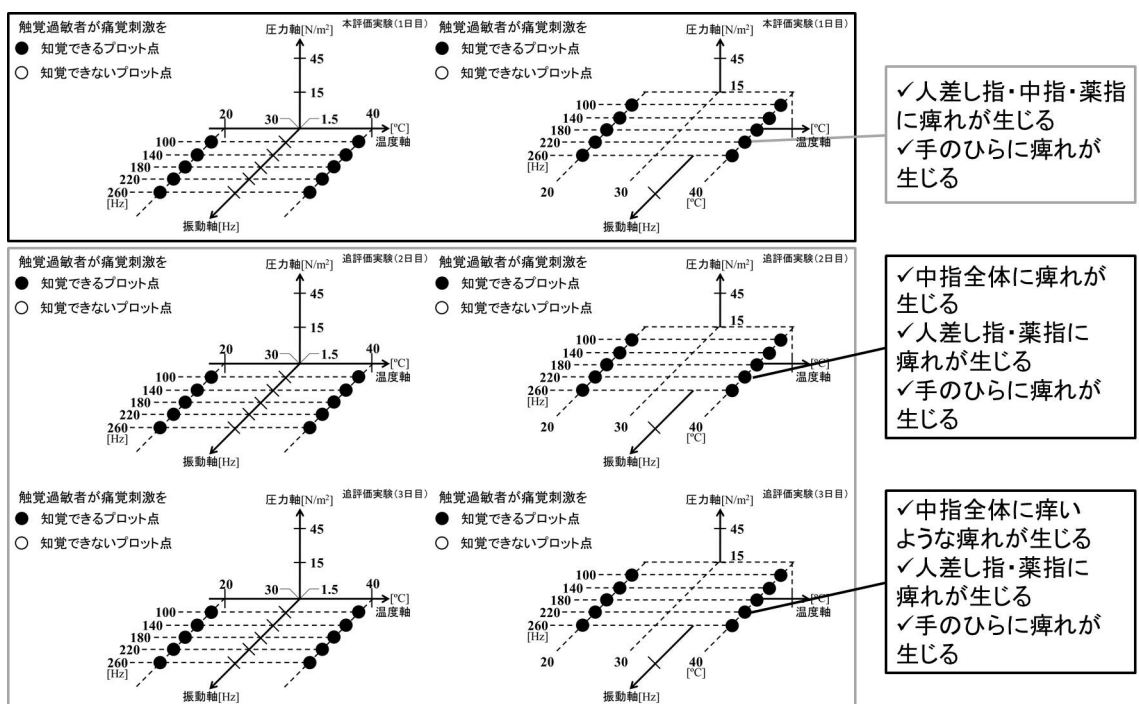


図 3.3: 感覚過敏者の痛覚刺激感度マップ

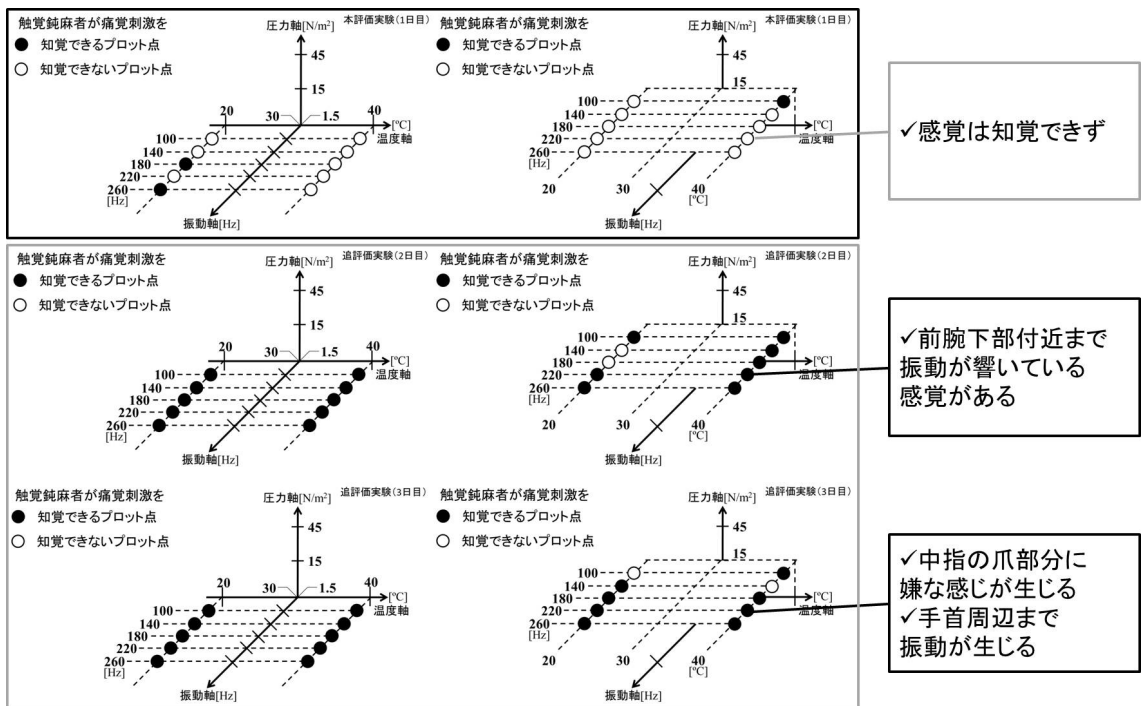


図 3.4: 感覚鈍麻者の痛覚刺激感度マップ

## 第4章 考察

### 4.1 研究目的と目的達成度

本研究では第1章1.4節に示している医学的な応用を目指し、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する新しい触覚呈示装置の開発を目的とし、研究を進めた。はじめに、本研究の基礎研究として、触覚メカニズムの感性工学実験<sup>62)</sup>や要素触覚を合成させて触覚を呈示するという考え方の評価実験<sup>99)100)</sup>を行い、その結果から、機械的に合成可能な多次元空間モデルの必要性を示唆している<sup>100)</sup>ことから、基礎研究の成果や第1章1.3節に示している触覚メカニズムの先行研究を調査し、触覚呈示に必要な要素感覚、機械的に合成可能な多次元空間モデルを構築した。次に、提案した触覚呈示手法を基に触覚呈示装置の開発を行った。そして、開発した装置を用いて、ヒトへ触覚を生起することが可能であるかの評価実験を実施した。その結果から得られた知見をもとに、触覚呈示装置の医学的応用として、第1章1.4節に示している発達障害児の触覚過敏・触覚鈍麻の早期発見を目指した装置としての利用を提案した。

本研究で開発した新しい触覚呈示装置は、電子素子を組み合わせて開発された。そのため、触覚呈示装置は呈示方法として能動的触覚知覚 (Active Touch) を用いていることから、被験者に教示する条件が多く触覚呈示が非適応型であると考えられる。そのため、今後の展開としては、自動ステージや音響用スピーカーに印加する正弦波信号を加工するシグナルミキサーなどを用い、今回開発した触覚呈示装置を適応型とすることを検討している。

一方、今後の展望として客観的な触覚の評価が必要であると考えられる。そのためには、近年注目されているBMI (ブレイン・マシン・インタフェース)<sup>109)</sup>に用いられているNIRS脳活動計測技術<sup>110)</sup>を用いて触覚情報 (感覚中枢で知覚している触覚情報) を取得する方法が今後実現できれば、現在の評価方法からより客観的な値 (触覚感覚の数値情報) を用いた触覚感覚の評価が今後可能になるものと考えられる。

以上より目的達成度を考察すると、目的に掲げた、医学的な応用を目指したヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する新しい触覚呈示装置の開発ができた。

次に、触覚呈示装置の応用展望について議論する。はじめに、触覚呈示装置の産業応用

の一例として、自動車の運転中などに生じる手腕系振動（Hand-transmitted vibration）のメカニズム解明に関する議論や、医療応用の一例として、触覚機能検査や触覚リハビリテーションへの展開について議論する。次に触覚の基礎評価として、ヒトが物体に触れた時の触知覚メカニズムの感性工学実験の評価について述べる。この感性工学実験では、呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について議論し、今後の触覚の感性工学実験の指標を示す。そして、新しい触覚技術の展望について考察する。

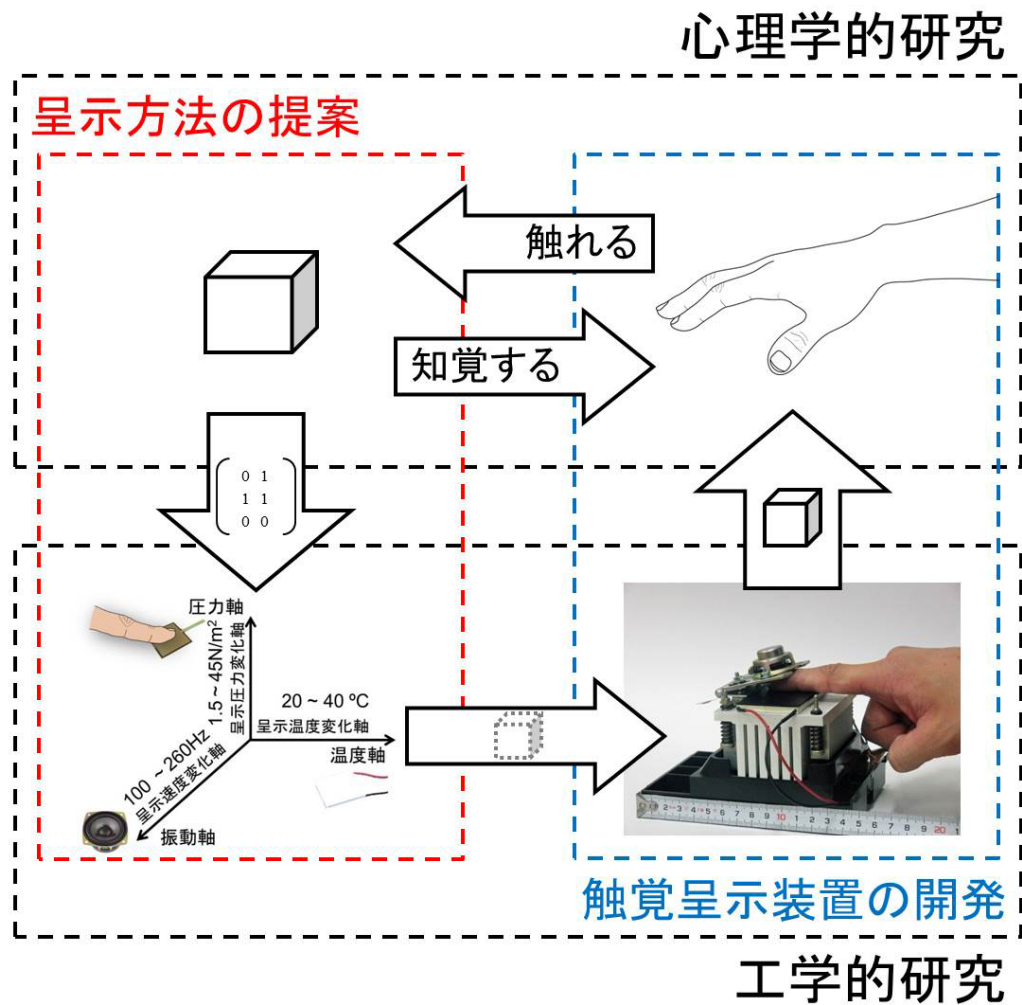


図 4.1: 研究目的と目的達成度

## 4.2 触覚呈示装置の産業応用

触覚を再現する試みの産業応用に関する展望は、ロボット技術を含む情報システムとヒトをつなぐインタフェースへの応用・展開が注目されている<sup>108)</sup>。特に近年では圧覚センサ技術<sup>67)</sup>や触覚ディスプレイ<sup>79)</sup>などに用いられている。本研究で提案した、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）Haptic Mapや、触覚呈示装置の産業応用的視点からの医学応用として、手術用ロボットや福祉用ロボットからの触覚フィードバックが考えられる。これらに関する現状の感覚フィードバックに関する研究では力覚に着目しており、触覚の要素である痛覚フィードバックが行われていない。特に痛覚は触覚でも生命維持に関わる重要な感覚であることから、生命に関わる手術や福祉に関するロボットからのフィードバックが重要であると考えられる。一方でHaptic Mapは他の研究とは異なり、触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つの感覚要素により構成されている触覚を工学的に再現することが可能である。痛覚刺激を含めたHaptic Mapを用いることで、表面テクスチャや痛み感（痒みや痺れなど）などの触覚を呈示することが可能になると考えられる。

## 4.3 触覚呈示装置を用いた産業応用の一例

触覚呈示装置を用いた産業応用の一例として、自動車の運転中などに生じる手腕系振動（Hand-transmitted vibration）のメカニズムの解明へ展開することが可能になると考えられる。この振動は、床面・シート・車両用のステアリングホイールのような振動源と手の接点から知覚またはヒトの身体がダイナミックな振動として知覚している。この自動車の運転中などに生じる手腕系振動に関する研究は、ステアリングホイールの温度変化による知覚変化などの評価は行われておらず、床面やシートなどのダイナミックな振動の評価が多い。このことから、触覚呈示装置を用いた簡易評価実験として、振動覚と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合のヒトの振動覚知覚に変化が生じるかという点について評価した<sup>111)</sup>。その結果から、触覚呈示装置の振動周波数をパラメータとした場合の振動覚刺激と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合のヒトの振動覚知覚に変化が生じていることが示された。本評価実験は、中指腹部のみでの振動覚刺激と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合であるため、運転中の手腕系振動のメカニズム解明のための基礎的なデータが得られたと示唆される。詳細については、付録Cに示す。

## 4.4 触覚呈示装置の医療応用

本研究の医療応用を目的として、第3章では従来存在しなかった発達障害児用の触覚機能診断装置への応用を目指した。評価実験結果から健常者が知覚しやすい座標を Haptic Map 上にプロットした痛覚刺激感度マップを構築し、このマップが触覚機能診断に有用であることが示された。一方、評価実験の順番を全被験者統一したことで、被験者間での相対的な触覚過敏・触覚鈍麻などの個体差を評価することが可能であり、触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者の分類を行い、それぞれ1名ずつ抽出した。その触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者への追評価実験の結果から、継続的な利用による触覚治療への応用展望が示された。本評価結果は健常者のデータであることから、今後この痛覚刺激感度マップを用いた発達障害児の触覚機能診断装置への応用が期待される。

発達障害児の触覚機能診断装置への応用をはじめとした、触覚呈示装置の医療応用について考察する。厚生労働省人口動態統計の概況によると、平成23年1年間における脳梗塞・脳内出血などの脳血管疾患患者死亡者数はおよそ12万人であり、近年急激に増加している<sup>112)</sup>。また一度発症した患者らは、後遺症を患うことも多く、その患者の多くは社会復帰を行うために、脳機能障害（特に運動機能障害）を克服するための歩行訓練やペンなどを用いた手首のリハビリテーション、更に言語訓練などを懸命に行っている。これらは、主に「作業療法」と呼ばれており、回復期リハビリテーションで訓練されている。リハビリテーションは、低次神経障害から高次神経障害まで幅広く対応しており、最終的には自宅での生活を行いながら行う維持期のリハビリテーションまで訓練を行っている。一方で、一部の患者では、感覚中枢への障害の度合いによるが、指先の触覚が知覚しにくくなるなどの高次神経機能障害が生じる。特に指先は、箸を持つ動作や物体を掴む、更に物体に触れるという、我々が普段の生活において極めて重要な動作を担っている。また指先で物体を知覚する動作は、触覚が重要である。しかし、現状のリハビリテーションでは、触覚のみに特化したリハビリテーションは行われておらず、またこのリハビリテーションに対応した装置の製作は行われていない。ここで神経線維は末梢血行障害により脱髄することが知られており、これが原因で感覚障害を引き起こしている<sup>88)</sup>。感覚障害により知覚閾が縮小し、そのことから患者は触覚感覚を知覚しにくくなる。4.3節で実施した評価実験結果から、触覚呈示装置では、被験者の知覚閾が拡大する現象を引き起こすことが可能であるという結果が得られ、さらにヒトが嫌悪感を知覚する刺激部位以外の振動刺激・痒み刺激・痺れ刺激を呈示することが可能である。このことから、触覚呈示装置は一定量の物理量を呈示することで、健常者の知覚閾と比較することで、触覚機能診断が可能となり、加えてヒトが嫌悪感を知覚する振動刺激・痒み・痺れを呈示することが可能であるこ

とから、触覚感覚機能回復に効果があるものと考えられる。

一方、神経線維の末梢血行障害の影響が最も生じやすい症例として、糖尿病が挙げられる。糖尿病の神経障害はThomasが分類しており<sup>113)</sup>、これは局在性神経障害・多発性神経障害に大別されている<sup>88)</sup>。特に多発神経障害では、感覚・運動神経障害が生じることでの触覚の感覚鈍麻が確認されている<sup>88)</sup>。例えば足底に触覚の感覚鈍麻が現れ、創傷などを放置することで、糖尿病の合併症として足潰瘍や壊疽を発症する患者は多く、病態の把握や的確な治療が必要となってくる<sup>114)</sup>。つまり、糖尿病により足底の触覚感覚が鈍麻することで症状が重篤になる恐れがあることから、現状の糖尿病による足底触覚感覚障害症状の簡易診断では音叉を用いた内くるぶしの振動覚検査やアキレス腱反射検査<sup>88)</sup>、そしてモノフィラメントテスト<sup>89)</sup>、Pin-prick Testや末梢神経伝導速度検査が行われている<sup>90)</sup>。糖尿病の早期発見及び進行予防のため、多くの検査が実施されているが、いずれの検査における問題点は、簡便かつ短時間に、そして正確に定量評価が実施しにくいという点が挙げられる。これらの問題に着目し、糖尿病による触覚感覚障害を簡便かつ短時間に定量評価を実施するため、井野ら<sup>91)92)</sup>は末梢神経障害の定量的評価のための足底感覚測定システム・評価装置を開発している。この評価装置は、足底皮膚を横方向に引っ張ることでの物理的な刺激（ずれ刺激）を定量的に与えることが可能である<sup>91)</sup>。この方法により、現在糖尿病による足底触覚感覚障害症状の簡易診断に用いられているモノフィラメントテスト<sup>89)</sup>に代替するものとして非常に有効である。

一方触覚呈示装置では、振動覚刺激と温覚刺激・冷覚刺激の同時刺激を行う手法による刺激呈示手法を用いており、この刺激呈示方法による単極尺度評価結果から、振動覚刺激と温覚刺激・冷覚刺激の同時刺激を行うことで振動覚刺激閾値が増大することが示された。つまり、触覚呈示装置の呈示方法を用いた刺激閾値測定を併せて行うことで、触覚障害のスクリーニング検査としての応用展望も考えられる。

また、本研究の初期段階の実験において、簡易呈示装置を用いた温覚・冷覚と他触覚（触圧覚・振動覚・痛覚）の同時刺激時のヒトの触覚の影響を官能評価実験により分析した<sup>115)</sup>。その評価実験結果では、温覚・冷覚と振動覚、温覚・冷覚と振動覚と痛覚の同時刺激時には被験者の指先に装置が呈示していない触覚を生起させることが可能であることが示唆された。また、温覚・冷覚と振動覚を同時に刺激することで温覚・冷覚の知覚閾値を上昇させることが可能であることが示唆された。一方で、温覚・冷覚と振動覚と痛覚（圧痛）を同時に刺激することで、温覚・冷覚の知覚閾値を下降させることが可能であることが示唆された。この影響を用いた感覚呈示の医療応用に関して考察する。冬季から春先にかけて、足先や指先に“冷え”を知覚する患者、また若年女性に多いレイノー病患者のための温覚・冷覚刺激療法のための呈示装置への応



用が考えられる。

## 4.5 触知覚メカニズムの感性工学実験

本研究の基礎実験として、ヒトの触知覚メカニズムの感性工学実験を実施した<sup>62)63)</sup>。ヒトの触知性に関する先行研究として、に示す、早川ら<sup>34)</sup>の研究、前野<sup>35)</sup>の研究、またヒトの触り心地に関する研究として、田中ら<sup>60)</sup>の研究、鋤柄<sup>61)</sup>らの研究がある。これらの研究では、被験者へ呈示する基準試料の条件について定められておらず、触覚の感性工学実験の指標が定められていない。そこで、ここでは、触知覚に関する評価実験において、評価基準（基準試料）の必要性に関して評価を行った。併せて、触知覚時の視覚情報の重要性について評価を行った。官能評価実験として、基準試料を用いて物体に直接触れる実験、基準試料を用いて視覚による情報を含んだ状態での物体に直接触れる実験、基準試料を用いずかつ視覚を遮断した状態で物体に直接触れる実験、物体に触れず視覚のみで評価する実験を行った。これらの実験では、ヒトが普段触れている物体を再現するため、すべての被験物の直径と質量は異なるように選定し、また、能動的触知覚による評価を行うため、形状による触知覚変化が生じないように、球形被験物を選定した。この評価実験結果から、触知覚に関する評価実験での基準試料の必要性を評価した。評価実験での考察から、触知覚に関する評価実験では、基準試料の必要性はないと示唆され、今後の触知覚に関する評価実験の指標が得られた。更に、評価実験では、視覚による物体の触知覚メカニズムを解明した。評価実験結果から、ヒトは視覚や触覚の情報を感覚中枢で知覚する際、物体に関してある程度の感覚の特徴を把握しており、これを記憶しているということが結果から示唆された。岩村<sup>28)</sup>は、触覚記憶を活かす場面において言及しているが、物体を掴むや摘むという深部感覚知覚の他に、触れるという触知覚にも影響しているということが評価実験結果から明らかとなった。また、中野ら<sup>125)</sup>は、天然硅砂を用いて触感の記憶力を評価しており、本研究では中野ら<sup>125)</sup>が行ったなぞり動作の他に、触知覚の触覚記憶を言及するためにも、新たな実験系を構築し再検討する必要がある。以上のように、呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について考察し、今後の触覚の感性工学実験の指標を示した<sup>62)63)</sup>。詳細については、付録 A に示す。

## 4.6 新しい触覚技術の展望

触覚の工学的研究は重要な要素技術となっている。しかし、それでもヒトの感覚で代表的な5つ（視覚・聴覚・味覚・嗅覚・触覚）の中で、特に視覚・聴覚から遅れを

とっている。特に視覚・聴覚は一般的に感覚量の長期保存が浸透している。感覚量の長期保存とは、普段の生活で行っている『ビデオカメラで視覚情報を保存する』、『マイクで聴覚情報を保存する』などというものである。また、近年では味覚、嗅覚の数値化にも成功し、これにより味覚・嗅覚の感覚量の長期保存も実現しつつある<sup>116)</sup>。小野田ら<sup>117)</sup>は、脳磁場計測および中枢性味覚障害例による検討結果をもとに、味覚中枢とその伝導路について考察している。そのため、触覚に関しても『感覚量の長期保存』に対する議論をしなければならない。しかし、触覚は他の4つの感覚とは異なり、現段階では感覚量のセンシングや出力が不可能に近く、感覚量の長期保存という議論には至っていない。そのため、触覚感覚量の長期保存に関する研究を行う必要がある。触覚感覚量の長期保存を行うためには、入力側としてヒトが感覚受容器を用いて取得している触覚感覚量をセンシングする必要がある。また、出力側としてその触覚感覚量を用いてヒトに擬似的な触覚を呈示する必要がある。これらを組み合わせることで、触覚感覚量が記録可能となり、この情報を用いて時空間的に隔たった地点において同様の触覚が得られるという長期保存が実現できる。

触覚感覚量の長期保存が実現できれば、梶本<sup>119)</sup>が述べている遠隔ハプティクスが容易になると考えられる。現状では、Endoら<sup>118)</sup>の5本の指先に感覚を呈示するHIROIIIや、石井ら<sup>120)</sup>の触覚放送システムのネットワークを構築するための連結型マルチラテラル制御方法などがある。

以上のように、触覚感覚量の数値化・長期保存の実現により、触覚の遠隔伝送などが現実的になるものと期待される。

## 第5章 結論

本研究では、本研究では医学的な応用を目指し、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する新しい触覚呈示装置の開発を目的とした。

- 新しい触覚呈示装置を開発することを目指し、ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する手法を提案するため、本研究の基礎研究・他の触覚研究を調査し、それらをまとめ、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）Haptic Mapを構築した。この方法は、圧力軸（単位： $\text{N}/\text{m}^2$ ）・温度軸（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）・振動軸（単位： $\text{Hz}$ ）の3軸で構成されると定義した。そして、Haptic Mapによる、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示する方法の有効性を確認するための評価実験を行った。評価実験結果から、圧力軸と振動軸を組み合わせで呈示した場合、多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。温度軸と振動軸を組み合わせで呈示した場合、圧力軸と振動軸を組み合わせで呈示した場合と同様に多くのプロット点において、呈示した感覚以外を知覚した被験者が多いことが示された。本評価結果から、Haptic Mapに基づいた触覚呈示装置を用いて、被験者に触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚を工学的に再現し、それらの要素感覚を合成することで被験者の指先に呈示した感覚以外の感覚（表面テクスチャ変化や指先の痺れなど）を生起させることが可能であることが示された。更に評価実験の際、被験者によると圧力軸と振動軸を組み合わせで呈示した場合、被験者は呈示部以外に手のひら・手の甲に知覚する被験者が多く、特異な例として手首や前腕まで振動が伝搬し痺れが生じているという報告があった。このことから、医学的応用として、触覚呈示装置を用いた発達障害児のための触覚機能診断装置としての利用やHaptic Mapを用いた触覚機能の客観的評価方法の提案などの医療応用が示唆された。
- 触覚呈示装置の応用展望として、発達障害児用の触覚機能診断装置の実現可能性を評価するため、健常大学生での評価実験を実施した。評価実験結果から健常者が知覚しやすい座標をHaptic Map上にプロットした痛覚刺激感度マップを構築し、このマップが触覚機能診断に有用であることが示された。一方、評価実験の順番を全被験者統一したことで、被験者間での相対的な触覚過敏・触覚鈍麻など

の個体差を評価することが可能であり，触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者の分類を行い，それぞれ1名ずつ抽出した．その触覚過敏・触覚鈍麻傾向にある被験者への追評価実験の結果から，継続的な利用による触覚治療への応用展望が示された．

- 本研究の産業応用や医学応用について考察し，触覚呈示装置の産業応用の一例として，自動車の運転中などに生じる手腕系振動（Hand-transmitted vibration）のメカニズム解明に関する議論や，医療応用の一例として，触覚機能検査や触覚リハビリテーションへの展開について議論した．次に触覚の基礎評価として，ヒトが物体に触れた時の触知覚メカニズムの感性工学実験の評価実験結果から，呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について議論し，今後の触覚の感性工学実験の指標を示した．そして，新しい触覚技術の展望について考察した．
- 今回の評価実験では被験者の主観的評価による触覚の評価であったことから，近年注目されているfMRIやBMIに用いられているNIRS脳活動計測技術を用いて触覚を客観的に評価する方法が今後実現できれば，現在の評価方法からより客観的な値を用いた触覚の評価が可能になるものと示唆される．

以上のことから，新しい触覚呈示装置の開発が達成できた．

## 倫理的配慮

本研究は、製作した触覚呈示装置を用いた官能評価実験を実施した。こうした実験を行う研究は、ヒトを対象とする研究規程の観点から、被験者の倫理を配慮した上で目的を達成されるものでなければならない。本研究は、長岡技術科学大学「ヒトを対象とする研究規程第9条」の規定に基づき、ヒトを対象とする研究計画についての承認を受けた。実験の実施前に、被験者には同意書に署名をいただき実験を実施した。

# 謝辞

本研究の遂行から論文の執筆に至るまで、5年間に渡り終始懇切な指導を賜った長岡技術科学大学経営情報系（保健・体育センター長）であり主指導教員の三宅仁教授、および本研究の進行にあたり多大なる助言を頂きました副指導教員である長岡技術科学大学経営情報系（体育・保健センター）塩野谷明教授、長岡技術科学大学経営情報系北島宗雄教授、博士論文審査委員の長岡技術科学大学経営情報系 Ashu MARASHINGHE 准教授、独立行政法人産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門身体適応支援工学グループ井野秀一研究グループ長に深甚なる感謝の意を表します。本研究を遂行するにあたり、体育・保健センター三宅研究室の皆様・研究室卒業生の皆様、体育・保健センター塩野谷研究室の皆様・研究室卒業生の皆様に感謝致します。そして、本研究で実施した実験において被験者として協力いただいた数多くの皆様に対し、心から感謝いたします。

本研究の遂行と並行して、長岡技術科学大学大学院特別コース 3G マインド一貫コースのリサーチインターンシップにおいて、独立行政法人産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門身体適応支援工学グループ研究グループ長であり論文審査委員の井野秀一研究グループ長、同研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門の赤松幹之部門長、横井孝志副部門長、身体適応支援工学研究グループの皆様には大変お世話になりました。心から感謝致します。また同大学グローバルリーダー養成のための短期海外派遣プログラムにおいて、RMIT University の Dr. Mohammad A. FARD には大変お世話になりました。心から感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、学長戦略的経費による研究助成、日本精機エヌエス知覚科学振興会奨学金の援助を受けたことに謝意を表します。

最後に、私を暖かく時に厳しく見守り続けてくれた家族に感謝します。

## 参考文献

- 1) 山口創, 皮膚感覚の不思議—「皮膚」と「心」の身体心理学—. BLUE BACKS, pp.16-53, 2006.
- 2) 傳田光洋, 第三の脳, 朝日出版社, pp.23-29, 2007.
- 3) 岩村吉晃, 能動的触覚知覚 (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 (2007), pp.171-177.
- 4) 白土寛和, 前野隆司, 「触る」ということ —ヒトとロボットの触覚—, 表面, Vol.46, No.5 (2003), pp.145-152.
- 5) 金子章道, 感覚と知覚, 杉晴夫編集, 人体機能生理学 [改訂第4版], 南江堂, 東京, 2003, p.187-206.
- 6) 鈴木啓之, 皮膚の神経, 清寺眞, 小川和朗編集, 人体組織学 結合組織・皮膚とその付属品, 朝倉書店, 東京, 1984, pp.382-391.
- 7) Zdenek Halata and Klaus I. Baumann, Anatomy of receptors, Martin Grunwald [Eds.], Human Haptic Perception — Basics and Applications —, Birkhauser, Switzerland, 2008, pp.85-92.
- 8) 篠原正美, 触覚の生理学, 内川恵二総編集, 感覚・知覚の科学3 —聴覚・触覚・前庭感覚—, 朝倉書店, 東京, 2007, pp.102-141.
- 9) 井出千束, 知覚終末, 小川和朗編集, 人体組織学 結合組織・皮膚とその付属品, 朝倉書店, 東京, 1984, pp.392-408.
- 10) 青木藩, 体性感覚—触・圧覚—, 田崎京二, 小川哲郎編集, 新生理科学大系9 —感覚の生理学—, 医学書院, 東京, 1989, pp.290-308.
- 11) M.Nolano, V.Provitera, F.Lullo, A.M.Saltalamacchia, C.Crisci, B.Lanzillo and L.Santoro, Tactile stimulation and mechanoreceptors in sensory neuropathies, Neurological Sciences, Vol.22, Issue 1 Supplement (2001), pp.S31-36.

- 12) 篠田裕之, 柔らかい機械の人工皮膚, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.7 (2001), pp.814-817.
- 13) 奈良高明, 前田太郎, 安藤繁, 舘暲, パチニ小体の連成共振系モデル —層状ラメラ構造のモードフィルタリング機能—, 第15回生体・生理工学シンポジウム論文集, Vol.15, 2000, pp.403-406.
- 14) 奈良高明, 前田太郎, 安藤繁, 舘暲, 皮膚の直交変化量に関する考察 —マイスナー小体, パチニ小体が検出する皮膚変形量について—, 第15回生体・生理工学シンポジウム論文集, Vol.15, 2000, pp.407-410.
- 15) Ronald T. Verrillo, Psychophysics of Vibrotactile Stimulation, The Journal of Acoustical Society of America, Vol.77, No.1 (1985), pp.225-232.
- 16) Frank A. Geldard, The Perception of Mechanical Vibration: III. The Frequency Function, The Journal of General Psychology, Vol.22 (1940), pp.281-289.
- 17) A.Iggo, Cutaneous Thermoreceptors in Primates and Sub-Primates, The journal of physiology, Vol.200 (1969), pp.403-430.
- 18) Stevens J. C and Choo K. K., Spatial acuity of the body surface over the life span, Somatosensory and Motor Research, Vol.13, No.2 (1996), pp.153-166.
- 19) J. M. S. Pearce, The Law of Specific Nerve Energies and Sensory Spots, European Neurology, Vol.54, No.2 (2005), pp.115-117.
- 20) L. Opacities, SIR HENRY HEAD (1861-1940), Journal of the American Medical Association, Vol.191, No.4 (1965), pp.334-335.
- 21) J. P. Nafe, Toward the quantification of psychology, Psychological Review, Vol.49, No.1 (1942), 1942, pp.1-18.
- 22) Frank A. Geldard, The Perception of Mechanical Vibration: III. The Frequency Function, The Journal of General Psychology, Vol.22, Issue.2 (1940), pp.281-289.
- 23) Games J. Gibson, Observations on Active Touch, Psychological Review, Vol.69, No.6 (1962), pp.477-491.
- 24) Gerald Westheimer, Hermann Helmholtz and origins of sensory physiology, Trends in Neurosciences, Vol.6 (1983), pp.5-9.



- 25) J. M. S. Pearce, Von Frey's pain spots, *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, Vol.77, Issue.12 (2006), pp.13-17.
- 26) E. B. Titchener, *A Text-book of psychology*. Macmillan, 1909, pp.171-172.
- 27) Rand B. Evans, *Haptics in the United States before 1940*. Martin Grunwald [Eds.], *Human Haptic Perception – Basics and Applications –*, Birkhauser, Switzerland, 2008, pp.71-81.
- 28) 岩村吉晃, タッチ —神経心理学コレクション—, 医学書院, pp.2-16, 2008.
- 29) E. B. Titchener, Notes from the psychological laboratory of Cornell University. *American Journal of Psychology*, pp.212-214, 1920.
- 30) E. B. Titchener, *A Beginner's psychology*. The Macmillan Company, pp.43-65, 1915.
- 31) E.B.Titchener, *Experimental psychology -A Manual of Laboratory Practice-*. The Macmillan Company, Vol.1, Part.2 (1971), pp.52-62 and pp.184-192.
- 32) E. B. Titchener, *Experimental psychology -A Manual of Laboratory Practice-*. The Macmillan Company, Vol.1, Part.1 (1901), pp.83-95.
- 33) 井野秀一, 伊福部達, 和田親宗, 敦賀健志, 泉隆, 田中敏明, 触覚の材質感呈示システムのための基礎的研究, *電気学会論文誌 C*, Vol.117, No.8 (1997), pp.1062-1068.
- 34) 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司, オノマトペを利用した触り心地の分類手法, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.15, No.3 (2010), pp.487-490.
- 35) 前野隆司, ヒトの触感認識機構の解析とその特徴を利用した触感センサ・触感ディスプレイ, 計測と制御, Vol.47, No.7 (2008), pp.561-565.
- 36) 教育機器編集委員会, *産業教育機器システム便覧*, 日科技連出版社, pp.4, 1972.
- 37) 赤松幹之, 視覚と触覚と運動の統合, *電子情報通信学会誌*, Vol.76, No.11 (1993), pp.1176-1182.
- 38) Waka Fujisaki, Effects of delayed visual feedback on Grooved Pegboard test performance, *Frontier in psychology*, Vol.3, Article.61 (2012), pp.1-14.

- 39) Waka Fujisaki and Sin'ya Nishida, Audio – Tactile Superiority over visuo – tactile and audio – visual combinations in the temporal resolution of synchrony perception, *Experimental Brain Research*, Vol.198 (2009), pp.245-259.
- 40) 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎, 視覚刺激操作による自己運動主体感の喪失, 電子情報通信学会技術研究報告 ヒューマン情報処理, Vol.111, No.432 (2012), pp.15-18.
- 41) 大森馨子, 和田有史, 野口薫, 触り方によって錯視は変化するのか? —ヘリング錯視図形とヴント錯視図形を用いて—, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.735 (2003), pp.61-66.
- 42) Kammers M. P., de Vignemont F, Verhagen L and Dijkerman HC, The rubber hand illusion in action, *Neuropsychologia*, Vol.47, No.1 (2009), pp.204-211.
- 43) Vincent Hayward, A Brief Taxonomy of Tactile Illusions and Demonstrations That Can Be Done In a Hardware Store, *Brain Research Bulletin* (special issue on Robotics and Neuroscience), Vol.75 (2008), pp.742-752.
- 44) A. D. Craig and M. C. Bushnell, The Thermal Grill Illusion: Unmasking the Burn of Cold Pain, *Science*, Vol.265, No.5169 (1994), pp.252-255.
- 45) Hsin Ni Ho, Junji Watanabe, Hideyuki Ando and Makio Kashino, Mechanisms underlying referral of thermal sensations to sites of tactile stimulation, *The Journal of Neuroscience*, Vol.31, No.1 (2011), pp.208-213.
- 46) 仲谷正史, Robert D.Howe, 舘暉, Fishbone Tactile Illusion を利用した触対象の凹知覚の研究, 日本バーチャル・リアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1 (2008), pp.97-100.
- 47) Masashi Nakatani, Akihiro Sato, Susumu Tachi and Vincent Hayward, Tactile Illusion Caused by Tangential Skin Strain and Analysis In Terms of Skin Deformation, *Proc. of Eurohaptics 2008*, The EuroHaptics Society, Madrid, 2008, pp.229-237.
- 48) 安藤英由樹, 前田太郎, なぞるときの錯覚を利用した触覚提示技術, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5 (2012), pp.481-482.
- 49) 南澤孝太, 皮膚感覚刺激による把持・質量感の提示, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5 (2012), pp.491-493.

- 50) 水上陽介, 澤田秀之, 形状記憶合金糸を用いた触覚ディスプレイと微小振動の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.12 (2008), pp.3890-3898.
- 51) 清水豊, 触覚の心理物理学, 内川恵二編, 感覚・知覚の科学3—聴覚・触覚・前庭感覚—, 朝倉書店, 東京, 2008, pp.142-167.
- 52) 大丘達也, 藤田欣也, 振動ファントムセンセーションの位置制御による指先への接触力と滑りの代替提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.2 (2010), pp.263-272.
- 53) Hsin-yun Yao and Vincent Hayward, An experiment on length perception with a virtual rolling stone, Proc. of Eurohaptics 2006, The EuroHaptics Society, Paris, 2006, pp.325-330.
- 54) Ryo Kikuuwe, Akihito Sano, Hiromi Mochiyama, Naoyuki Takesue and Hideo Fujimoto, Enhancing haptic detection of surface undulation, ACM Transactions on Applied Perception, Vol.2, No.1 (2005), pp.46-67.
- 55) 佐野明仁, 田中由浩, 藤本英雄, 触覚研究の新しいパラダイムと深化. 計測と制御, Vol.47, No.7 (2008), pp.572-577.
- 56) 山口静子, 官能評価とは何か, そのあるべき姿, 化学と生物, Vol.50, No.7 (2012), pp.518-524.
- 57) 早川文代, 官能評価における用語選択と官能評価実施時の留意点, 情報機構編集, 各種事例から学ぶ官能評価—実施計画・実施時の留意点からパネル管理の実際データ解釈・取り扱いまで—, 情報機構, 東京, 2008, pp. 65-70.
- 58) 湯澤質幸, 松崎寛, 音声・音韻探究法, 朝倉書店, 2004.
- 59) 荻阪直行, 感性のことばを研究する—擬音語・擬態語に読む心のありか—, 新曜社, 1999.
- 60) 田中真美, 長男征二, 江鐘偉, 疋田智弘, 触覚感性の計測(人間の触感と AE センサ出力の対比), 日本 AEM 学会誌, Vol.5, No.3 (1997), pp.28-34.
- 61) 鋤柄佐千子, 心地よい触感の追求—布の「しっとり感」, 「ぬめり感」—, 繊維学会誌, Vol.64, No.12 (2008), pp.404-408.

- 62) 近井学, 白井奈穂美, 塩野谷明, Ashu MARASINGHE, 三宅仁, 触覚官能評価のための基準試料の役割, 感性工学, Vol.13, No.1 (2014), pp.1-10.
- 63) Manabu CHIKAI, Akira SHIONOYA, Ashu MARASINGHE and Hitoshi MIYAKE, A Cognitive Psychological Approach to Identify The Significant of The Role of Visual Sense in Haptic Sense, 2013 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering, (2013), pp.72-72.
- 64) 篠田裕之, 器用な手の皮膚と触覚. 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.18 (2000), pp.767-771.
- 65) 本田技研工業株式会社, 脚式移動ロボットの歩行制御装置, 特許第 3148830 号.
- 66) Yamauchi T., Okamoto S., Konyo M., Hidaka Y., Maeno T. and Tadokoro S., Real-Time Remote Transmission of Multiple Tactile Properties through Master-Slave Robot System, Proc. of the 2010 IEEE international conference on robotics and automation, IEEE, Anchorage, 2010, pp.1753-1760.
- 67) Howard R. Nicholls and Mark H. Lee, A Survey of Robot Tactile Sensing Technology. The International Journal of Robotics Research, Vol.8, No.3 (1989), pp.3-30.
- 68) 藤本勲, 山田陽滋, 前野隆司, 森園哲也, 梅谷陽二, PVDF フィルムを用いたヒトの指に学ぶ静摩擦覚を有するフィンガスキンの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.22 (2004), pp.806-814.
- 69) 田中由浩, 田中真美, 長南征二, 手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測, 日本機械学会論文誌 (C), Vol.73, No.727 (2007), pp.817-824.
- 70) 近井学, 神田和也, 鄭耀陽, 島田邦雄, MCF による複合材料の等価回路モデル, 実験力学, Vol.8, No.4 (2008), pp.371-376.
- 71) 関喜一, 感覚代行技術, 電子情報通信学会誌, Vol.85, No.4 (2002), pp.241-244.
- 72) 島田茂伸, 篠原正美, 安彦成泰, 下条誠, オプタコンの機械特性と人間の触覚特性との適合度に関する研究, 電子情報通信学会論文誌 (D). Vol.91, No.5 (2008), pp.1296-1304.
- 73) 渡辺哲也, 山口俊光, 渡部謙, 秋山城治, 南谷和範, 宮城愛美, 大内進, 視覚障害者用触地図自動作成システム TMACS の開発とその評価, 電子情報通信学会論文誌 (D). Vol.94, No.10 (2011), pp.1652-1663.

- 74) 渡辺哲也, 大内進, 土井幸輝, 点間隔を広げた点字の読みやすさに関する研究, 電子情報通信学会論文誌 (D). Vol.94, No.1 (2011), pp.191-198.
- 75) 和田親宗, 井野秀一, 庄司壽一, 伊福部達, 聴覚代行における触覚の利用方法の研究—触感の利用について—, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.96, No.243 (1996), pp.17-22.
- 76) 雨宮智浩, 知覚の非線形性を利用した牽引力感の提示, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5 (2012), pp.483-485.
- 77) 豊田航, 土井幸輝, 藤本浩志, 凸バーと凸点の識別容易性に関する研究, 電子情報通信学会論文誌 (D). Vol.94, No.4(2011), pp.694-701.
- 78) 馬場哲晃, 笠松慶子, 土井幸輝, 串山久美子, 温冷呈示を利用したビデオゲームインタラクションにおける手法の検討と開発, 情報処理学会論文誌. Vol.53, No.3 (2012), pp.1082-1091.
- 79) 井野秀一, 触覚ディスプレイ. Journal of Clinical Rehabilitation, Vol.19, No.8 (2010), pp.710-714.
- 80) 梶本裕之, 触覚ディスプレイ. 計測と制御, Vol.47, No.7 (2008), pp.566-571.
- 81) S. Choi and K. J. Kuchenbecker, Vibrotactile Display – Perception, Technology, and Applications –, Proceedings of the IEEE, Vol.101, Issue.9 (2012), pp.2093-2104.
- 82) 井野秀一, 泉隆, 伊福部達, ヒトの感覚特性に基づいたハプティックインタフェースの開発, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.1, No.4 (1999), pp.9-17.
- 83) 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川晶一, 藤田欣也, 物理的刺激に基づく擬似力覚の提示と計算に関する研究動向, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3 (2011), pp.379-390.
- 84) 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲, バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1 (2008), pp.15-23.
- 85) Nakao M., Kitamura R., Sato T. and Minato K., A Model for Sharing Haptic Interaction, IEEE transactions on haptics, Vol.3, No.4 (2010), pp.292-296.

- 86) 野崎貴裕, 鈴木祐介, 大西公平, 腱駆動を用いたマスタ・スレーブ型多自由度ロボットハンドによる力覚伝達, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.3 (2011), pp.297-303.
- 87) 吉田健志, 黒田嘉宏, 鍵山善之, 井村誠考, 木下秀文, 松田公志, 大城理, 腹腔鏡手術用鉗子先端に加わる作用力の計測と剥離操作における技能分析, 生体医工学, Vol.48, No.1 (2010) pp.25-32.
- 88) 八木橋操六, 糖尿病神経障害概論, 診療に役立つ糖尿病神経障害の新知識, 豊田隆謙監修, pp.58-87, 東京医学社, 2008.
- 89) Y. Feng, F. J. Schlosser and B. E. Sumpio, The Semmes Weinstein monofilament examination as a screening tool for diabetic peripheral neuropathy, Journal of vascular surgery, Vol.50, No.3 (2009), pp.675-682.
- 90) A. Nather, W. K. Lin, Z. Aziz, C. H. J. Ong, B. M. C. Feng and C. B. Lin, Assessment of sensory neuropathy in patients with diabetic foot problems. Diabetic Foot and Ankle 2011, Vol.2(2011), pp.1-5.
- 91) 井野秀一, 高橋紀代, 佐藤満, 吉村眞一, 大西忠輔, 中村幸男, 本田哲三, 末梢神経障害の定量的評価のための足底感覚計測システムに関する基礎的研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会, DVD 講演論文集, Spt.2013.
- 92) 近井学, 井野秀一, 高橋紀代, 大西忠輔, 佐藤満, 布川清彦, 土井幸輝, 吉村眞一, 足底皮膚にずれ刺激を呈示する装置の試作と閾値測定, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.113, No.195, pp.5-10, 2013.
- 93) 伊達久, 知覚・痛覚定量分析装置, 医科器械学, Vol.83, No.5 (2013), pp.456-462.
- 94) American Psychiatric Association[Eds.], Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, —Fourth Edition— Text Revision (DSMIV-TR,) American Psychiatric Association, Washington DC, 2000.
- 95) American Psychiatric Association[Eds.], Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders — Fifth Edition —, American Psychiatric Association, Arlington, 2013.
- 96) 山本淳一, 楠本千枝子, 自閉症スペクトラム障害の発達と支援, Cognitive Studies, Vol.14, No.4 (2007), pp.621-639.

- 97) 小枝達也, 広汎性発達障害・アスペルガー障害, 母子健康情報, Vol.55 (2007), pp.28-32.
- 98) 高橋智, 増淵美穂, アスペルガー症候群・高機能自閉症における「感覚過敏・鈍麻」の実態と支援に関する研究 本人へのニーズ調査から, 東京学芸大学紀要総合教育科学系, Vol.59 (2008), pp.287-310.
- 99) Manabu CHIKAI and Hitoshi MIYAKE, Development of a Novel Haptic Perception Device Using “Touch Blend,” Biomedical Engineering and Informatics 2011 4th International Conference, 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics Proceedings, Vol.3 (2011), pp.1279-1282.
- 100) 近井学, 三宅仁, Touch Blend を応用した触覚ディスプレイの開発, 生体医工学, Vol.51, No.2 (2013), pp.112-118.
- 101) Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky, The Intelligent Hand - An Experimental Approach to Human Object Recognition and Implications for Robotics and AI -, AI Magazine, Vol.15, No.1 (1994), pp.26-38.
- 102) Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky, Hand movements: A window into haptic object recognition, Cognitive Psychology, Vol.19 (1987), pp.342-368.
- 103) Sliman Bensmaia and Mark Hollins, Pacinian representations of fine surface texture, perception and psychophysics, Vol.67, No.5 (2005), pp.842-854.
- 104) 岡嶋克典, 心理物理測定法, 内川恵二編集, 感覚・知覚の科学 5 感覚・知覚実験法, 朝倉書店, 東京, 2008, pp.1-10.
- 105) 伊東章, 身のまわりの化学工学 第1回 金属は冷たく木は温かいのはなぜ(1) 熱伝導度のはなし, 化学工学, Vol.72, No.12, (2008), pp.706.
- 106) N. Asamura, N. Yokoyama, and H. Shinoda, A Method of Selective Stimulation to Epidermal Skin Receptors for Realistic Touch Feedback, Proc. IEEE Virtual Reality '99 Conference, Houston, 1999, pp.274-281.
- 107) 近井学, 三宅仁, 発達障害児の触覚機能診断装置の開発, 医科器械学, Vol.84, No.1 (2014), pp.18-22.
- 108) 篠田裕之, 触感覚特性の科学と技術がひらく未来, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.5 (2012), pp.454-455.

- 109) 川人光男, ブレイン・ネットワークインタフェース, 電子情報通信学会誌, Vol.91, No.2 (2008), pp.123-130.
- 110) 川人光男, 脳情報通信とブレイン・マシン・インタフェース, バイオフィードバック研究, Vol.36, No.2 (2009), pp.101-107.
- 111) Manabu CHIKAI, Mohammad A. FARD and Hitoshi MIYAKE, Characterization of the Role of Contact Surface Temperature on the Perception of Hand-Transmitted Vibrations, 15th International Conference on Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings, Vol.43 (2013), pp.432-435.
- 112) 厚生労働省人口動態統計 —平成 23 年 (2011) 人口動態統計 (確定数) の概況 第 6 表性別にみた死因順位 (第 10 位まで) 別死亡数・死亡率 (人口 10 万対)・構成割合, 平成 24 年 9 月 6 日公表.
- 113) P. K. Thomas, Classification, Differential Diagnosis, and Staging of Diabetic Peripheral Neuropath, Diabetes, Vol.46, Suppl.2 (1997), pp.S54-S57.
- 114) 寺師浩人, 糖尿病性足病変, 足の創傷をいかに治すか —糖尿病フットケア・Limb Salvage へのチーム医療—, 市岡滋, 寺師浩人編著, pp.58-71, 克誠堂出版, 2009.
- 115) 近井学, 三宅仁, 温覚・冷覚と他触覚感覚同時刺激の影響, Biomedical Thermology, Vol.32, No.2 (2013), pp.65-71.
- 116) 都甲潔, 味覚と嗅覚の感性情報処理と味・匂いを数値化するセンサの開発, 電子情報通信学会誌, Vol.92, No.11 (2009), pp.949-951.
- 117) 小野田恵子, 池田稔, 小早川達, 小川尚, 脳磁場計測および中枢性味覚障害例による味覚中枢の検討, 日本味と匂学会誌, Vol.19, No.1 (2012), pp.27-34.
- 118) Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Yasuhiro Ishigure, Hisayuki Shimomura, Masato Matsumura and Kazumi Koketsu, Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III, IEEE Transactions on Haptics, Vol.4, No.1 (2011), pp.14-27.
- 119) 梶本裕之, 遠隔ハプティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6 (2012), pp.599-601.
- 120) 石井沢実, 桂誠一郎, 触覚放送のための連結型マルチラテラル制御による触覚伝送ネットワークの構築, 電気学会論文誌 (D), 産業応用部門誌, Vol.131, No.3 (2011), pp.343-349.



- 121) 小野正弘, 擬音語・擬態語 4500 日本語オノマトペ辞典, 小学館, 2007.
- 122) Gescheider G. A., Bolanowski S. J., Pope J. V. and Verrillo R. T., A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory and Motor Research*, Vol.19, No.2 (2002), pp.114-124.
- 123) Andrew M. Gordon, Goran Westling, Kelly J. Cole and Roland S. Johansson, Memory Representations Underlying Motor Commands Used during Manipulation of Common and Novel Objects, *Journal of Neurophysiology*, Vol.69, No.6 (1993), pp.1789-1796.
- 124) Daniel Kahneman and Amos Tversky, Subjective probability: A judgment of representativeness, *Cognitive Psychology*, Vol.3, No.3 (1972), pp.430-454.
- 125) 中野健, 車田研一, 表面に触れて表面を知る —触覚情報源としての摩擦現象—, *表面科学*, Vol.29, No.4 (2008), pp.260-263.
- 126) Burstrom L. and Lundstrom R., Absorption of vibration energy in the human hand and arm, *Ergonomics*, Vol.37, No.5 (1994), pp.879-890.
- 127) Vlado Goglia, Zlatko Gospodaric, Dubravko Filipovic and Igor Djukic, Influence on operator's health of hand-transmitted vibrations from handles of a single-axle tractor, *Ann Agric Environ*, Vol.13, No.1 (2006), pp.33-38.
- 128) M. S. Shayaa, J. A. Giacomini, E. Dormegnien and L. Richard, Human Perception of Sinusoidal Rotational Steering Wheel Vibration. Proceedings of the 36th United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration, held at Centre for Human Sciences, QinetiQ, Farnborough, United Kingdom, 12th - 14th September 2001.
- 129) J. S. Cundiff, Energy dissipation in human hand-arm exposed to random vibration, *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol.59, No.1 (1976), pp.212-214.
- 130) Lidstrom I. M., Vibration injury in rock drillers, chisellers, and grinders: some views on the relationship between the quantity of energy absorbed and the risk of occurrence of vibration injury, Wasserman DE, Taylor W, Curry MG [Eds.] Proc Int Occupational Hand-Arm Vibration Conference, Cincinnati, NIOSH publication, Vol.77, No.170 (1977), pp.77-83.

# 付録A 触知覚メカニズムの感性工学 実験

## A.1 本章の目的

本章では、第1章1.4節で述べた、ヒトの触知覚メカニズムに関する感性工学実験を行う。ここでは、呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について議論し、今後の触覚の感性工学実験の指標を示すことを目指す。

これらの先行研究として、早川ら<sup>34)</sup>は、16種類の試料を用いて触り心地の分類を行った。この評価では触覚のオノマトペ表現に着目している。オノマトペ表現とは感覚の擬音語・擬態語の総称であり<sup>58)59)</sup>、この表現には触覚に関するものも多数存在する。例えば、日本語には「ふかふか」「ぐにゃぐにゃ」「ざらざら」などの擬態語がある。これらは一言で触覚を表現・再現することができるため、日本人同士の会話でよく使われている。前野<sup>35)</sup>は、20種類の試料を用いてヒトの触知覚メカニズムの解明を行った。この評価では、SD (Semantic Differential) 法を用いた官能評価を実施した。ヒトの触り心地に関する研究は、布の風合いや化粧品開発において行われており、田中ら<sup>60)</sup>は、5種類の布を用いた官能評価実験を行った。この評価では、ヒトの触覚感性与セラミック圧電センサを用いて、ヒトの触覚感性量を計測した。鋤柄<sup>61)</sup>は複数の素材の布を用いて、ヒトの触覚感性の計測を行った。この計測結果からヒトが布から受ける手触り感を分析し、布から受ける心地よさの客観的指標を提案した。これらの研究では、被験者へ呈示する基準試料の条件について定められておらず、触覚の感性工学実験の指標が定められていない。そこで、ここでは、触知覚に関する評価実験において、評価基準（基準試料）の必要性に関して評価を行う。併せて、触知覚時の視覚情報の重要性について評価を行う。

## A.2 評価実験方法

官能評価実験として、官能評価実験(1)と官能評価実験(3)は基準試料を用いて物体に直接接触れる実験、官能評価実験(2)は基準試料を用いて視覚による情報を含んだ状態での物体に直接接触れる実験、官能評価実験(4)は基準試料を用いず、かつ視覚

を遮断した状態で物体に直接接触する実験、官能評価実験（5）は物体に触れず視覚のみで評価する実験とした。

物体に触れた時の触知覚における視覚の影響を評価するという観点から、図 A.1 に示すように官能評価実験（1）と官能評価実験（2）を比較した。この官能評価実験の比較を比較 1 とした。また、基準試料の影響を評価するという観点から、図 A.2 に示すように官能評価実験（3）と官能評価実験（4）を比較した。この官能評価実験の比較を比較 2 とした。最後に、視覚による物体の触知覚の影響を評価する観点から、図 A.3 に示すように官能評価実験（4）と官能評価実験（5）を比較した。この官能評価実験の比較を比較 3 とした。なお実験回数は、被験物への順応反応の影響を排除するため 1 回と定めた。

5 種類の官能評価実験で用いる被験物を選定する条件を“タオルで顔を拭く”や“ウレタンスポンジを使う”，そして“ガラスや陶器の食器を使う”などのヒトが日常的に触れている素材とした。またヒトが普段触れている物体を再現するためすべての被験物の直径と質量は異なるようにした。一方、能動的触知覚による評価を行うため、形状による触知覚変化が生じないように、球形被験物を選定した。これらの条件に合致した被験物を図 A.4 に示し、また表 A.1 に示した。

また、官能評価実験（1）と官能評価実験（2），そして官能評価実験（3）で用いる基準試料を図 A.5 に示す。前野<sup>35)</sup>の先行研究では、評価基準の変動を防ぐためにひのきを基準試料に用い被験者に被験物と随時比較させる手法を用いたため、本研究でも同様に行った。ひのきの直径は 34.5 mm，重量は 9.16 g である。

5 種類の官能評価実験で用いる触知覚の評価項目は、触覚のオノマトペ表現<sup>121)</sup>に着目した。オノマトペは、感覚の擬音語・擬態語の総称であり、一言で触覚を表現することができる。そのため、被験者が 20 種類の被験物に触れた時の触覚を評価しやすく、また他の被験者との評価が容易であるという点から、オノマトペを評価項目に選定した。触覚に関するオノマトペは、非常に多種多様であることから、評価言語にするにあたり、条件を設けた。早川ら<sup>34)</sup>は、音韻論的分析を行うために 2 モーラの繰り返し型のオノマトペのみを抽出しており、本研究でも同様の方法で触覚に関するオノマトペ表現を抽出した。この評価言語から、同一な触覚表現・紛らわしい表現を排除するため、クラスター分析を実施し、その結果から、表 A.2 に示す 18 語を選定した。5 種類の官能評価実験においてこの評価項目を用いて単極尺度 7 段階を用いて評価を実施した。なお、本実験は本学研究倫理委員会の認可を受けており、被験者から書面にて同意を得て実施した。それぞれの方法を以下に詳述する。

## 比較 1・物体に触れた時の触知覚における視覚の影響を評価する実験

両者の実験とも、同一の被験者 30 名 (21.4 ± 1.6 歳) を用いた。なお、本実験は被験者内実験である。評価実験は、触知覚における視覚の影響を評価するという観点から、初日に官能評価実験 (1)、2 日目に官能評価実験 (2) を 2 日に分類し実施した。

実験の手順について説明する。以下のように実験を実施した。両者の実験を同

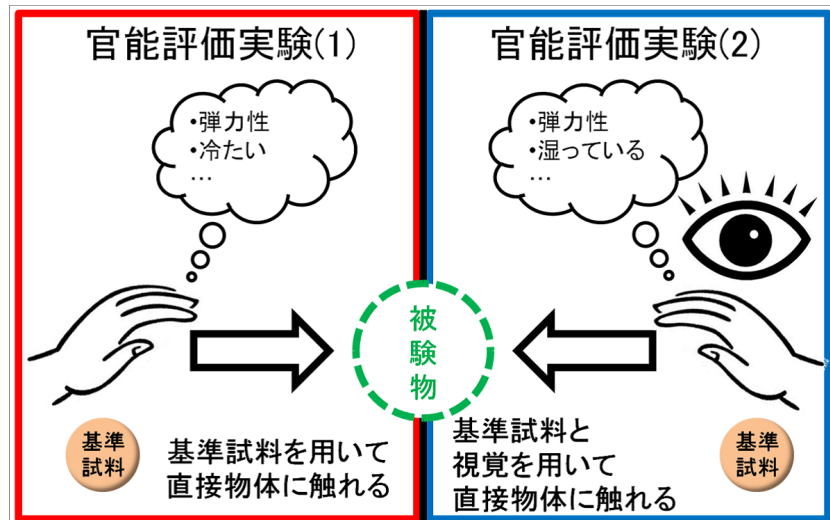


図 A.1: 比較 1・物体に触れた時の触知覚における視覚の影響を評価する実験

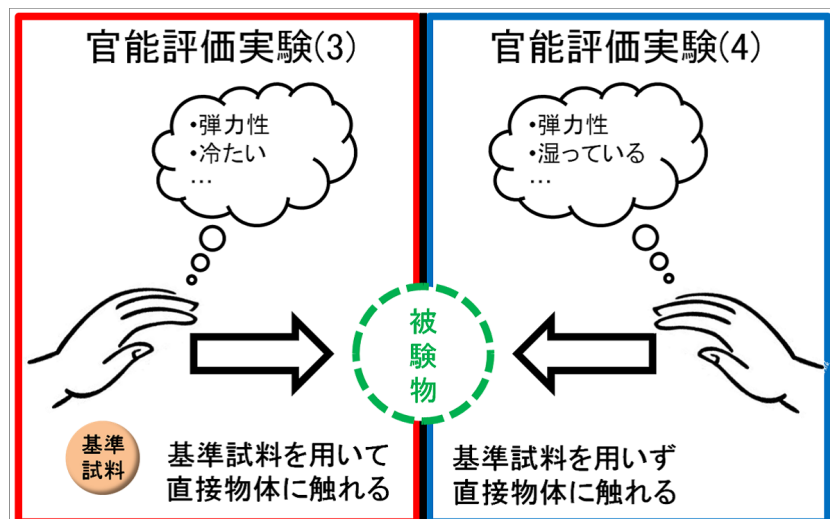


図 A.2: 比較 2・物体に触れた時の触知覚における基準試料の影響を評価する実験

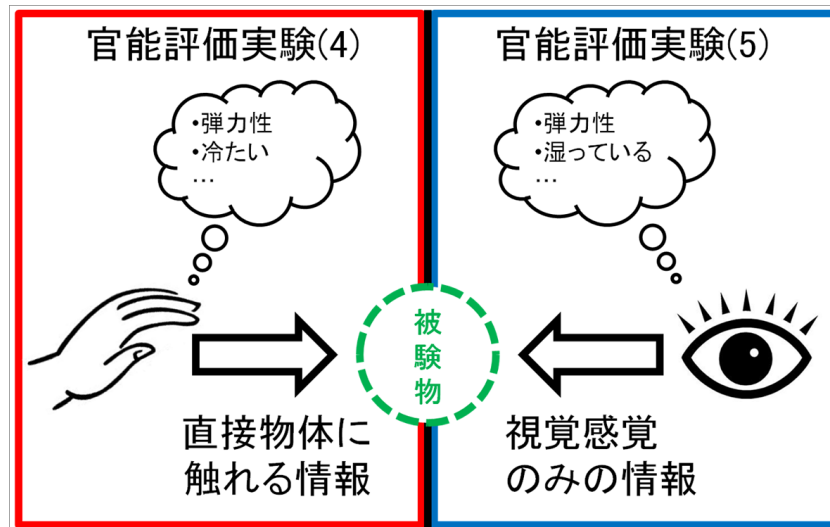


図 A.3: 比較3・視覚による物体の触知覚の影響を評価する実験

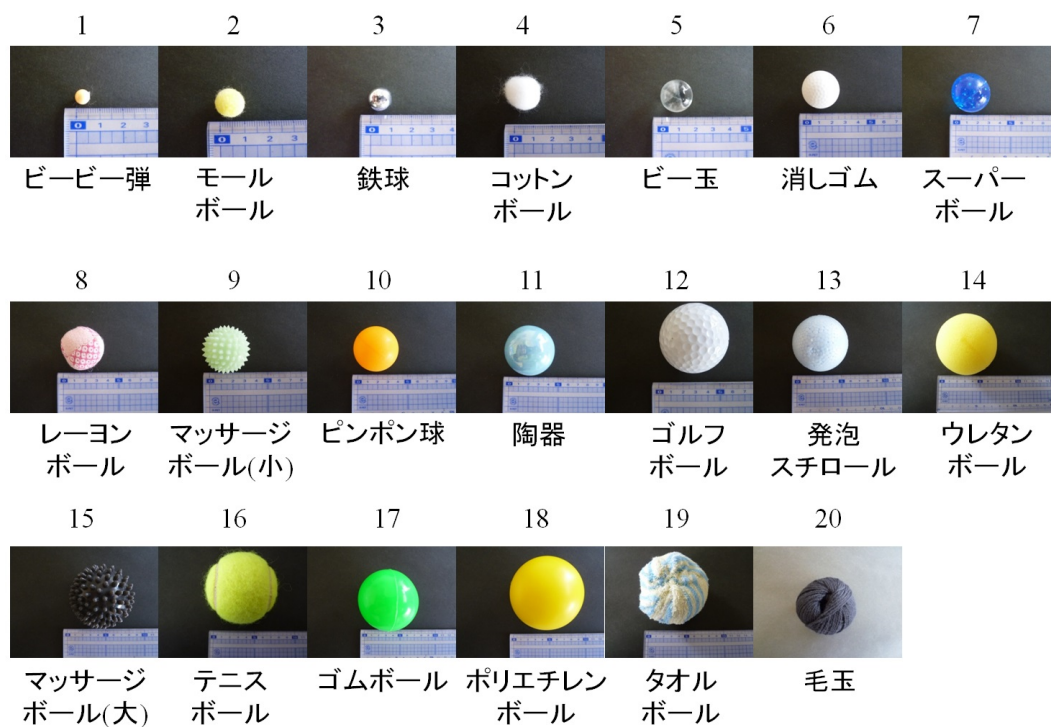


図 A.4: 20種類の球形被験物



図 A.5: 基準試料に用いたひのきボール

様の実験手順により実施した。

手順1 被験者の温度順応を均一にするため、被験者を室内で10分程度待機させる。これは、順応反応による時間加重特性<sup>122)</sup>を踏まえ、温度順応の影響を排除した上で実験を実施する。

手順2 被験者に、評価実験方法について説明する。

手順3 20種類の被験物を評価する基準の変動を防ぐため、あらかじめ基準試料(ひのき)を手渡し、被験者に評価基準を設けさせる。

手順4 実験者は、被験物を被験者に手渡す。

手順5 被験者は、能動的触知覚<sup>3)</sup>により、被験物に触れながら18種類の評価言葉を単極尺度7段階で評価する。

手順6 被験者は、被験物、評価シートを実験者に手渡す。

手順7 順応反応の影響を排除するため1分間程度の休憩を設ける。

以上の流れで行い、手順3から手順7を20種類の試料について繰り返した。それぞれの官能評価実験の方法を以下に詳述する。

官能評価実験(1)では、評価実験をブラックボックス内で実施することで、被験者が物体に触れて触知覚を行う場合の視覚の影響を限りなく減少させた。実験室の実験環境は、熱暑環境計(京都電子工業株式会社製、WBGT-113)を用いて計測し、実験実施時の平均室内温度  $20.1 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 、平均室内湿度  $57.4 \pm 3.7\%$ であった。

官能評価実験(2)では、被験者は触覚と視覚を用いて触知覚を行う。実験室の実

験環境は、熱暑環境計を用いて計測し、実験実施時の平均室内温度  $20.1 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 、平均室内湿度  $50.7 \pm 3.2\%$  であった。

表 A.1: 被験物の質量・直径・表面積・体積・密度・熱伝導率

被験物	計測値					
	重量 [g]	直径 [mm]	表面積 [mm <sup>2</sup> ]	体積 [mm <sup>3</sup> ]	密度 [g/mm <sup>2</sup> ]	熱伝導率 [W/(m.K)]
ビービー弾	0.130	6.90	7.48E01	1.72E02	7.56E-04	0.220
モールボール	0.0600	9.36	1.38E02	4.49E02	1.34E-04	0.160
鉄球	5.45	11.0	1.89E02	6.97E02	7.82E-03	84.0
コットン ボール	0.190	14.7	3.39E02	1.73E03	1.10E-04	0.0350
ビー玉	6.20	16.8	4.43E02	2.48E03	2.50E-03	0.650
消しゴム	14.4	24.7	9.58E02	7.89E03	1.82E-03	0.160
スーパー ボール	12.9	30.2	1.43E03	1.44E04	8.95E-04	0.250
レーヨン ボール	2.72	30.4	1.45E03	1.52E04	1.80E-04	0.580
マッサージ ボール(小)	7.75	32.6	1.67E03	1.81E04	4.27E-04	0.200
ピンポン玉	2.50	37.7	2.23E03	2.81E04	8.91E-05	0.210
陶器	32.7	41.4	2.69E03	3.72E04	8.81E-04	1.30
ゴルフボール	45.6	42.8	2.88E03	4.13E04	1.10E-03	0.150
発泡 スチロール ボール	1.78	49.6	3.87E03	6.39E04	2.79E-05	0.0300
ウレタン テニスボール	2.40	62.7	6.18E03	1.27E05	1.90E-05	0.0260
マッサージ ボール(大)	44.4	64.1	6.45E03	1.37E05	3.25E-04	0.160
テニスボール	56.3	64.8	6.60E03	1.43E05	3.94E-04	0.0400
カラーボール	23.3	66.7	6.98E03	1.51E05	1.54E-04	0.150
クッション カラーボール	30.1	73.9	8.58E03	2.11E05	1.42E-04	0.0260
タオルボール	33.4	74.5	8.71E03	2.18E05	1.53E-04	0.540
毛玉	39.7	94.9	1.42E04	4.42E05	8.99E-05	0.0500
ひのき	9.16	34.5	1.87E03	2.19E05	4.19E-04	0.120

表 A.2: 本研究で新たに選定したオノマトペ言語

オノマトペ表現	評価言語が表す触覚感覚
ぐにゃぐにゃ	物体の弾力性
さらさら	物体表面の摩擦度
べちゃべちゃ	物体表面の湿り具合
ねばねば	物体表面の粘着性
べたべた	物体表面の粘着性（例えばテープなどから受ける刺激）
ふさふさ	物体の柔軟性（例えば羽から受ける刺激）
ぬるぬる	物体表面の水分含有率
こちこち	物体の硬度
ふかふか	物体の弾力性と柔軟性（例えばぬいぐるみに触れた時の刺激）
もちもち	物体の柔軟性と粘着性
ぶるぶる	物体から受ける振動刺激
ほかほか	物体から受ける温感刺激
ひやひや	物体から受ける冷感刺激
がさがさ	物体表面の線形状のテクスチャ刺激
ざらざら	物体表面の点形状のテクスチャ刺激
ごつごつ	物体表面の硬度刺激（例えば岩に触れた時の刺激）
ちくちく	物体から受ける痛覚刺激
ずきずき	二次痛覚（鈍痛）

## 比較 2・基準試料に関する官能評価実験方法

評価実験は、基準試料の影響を評価するという観点から、官能評価実験 (3) と官能評価実験 (4) を 2 日に分類し実施した。両者の実験とも、同一の被験者 30 名 (22.3 ± 1.3 歳) を用いた。なお、本実験は被験者内実験である。この 30 名を 15 名 × 2 グループに無作為に分割し、それぞれをグループ A、グループ B と名付けた。グループ A は、初日: 官能評価実験 (3)、2 日目: 官能評価実験 (4) の順序で実験を実施し、一方で、グループ B は、初日: 官能評価実験 (4)、2 日目: 官能評価実験 (3) の順序で実験を実施した。なお、実験の実施は 2 日間とした。

実験の手順について説明する。以下のように実験を実施した。

手順 1 被験者の温度順応を均一にするため、被験者を室内で 10 分程度待機させる。これは、順応反応による時間加重特性<sup>122)</sup>を踏まえ、温度順応の影響を排除した上で実験を実施する。

手順 2 被験者に、評価実験方法について説明する。



(基準試料を用いる実験では、)

手順3 あらかじめひのきを手渡し、被験者に評価基準を設けさせる。

手順4 実験者は、被験物を被験者に手渡す。

手順5 被験者は、能動的触知覚<sup>3)</sup>により、被験物に触れながら18種類の評価言葉を単極尺度7段階で評価する。

手順6 被験者は、被験物、評価シートを実験者に手渡す。

手順7 順応反応の影響を排除するため1分間程度の休憩を設ける。

官能評価実験(3)では、手順3から手順6を20種類の資料について繰り返す。一方で、官能評価実験(4)では、手順3を省略し、手順4から手順7を20種類の試料について繰り返す。

官能評価実験(3)と官能評価実験(4)は、評価実験をブラックボックス内で実施することで、被験者が物体に触れて触知覚を行う場合の視覚の影響を限りなく減少させた。実験室の実験環境は暑熱環境計を用いて計測し、官能評価実験(3)では平均室内温度 $19.3 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 、平均室内湿度 $54.0 \pm 2.5\%$ であり、官能評価実験(4)では平均室内温度 $19.1 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 、平均室内湿度 $54.3 \pm 2.4\%$ であった。

### 比較3・視覚による物体の触知覚の影響を評価する実験

評価実験は、視覚による物体の触知覚の影響を評価するという観点から、比較2で実施した官能評価実験(4)の評価実験結果と官能評価実験(5)を比較した。官能評価実験(4)の被験者は前述のとおり被験者30名( $22.3 \pm 1.3$ 歳)を用いた。一方、官能評価実験(5)は、図A.6に示すような匿名のウェブアンケート方式で評価を実施した。評価対象者は、長岡技術科学大学経営情報システム工学課程1年生から長岡技術科学大学経営情報システム工学専攻2年生とした。官能評価実験(4)の実験の手順については、前述の通りである。官能評価実験(5)の実験の手順について説明する。以下のように実験を実施した。

手順1 実験者は、図A.6に示すようなウェブアンケートシステムを構築する。

手順2 被験者は、用意されたウェブアンケートシステムにアクセスし、ディスプレイに表示された物体の写真を視覚で知覚し、その物体に触れた時の物体の触感覚イメージ(連想される触覚)を回答する。

手順3 被験者は、18種類の評価言葉を単極尺度7段階で評価する。

官能評価実験 (5) では、手順 2 から手順 3 を 20 種類の試料について繰り返す。実験室の実験環境は暑熱環境計を用いて計測し、官能評価実験 (4) では平均室内温度  $19.1 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 、平均室内湿度  $54.3 \pm 2.4 \%$  であった。

### A.3 評価実験結果

評価実験結果を比較するため、比較 1 {官能評価実験 (1) と官能評価実験 (2)}、比較 2 {官能評価実験 (3) と官能評価実験 (4)}、比較 3 {官能評価実験 (4) と官能評価実験 (5)} での値の検定を実施した。

ここで、比較 1 と比較 2 は被験者内実験であることに留意し、はじめに正規性の検定を行いパラメトリックデータとノンパラメトリックデータに選定した。その結果から適合度検定を行い、比較 1 間での値の適合度検定、比較 2 間での値の適合度検定を行う。結果の比較方法として、比較 1、比較 2 の評価実験により得られた尺度値の正規性の検定を実施した。一例を示すと、被験者 30 名がビービー弾の「ぐにゃぐにゃ」を回答した結果が正規分布に従っているかを検定した。つまり、1 つの被験物に対して 18 種類の評価項目があることから、正規性の検定は 360 種類となる。また、比較 1 と比較 2 があるため、すべての実験結果を含めると  $360 \times 2 = 720$  種類となる。ここで、本研究で用いている単極尺度値は順位尺度であることから、検定方法は Kolmogorov-Smirnov の正規性の検定とした。

正規性の検定結果から、両実験のほとんどの項目において正規分布に従わない結果

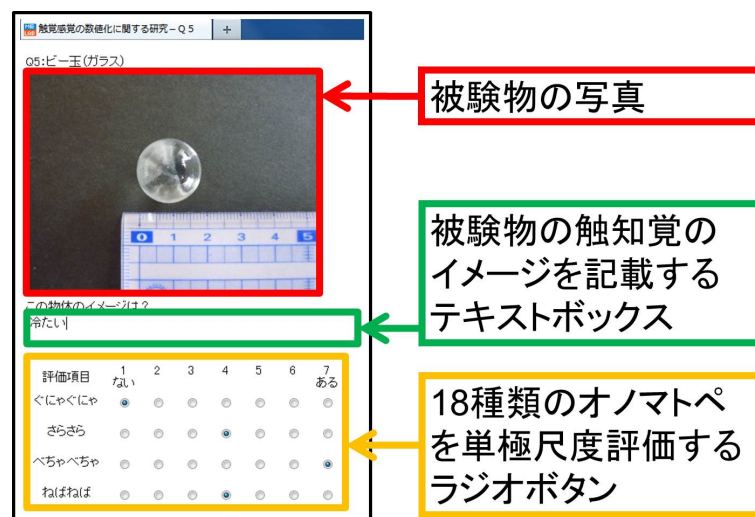


図 A.6: 匿名方式のウェブアンケートシステム

(ノンパラメトリック) が得られたが、一部の項目において正規分布に従う結果 (パラメトリック) が得られた。以上から、2つの評価実験結果の適合度検定手法は Wilcoxon の符号付き順位検定を採用した。また、両者の正規性検定結果が共にパラメトリック値の場合は  $t$  検定を採用した (一方の評価実験結果の正規性がない場合は、Wilcoxon の符号付き順位検定を行った)。統計解析は、両側 95 % 信頼区間に基づいて行われた。なお、統計解析には IBM SPSS Statistics Ver.21 を用いた。

適合度検定結果から、すべての有意確率値 ( $p$  値) が 0.05 を上回っていたため、すべての評価実験において被験者の官能評価結果に差がないことが示された。官能評価実験 (1) と官能評価実験 (2) を実施し、触知覚における視覚の影響を評価した。その結果から、すべての被験物において、官能評価結果に差がないことが示された。以上から、触知覚における視覚の影響は極めて少ないことが考えられる。一方、官能評価実験 (2) において、被験者は物体に触れる前に、視覚から被験物の触覚的特徴を把握していることが考えられる。言い換えると触覚記憶<sup>123)</sup> が影響している可能性が考えられる。そこで触覚記憶の影響を評価するため比較 3 を実施した。その結果から、触覚のマルチモーダル (多感覚) 情報の統合過程を考察する。

官能評価実験 (3) と官能評価実験 (4) を実施し、触知覚に関する評価実験での基準試料の必要性を評価した。ここで、基準試料の有無について、図 A.7 のようにまとめる。基準試料がある場合、認知心理学の分野で定義されている認知バイアスが影響すると考えられる。認知バイアスとは、ヒトが普段の生活において対象 (物体) を知覚・評価する際に、自らの意思に沿った方向に考えが歪められる、もしくは印象が目立ちやすい特徴に左右され、他の特徴についての知覚や評価に影響があるというものである<sup>124)</sup>。このことから、本研究で実施した基準試料を用いない場合、被験者の記憶を頼りに評価基準が定められていると考えられる。そのため、本研究のような触知覚メカニズムを解明する評価実験においてはバイアス効果を防ぐための基準試料は重要であると示唆される。しかし一方で、基準試料があることで、被験物の評価が基準試料の特性 (熱伝導率やヤング率など) に依存し、本来の触知覚が行えなくなるという欠点がある。実際、基準試料を用いる場合、被験者の実験時間が大幅に延びることがわかっている。基準試料を用いることで、以上のような触知覚の利点・欠点が考えられる。基準試料がない場合、被験者の認知バイアスは定められなくなり、前者の欠点である評価試料の特性には依存せず、被験者の触知覚を評価できるという利点がある。しかし、基準試料による評価基準がないため、被験者は被験物に触れた際、前述の触覚記憶を用い、評価を行っていると考えられる。この触覚記憶を頼りに評価を行っていることで、評価基準が曖昧になる恐れがあると考えられる。

以上をまとめると、図 A.7 のように基準試料を用いることでの利点・欠点があるが、

評価実験結果から触知覚に関する評価実験での基準試料の必要性・触知覚に関する評価実験の指標を考察すると、本実験結果からは官能評価実験(3)と官能評価実験(4)において有意差は認められなかった。すなわち、触知覚に関する評価実験では、基準試料の必要性はないと示唆され、今後の触知覚に関する評価実験の指標が得られた。

官能評価実験(4)と官能評価実験(5)を実施し、視覚による物体の触知覚メカニズムを解明した。評価実験結果から、ヒトは視覚や触覚の情報を中枢で知覚する際、物体に関してある程度の感覚の特徴を把握しており、これを記憶しているということが結果から示唆された。岩村<sup>28)</sup>は、触覚記憶を活かす場面において言及しているが、物体を掴むや摘むという深部感覚知覚の他に、触れるという触知覚にも影響しているということが評価実験結果から明らかとなった。また、中野ら<sup>125)</sup>は、天然珪砂を用いて触感の記憶力を評価しており、本研究では中野ら<sup>125)</sup>が行ったなぞり動作の他に、触知覚の触覚記憶を言及するためにも、新たな実験系を構築し再検討する必要がある。

		基準試料の有無	
		有	無
利点・欠点	利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>•被験者の認知バイアスが定められる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•評価試料の特性に依存しない</li> </ul>
	欠点	<ul style="list-style-type: none"> <li>•評価試料の特性に依存する</li> <li>•実験時間が延びる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•物体の記憶(触覚記憶)が影響する</li> </ul>

図 A.7: 基準試料の役割

## A.4 本章のまとめ

本章では、触知覚に関する評価実験においての、評価基準(基準試料)の必要性に関して評価を行った。併せて、触知覚時の視覚情報の重要性について評価を行った。評価実験結果から、触知覚メカニズムの解明を行うための感性工学実験における呈示する基準試料の条件や触知覚時の視覚情報の重要性について議論し、今後の触覚の感性工学実験の指標を示した。

# 付録B Touch Blendの確認実験

## B.1 本章の目的

本章では、心理学的アプローチによりヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感などの触覚を呈示する手法を提案することを目指す。先行研究として第1章1.3節に示した、Touch Blendという触覚呈示を要素触覚を合成させて行うという考え方と、それを実現するための5つの要素感覚を四角錐の頂点に配置した触覚の構造表現であるTouch Pyramidに着目する。Touch Blendは、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できるという考え方であり、またTouch Pyramidは、その方法を具現化するための基本触覚の幾何学的な配置の仕方と任意の触覚の表現方法を決めている。この手法に基づき呈示される触覚は、5つの要素感覚を頂点とする四角錐の辺に位置し、その合成方法は、その辺の両端の頂点に位置する要素感覚との近さにより重み付けする。TitchenerはTouch Pyramidにより、ヒトが普段知覚している物体の表面に触れて知覚している触覚を概念上において説明できるとしている。

ここでは、触覚を呈示する手法を提案するため、任意の触覚を要素触覚の物理的な合成により呈示する触覚生成方法の評価実験を行う。はじめに、要素触覚を合成させて触覚呈示するという考え方が正しいと仮定し、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法を定める。次に、ヒトに知覚させる刺激は第1章1.2節に示す触覚の生理学的知見を参考とし、呈示する感覚を定義する。そして、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために、心理物理実験と先行研究の調査を行う。これらを踏まえ、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できる触覚生成方法の評価するための簡易的な感覚呈示装置（触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つの感覚を工学的に生成する装置、以下、簡易呈示装置と記す）を試作する。簡易呈示装置を用いて、ヒトに基本触覚を擬似的に合成して呈示し、触覚が惹起されるかをどうかを評価する。この評価実験は、ヒトに試作した装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）を惹起することができるかどうかを評価指標とする。この評価指標に基づき、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法の評価する。この評価結果から、要素触覚を合成させて行うという方法による触覚呈示の利点や欠点を探り、これらを解消した物理的な触覚呈示手法を提案する。

以上より、触覚を呈示する手法を提案するため、任意の触覚を要素触覚の物理的な合成により呈示する触覚生成方法の評価実験を行う。はじめに、要素触覚を合成させて触覚呈示するという考え方が正しいと仮定し、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法を定める。次に、ヒトに知覚させる刺激は第1章1.2節に示す触覚の生理学的知見を参考とし、呈示する感覚を定義する。そして、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために、心理物理実験と先行研究の調査を行う。これらを踏まえ、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できる触覚生成方法の評価するための簡易的な感覚呈示装置（触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つの感覚を工学的に生成する装置、以下、簡易呈示装置と記す）を試作する。簡易呈示装置を用いて、ヒトに基本触覚を擬似的に合成して呈示し、触覚が惹起されるかをどうかを評価する。この評価実験は、ヒトに試作した装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）を惹起することができるかどうかを評価指標とする。この評価指標に基づき、物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法の評価する。この評価結果から、要素触覚を合成させて行うという方法による触覚呈示の利点や欠点を探り、これらを解消した物理的な触覚呈示手法を提案する。

## B.2 評価実験方法

評価実験方法として、はじめに物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法の検討を行う。次に、試作する簡易呈示装置が呈示すべき物理量の検討を行う。そして、簡易呈示装置の設計を行い、使用する電子素子の校正を行う。簡易呈示装置を用いた評価実験を行う。

### 物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法の検討

ヒトが知覚する触覚は生理学的分類によると触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つと分類されている<sup>5)</sup>。また、ヒトが知覚している感覚については、式(B.1)に示すウェーバー・フェヒナーの法則に示されているように、感覚受容器への入力情報の強度（物理的刺激の強さ:  $R$ ）により、感覚中枢への出力情報の強度（感覚の強さ:  $E$ ）が決定される<sup>104)</sup>。ただし、 $K$ は定数である。この出力情報が神経線維を伝搬し、感覚中枢で合成されることで複雑な触覚体験が行われるといわれている<sup>5)</sup>。

$$E = K \log R \quad (\text{B.1})$$

触覚呈示を要素触覚を合成させて行うという考え方が正しいと仮定し、物理的に再現可能な要素感覚により構成される四角錐を定める。この場合、Touch

Pyramid と同様，要素感覚を多面体の頂点に配置して，任意の2点を結ぶ辺には，ある触覚に対応するとする．ここで，Titchener が提案した Touch Pyramid は，5つの基本要素を用いていたため，頂点を5つ有する四角錐となっている．一方，ヒトが知覚する触覚は生理学的分類<sup>5)</sup>によると触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の5つと分類されていることから，触覚の生理学的知見においても要素感覚は5つとなることから，頂点を5つ有する四角錐を構築することができる．

簡易呈示装置が呈示し，ヒトに知覚させる刺激は第1章1.2節に示す触覚の生理学的知見を参考とし，以下のような素子を用いて生成する．

- 触圧覚を擬似的に生成させるための刺激は，被験者が簡易呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とする．
- 振動覚を擬似的に生成させるための刺激は，振動モータを用いて呈示する物理刺激とする．
- 温覚を擬似的に生成させるための刺激は，ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする．
- 冷覚を擬似的に生成させるための刺激は，ペルチェ素子を用いて呈示する物理刺激とする．
- 痛覚を擬似的に生成させるための刺激は，触圧覚を擬似的に生成させるための刺激と同様，被験者が簡易呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし，この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする．

以上を踏まえ，図1.2に示される Touch Pyramid の感覚要素を，図B.1に示すような，物理的に再現可能な5つの要素感覚に置き換えた，触覚生成方法を構成する．この方法を用いて，要素触覚を合成させて行うという手法による触覚呈示を行うための簡易的な感覚呈示装置（以下，簡易呈示装置と記す）の開発を行う<sup>99)100)</sup>．Titchener が提案した Touch Pyramid は，具現化するための基本触覚の幾何学的な配置の仕方と任意の触覚の表現方法を決めており，概念モデルである．一方，図B.1に示すような，物理的に再現可能な5つの要素感覚に置き換えた触覚生成方法は，各要素を物理的に生成することが可能である．

### 簡易呈示装置が呈示すべき物理量の検討

上記で定義した基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を見出すために，心理物理実験と先行研究の調査を行う．

触圧覚は，ヒトが物体に触れた時に生起する感覚である．能動的触知覚により触圧覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため，簡易呈示装置では圧力

センサによる圧力値制御方法を用いる。圧力センサにより装置表面の圧力値（被験者が触れている圧力値）をアナログオシロスコープで実験者が計測する。この計測結果を被験者へ口頭でフィードバックし、被験者自身が簡易呈示装置から被験者に加えられる圧力を制御する。これにより、被験者へ能動的触知覚により触圧覚を擬似的に生成させるための刺激を生起させることができる。心理物理実験結果から、ヒトが簡易呈示装置に触れている状態での触圧覚の物理刺激強度は  $1.5 \text{ N/m}^2$  得られ、触圧覚を擬似的に生起させるための圧力を  $15 \text{ N/m}^2$  とする。

振動覚は、ヒトが物体に触れた時の時間変化により生起する感覚である。振動覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、小型直流振動モータを用いる。Geldard<sup>16)</sup> はヒトが最も敏感に反応する振動周波数を  $200 \text{ Hz}$  と心理物理学実験より明らかにしており、簡易呈示装置において今回使用したモータにおいても  $200 \text{ Hz}$  程度の振動を与えることができる。この振動モータを被験者の人差し指の上側に配置し、振動覚を呈示する。

温覚は、ヒトが物体に触れている状態が続くことで生起する感覚である。温覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、ペルチェ素子を用いる。被験者に呈示する感覚量  $T$  は、第1章1.2節の触覚の生理学的知見からおおよそ  $40^\circ\text{C}$  とする。

冷覚は、温覚同様、ヒトが物体に触れている状態が続くことで生起する感覚である。冷覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、ペルチェ素子を

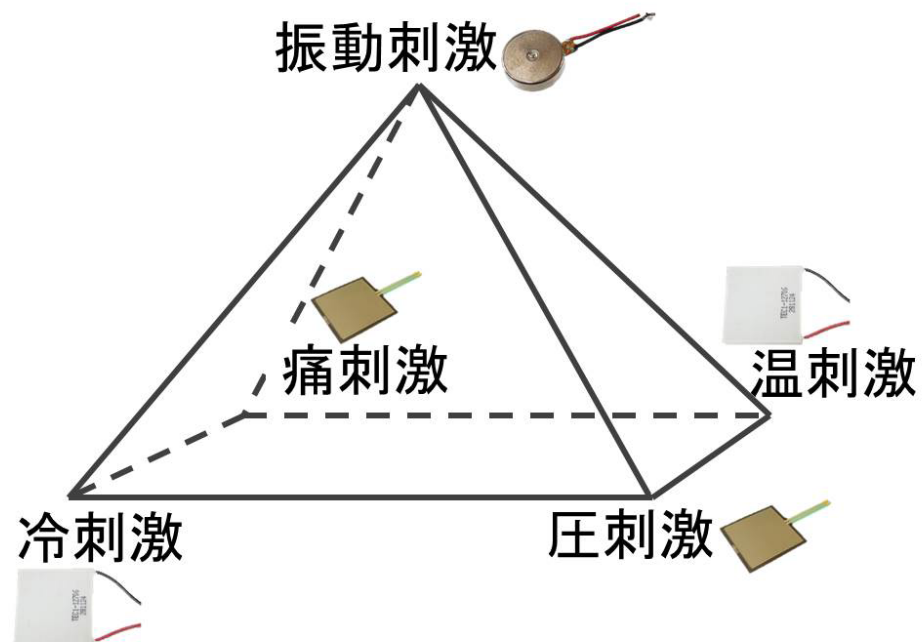


図 B.1: 物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法



用いる。被験者に呈示する感覚量  $T$  は、第1章1.2節の触覚の生理学的知見からおおよそ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  とする。

痛覚は、ヒトが物体に触れる面積変化や圧力変化により生起する感覚である。能動的触知覚により痛覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するため、簡易呈示装置では、触圧覚と同様、圧力センサによる圧力値制御方法を用いる。被験者が簡易呈示装置に能動的に触れた際に提供される物理刺激とし、この刺激強度を増大させた時に提供される鈍痛とする。なお、この呈示方法は、力 (N) 変化と面積 ( $\text{m}^2$ ) 変化があるが、本研究では力変化 (呈示面積一定) とする。痛覚を擬似的に生起させるための圧力は、触圧覚の閾値  $1.5\text{ N/m}^2$  や触圧覚の物理量  $15\text{ N/m}^2$  と区別し、 $45\text{ N/m}^2$  程度とする。

### 簡易呈示装置の設計

簡易呈示装置は、図 B.2 (A) に振動覚呈示用小型直流振動モータ (東京パーツ社製, FM34F,  $\phi = 12.0\text{ mm} \times \text{H}3.40\text{ mm}$ )、図 B.2 (B) に小型直流振動モータと被験者右手人差し指を固定するためのプレート、図 B.2 (C) に装置表面を保護するための厚さ  $1\text{ mm}$  の合成ゴム、図 B.2 (D) に触圧覚と痛覚 (圧痛) 刺激強度を制御するための圧力センサ (Interlink Electronics 社製, FSR406,  $\text{W}43.7 \times \text{D}43.7 \times \text{H}1.20\text{ mm}$ )、図 B.2 (E) に温覚呈示用ペルチェ素子と冷覚呈示用ペルチェ素子各1枚 (HB Electronic Components 社製, TEC1-12706,  $\text{W}40.0 \times \text{D}40.0 \times \text{H}3.80\text{ mm}$ )、図 B.2 (F) にペルチェ素子用放熱板、図 B.2 (G) に放熱ファンにより構成されている。併せて、簡易呈示装置は図 B.3 に示す通り、図 B.2 に示す装置本体、直流安定化電源 (TEXIO 社製, PW18-1.8AQ)、アナログオシロスコープ (TEXIO 社製, CS-4125A) である。

使用する圧力センサとペルチェ素子の校正については、第2章2.7節を参考とする。

### 簡易呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚

前述の心理物理実験や先行研究の調査から、簡易呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚を表 B.1 に示す。これらの物理量が簡易呈示装置の要求仕様である。

### 評価実験方法

評価実験では、簡易呈示装置を用いて、ヒトに基本触覚を擬似的に合成して呈示し、触覚が惹起されるかをどうかを評価した。この評価実験は、簡易呈示装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚 (ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など) をヒトに惹起することができるかどうかを評価指標とし

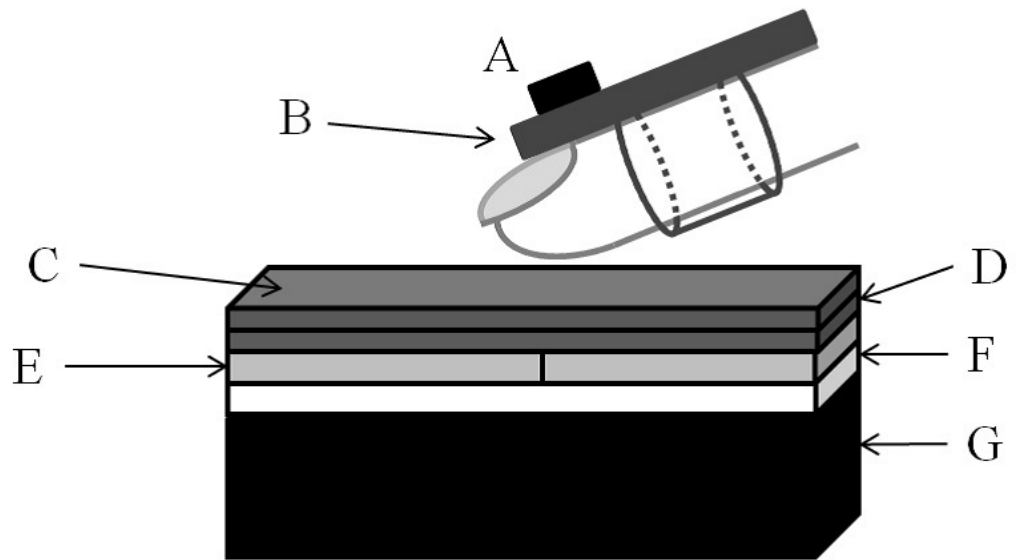


図 B.2: 簡易呈示装置本体の概略図

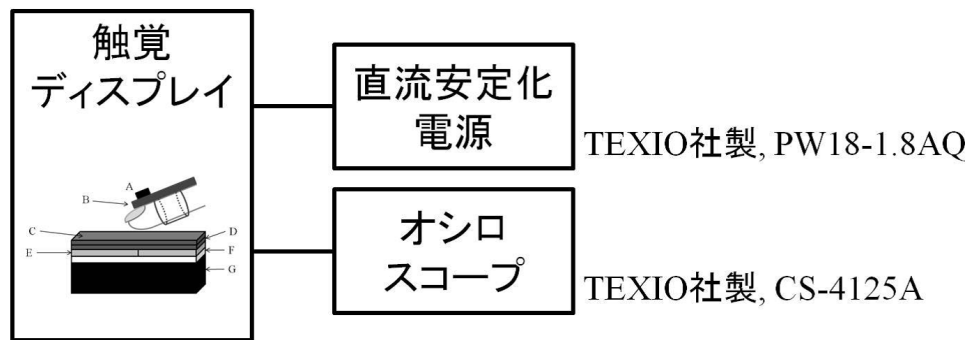


図 B.3: 簡易呈示装置の構成図

表 B.1: 簡易呈示装置が呈示する物理量とヒトが知覚する感覚

ヒトが知覚する感覚	使用する電子素子	呈示する物理量
触圧覚	圧力センサ	15 [N/m <sup>2</sup> ]
振動覚	振動モータ	200 [Hz]
温覚	ペルチェ素子	45.3 [°C]
冷覚	ペルチェ素子	-1.00 [°C]
痛覚	圧力センサ	45 [N/m <sup>2</sup> ]

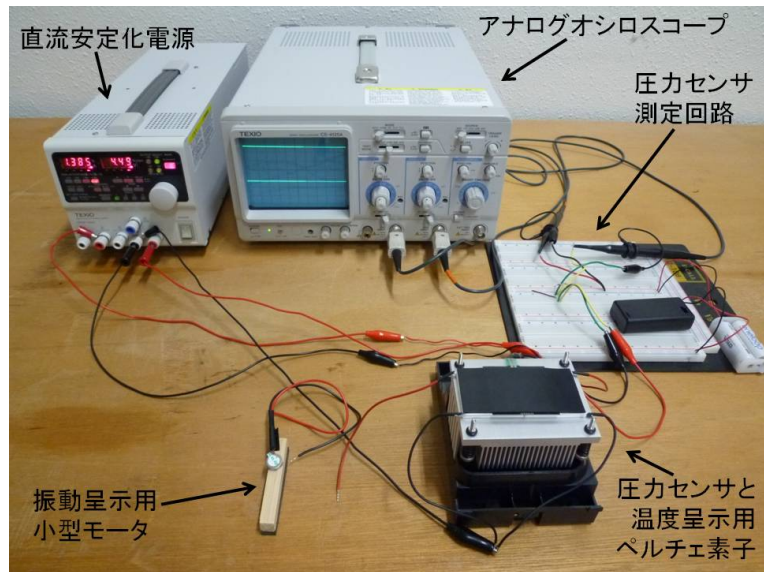


図 B.4: 簡易呈示装置の外観

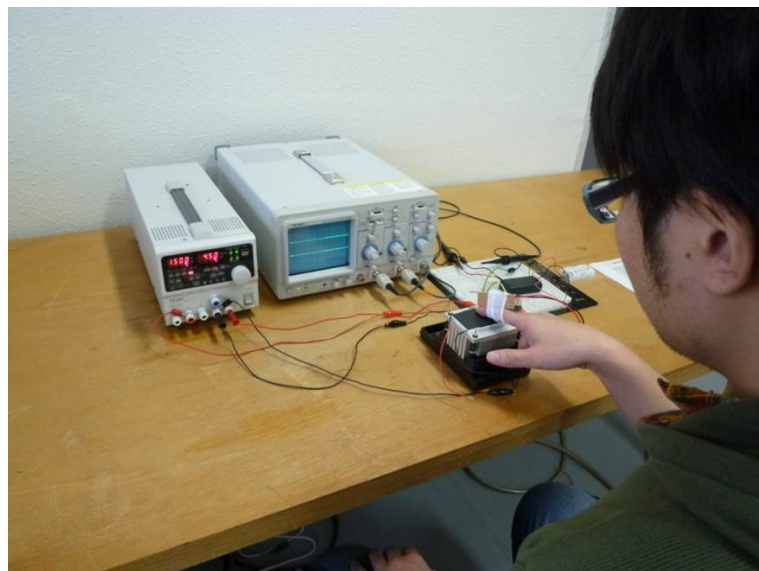


図 B.5: 簡易呈示装置の実装例

た。

評価実験の被験者は健康な大学生男女 30 名 ( $21.4 \pm 1.55$  歳) とした。実験回数は、簡易呈示装置が呈示する物理量の順応反応の影響を排除するため 1 回と定めた。実験室の実験環境は暑熱環境計 (京都電子工業株式会社製, WBGT-113) により、各被験者の実験実施後に計測し、平均室内温度  $20.1 \pm 0.66$  °C, 平均室内湿度  $57.4 \pm 3.67$  % で実施した。

評価実験は、簡易呈示装置により生成した感覚を被験者の右手人差し指腹部で知覚した感覚を評価する方法とした。はじめに、被験者の人差し指腹部の温度順応を均一にするため、室内で 10 分程度待機した後、実験を開始した。

感覚呈示は、図 B.1 に示す物理的に再現可能な要素感覚により構成される触覚生成方法に基づき、要素感覚 (四角錐の頂点) 5 種類と基本触覚を擬似的に合成して呈示した感覚 (四角錐の辺) 8 種類の併せて 13 種類の呈示を行った。実験実施前に予め被験者に触圧覚・振動覚・温覚・冷覚・痛覚の物理量をそれぞれ呈示し、簡易呈示装置が呈示する触覚を知覚させた。この方法で実施することで、要素感覚の合成呈示時に被験者が知覚した触覚について回答しやすいことを目的とした。感覚呈示順序は、全ての物理量の順応反応の影響を排除するため全被験者ごとにランダムにしたうえで実験を実施した。また、装置表面温度の変化により被験者の触覚に変化が生じる影響を排除するため、1 つの感覚呈示が終了した後、被験者人差し指腹部の感覚を正常に戻すために 1 分間ほどの休憩を設けた。

被験者へ感覚呈示後に「今の触覚は、どのような感覚に近いですか？」と質問し、口頭で人差し指腹部で知覚した感覚をすべて回答させた。なお本実験では侵害性はないが痛覚刺激を呈示するという点から、本学研究倫理委員会の承認を得た後、被験者から書面にて同意を得て実施した。

### B.3 評価実験結果

結果の解釈として、簡易呈示装置が生成した要素触覚以外の任意の触覚 (ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など) をヒトに惹起することができるかどうかを評価指標とした。

はじめに、簡易呈示装置の仕様を確認するため、5 つの要素感覚を呈示した時、図 B.6 に示すように 90 % を超える被験者が 5 つの要素感覚を正確に知覚していた (グラフの淡色部)。

次に、図 B.7 に示すように要素感覚の合成呈示時の評価実験結果を示す。特に、振

動覚と温覚・冷覚の合成呈示時に要素触覚以外の任意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）をヒトに惹起することができることが示された（グラフの淡色部）。振動覚と温覚の合成呈示時に80%の被験者は、要素触覚以外の任意の触覚（ちくちくとした痒みに似たような症状、痺れに似た症状、火傷に似た症状、くすぐったい症状など）を知覚した。振動覚と冷覚をの合成呈示時に約77%の被験者は、要素触覚以外の任意の触覚（痺れに似た症状、痒みに似た症状）を知覚した。そして振動覚と痛覚の合成呈示時に60%の被験者は、要素触覚以外の任意の触覚（張り付いているやちくちくした痛み）を知覚した。一方で、触圧覚と温覚・冷覚の合成呈示時、そして痛覚と温覚・冷覚の合成呈示時においては、温度知覚のみが特徴的であり、簡易呈示装置は呈示した要素触覚以外の任意の触覚を被験者へ惹起できないという結果となった。以上の結果を表 B.2 にまとめた。

表 B.2: 簡易呈示装置を用いた要素感覚の合成による評価実験結果

触圧覚	振動覚	温覚	冷覚	痛覚	はいを 答えた 割合 [%]	いいえを 答えた 割合 [%]	備考
0	0	0	0	1	96.7	3.33	単一覚を 正常に 知覚した割合
0	0	0	1	0	96.7	3.33	
0	0	1	0	0	96.7	3.33	
0	1	0	0	0	100	0.00	
1	0	0	0	0	100	0.00	
0	0	0	1	1	3.33	96.7	簡易呈示装置が 呈示した感覚 以外の触覚を 知覚した 割合
0	0	1	0	1	26.7	73.3	
0	1	0	0	1	60.0	40.0	
0	1	0	1	0	76.7	23.3	
0	1	1	0	0	80.0	20.0	
1	0	0	1	0	0.00	100	
1	0	1	0	0	6.67	93.3	
1	1	0	0	0	10.0	90.0	

## B.4 本章のまとめ

触覚を呈示する手法を提案するため、任意の触覚を要素触覚の合成により呈示できるという考え方を証明することが必要であり、その有効性を確認するための評価実験を行った。評価実験結果から、振動覚と温覚・冷覚の合成呈示時に要素触覚以外の任

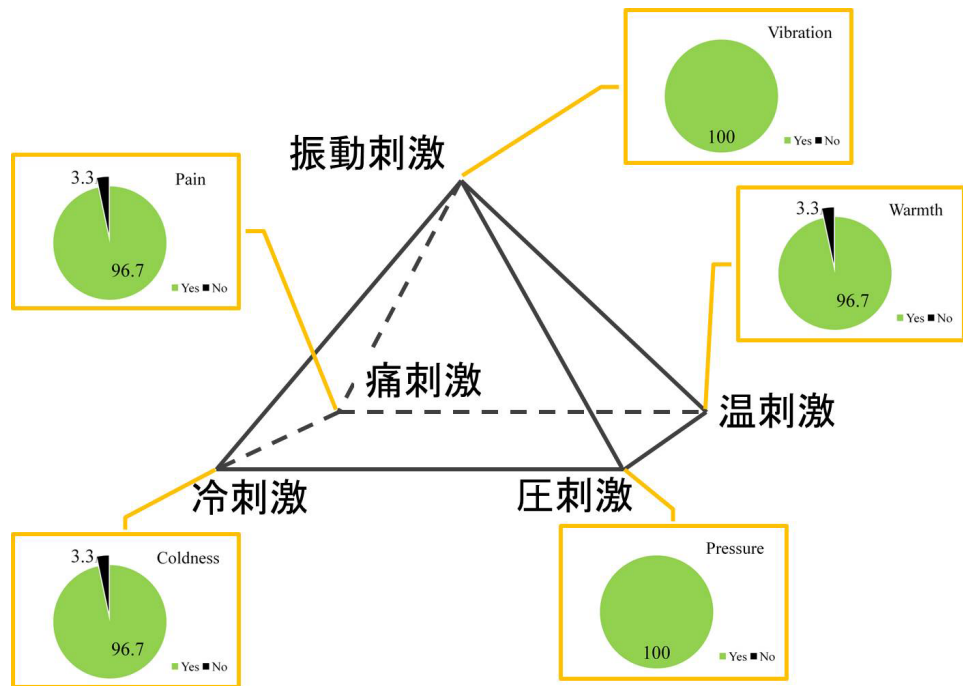


図 B.6: 簡易呈示装置の仕様確認実験

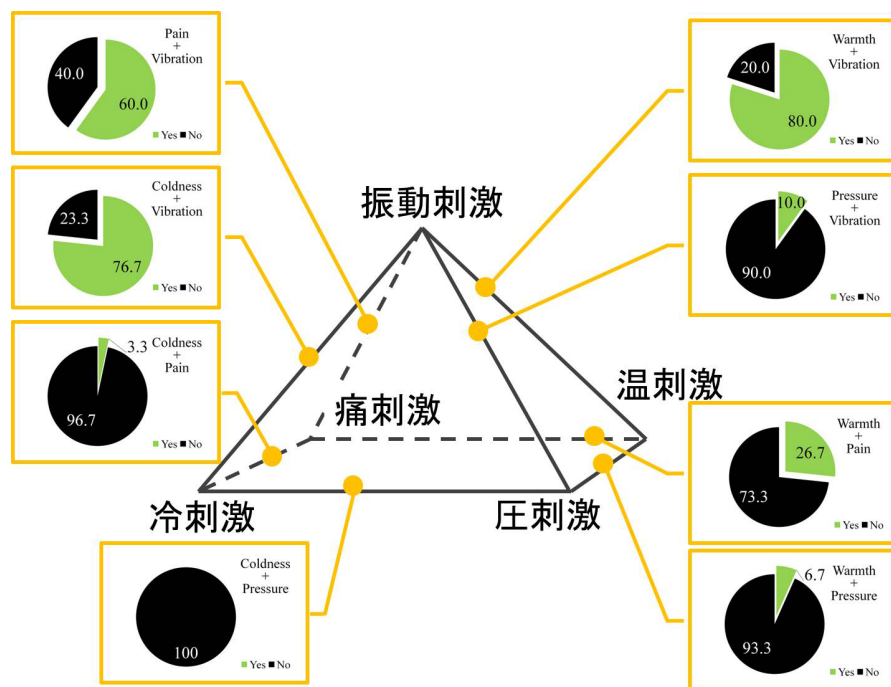


図 B.7: 簡易呈示装置を用いた評価実験結果

意の触覚（ヒトが普段知覚している物体の表面テクスチャや痛み感など）をヒトに惹起することができることが示された。一方で、触圧覚と温覚・冷覚の合成呈示時、そして痛覚と温覚・冷覚の合成呈示時においては、温度知覚のみが特徴的であり、簡易呈示装置は呈示した要素触覚以外の任意の触覚を被験者へ惹起できないという結果となった。

この原因として、簡易呈示装置は5つの要素感覚を擬似的に生成させるための刺激を1つの条件（例えば、温覚は40℃など）で検討していたこと、また提案した呈示方法は要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる方法を用いたことを踏まえ考察する。前者については、基本触覚を擬似的に生成させるための刺激を呈示するための物理量を条件付けたことにより生じた問題として考えられる。この問題を解消するためには、Ledermanら<sup>101)</sup>が行っている心理物理学的観点からの触知性評価を参考とし、呈示するための物理量を機械的に分別する必要があると考える。後者については、特定の要素感覚の合成の場合でのみ、要素触覚以外の任意の触覚を被験者へ惹起できないことがわかっているため、このような要素感覚を多面体の頂点に配置して任意の2点を合成しヒトへ触覚を生起させる触覚生成方法から、物理的に呈示することが可能な要素感覚を軸に有する、機械的に合成可能な多次元空間モデル（呈示装置の制御方法）を構築する必要があると示唆される。

# 付録C 触覚呈示装置の産業応用の一例

## C.1 本章の目的

本章では、触覚呈示装置の産業応用の一例として、自動車の運転中などに生じる手腕系振動（Hand-transmitted vibration）のメカニズムを解明する方法へ展開することを提案する。手腕系振動とは、図 C.1 に示すように床面・シート・車両用のステアリングホイールのような振動源と手の接触点から知覚またはヒトの身体がダイナミックな振動として知覚している。Burstorm らは<sup>126)</sup>、振動刺激と不快感との特徴を提言している。また、ステアリングホイールから受ける振動に関しては、Goglia ら<sup>127)</sup> はシングル車軸トラクターを運転している場合の手腕に伝わる振動について評価している。Shayaa ら<sup>128)</sup> はステアリングホイールの振動の周波数の増加とともに感度の低下を発見した。さらに、Cundiff<sup>129)</sup> は手腕部から受ける振動が身体に有害な影響を及ぼし、手腕部によって吸収される振動エネルギーに依存することの妥当性を示しており、Lidstrom<sup>130)</sup> は吸収される振動エネルギーの測定は不快感の評価の客観的手法に最適であると示唆している。

以上のように、自動車の運転中などに生じる手腕系振動は、ステアリングホイールの温度変化による知覚変化などの評価は行われておらず、床面やシートなどのダイナミックな振動の評価が多い。このことから、触覚呈示装置を用いた簡易評価実験として、振動覚と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合のヒトの振動覚知覚に変化が生じるかという点について評価する<sup>111)</sup>。

## C.2 評価実験方法

単極尺度評価による振動覚知覚評価実験方法を以下に示す。

評価実験の被験者は被験者 12 名（男性 10 名、女性 2 名、年齢  $22.7 \pm 1.3$  歳）である。表 C.1 に、図 2.14 のように測定した被験者 12 名の個体値平均値（年齢、指長、指幅、指高、爪長）を示す。計測は、触覚呈示装置に触れる中指とした。本実験は、痛覚刺激を生起させることから、本学倫理委員会から承認を受けた。



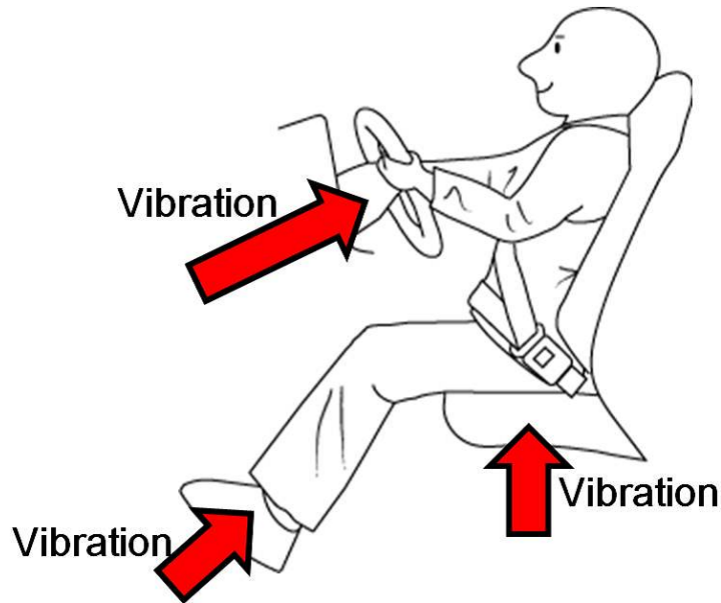


図 C.1: 自動車の運転中などに生じる手腕系振動 (Hand-transmitted vibration) のメカニズム

それぞれの刺激物理量は、予備実験から定められた振動覚 100 Hz から 260 Hz までの 5 段階、温覚 40 °C、冷覚 20 °C とする。評価方法は、触覚呈示装置により刺激を同時に呈示することで、振動刺激の知覚レベルがどのように変化しているかを単極尺度 7 段階を用いて評価する方法とする。例えば、振動刺激を与えた時に、被験者は震えている感覚を被験者の主観的な尺度で振動が全くない場合を 1、振動がある場合を 7 と回答する方法である。

実験は (1) 振動覚刺激のみ、(2) 振動覚刺激と温覚刺激、(3) 振動覚刺激と冷覚刺激の合計 15 種類を実施する。実験室の実験環境は暑熱環境計を用いて計測し、平均室内温度  $19.2 \pm 1.70$  °C、平均室内湿度  $41.2 \pm 6.00$  % であった。

結果の解釈については、振動覚の呈示周波数をパラメータとし、周波数の変化による振動覚の知覚レベルの変化を評価する。なお、被験者の単極尺度 7 段階の評価結果

表 C.1: 評価実験被験者 12 名の個体値 (年齢, 指長, 指幅, 指高, 爪長)

被験者 番号	年齢 [歳]	指の 長さ [mm]	指の 幅 [mm]	指の 高さ [mm]	爪の 長さ [mm]
平均	22.7	74.8	15.1	11.8	12.0
偏差	1.30	3.22	1.54	1.89	1.45

は、全被験者の評価結果を平均し、標準偏差を算出し、差の検定方法は  $t$  検定を行う。

### C.3 評価実験結果

単極尺度評価による振動覚知覚評価実験結果を以下に示す。

図 C.2 は、単極尺度を用いた評価実験のすべての結果を示している。この結果から、(2) 振動覚刺激と温覚刺激、(3) 振動覚刺激と冷覚刺激の場合のように、振動覚刺激を同時に刺激することでの温覚刺激の尺度平均値、冷覚刺激の尺度平均値の変化は見られなかったが、(1) 振動覚刺激のみの場合の振動覚刺激閾値は、温覚刺激・冷覚刺激を同時に刺激することで、尺度平均値が上昇することが示された。

図 C.3 は、振動覚刺激と冷覚刺激を同時に刺激した場合の尺度平均値を示している。グラフの横軸には、呈示した刺激の振動周波数を示し、縦軸には、被験者 12 名が回答した振動覚の単極尺度平均値を示している。この結果から、振動周波数が 180 Hz から 260 Hz の場合、被験者は振動覚刺激を知覚しやすくなっていることがわかる。一方、振動周波数が 100 Hz と 140 Hz の場合においては、有意な差はみられなかった。図 C.4 は、振動覚刺激のみで刺激した場合の尺度平均値を示している。グラフの横軸には、呈示した刺激の振動周波数を示し、縦軸には、被験者 12 名が回答した振動覚の単極尺度平均値を示している。この結果から、振動刺激のみを呈示した場合、すべての項目において有意な差はみられなかった。最後に、図 C.5 は、振動覚刺激と温覚刺激を同時に刺激した場合の尺度平均値を示している。グラフの横軸には、呈示した刺激の振動周波数を示し、縦軸には、被験者 12 名が回答した振動覚の単極尺度平均値を示している。振動刺激と温覚刺激を同時に呈示した場合、振動周波数が 180 Hz から 260 Hz の場合、被験者は振動周波数 100 Hz の場合と比較すると相対的に振動覚刺激を知覚しやすくなっていることが示された。一方、振動周波数が 100 Hz と 140 Hz の場合においては、有意な差はみられなかった。

### C.4 本章のまとめ

以上のように、触覚呈示装置の振動周波数をパラメータとした場合の振動覚刺激と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合のヒトの振動覚知覚に変化が生じていることが示された。本評価実験は、中指腹部のみでの振動覚刺激と温覚・冷覚刺激を同時に呈示した場合であるため、運転中の手腕系振動のメカニズム解明のための基礎的なデータが得られたと示唆される。

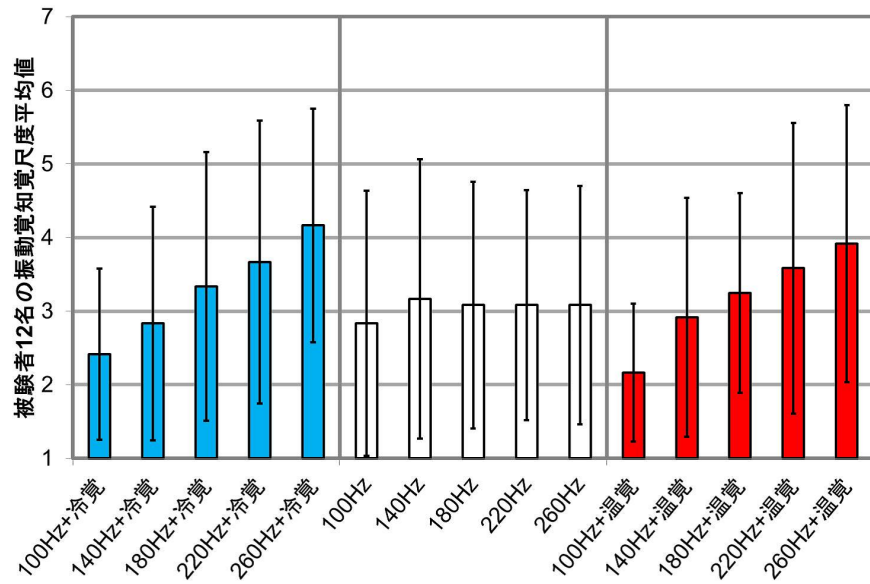


図 C.2: 単極尺度を用いた評価実験結果

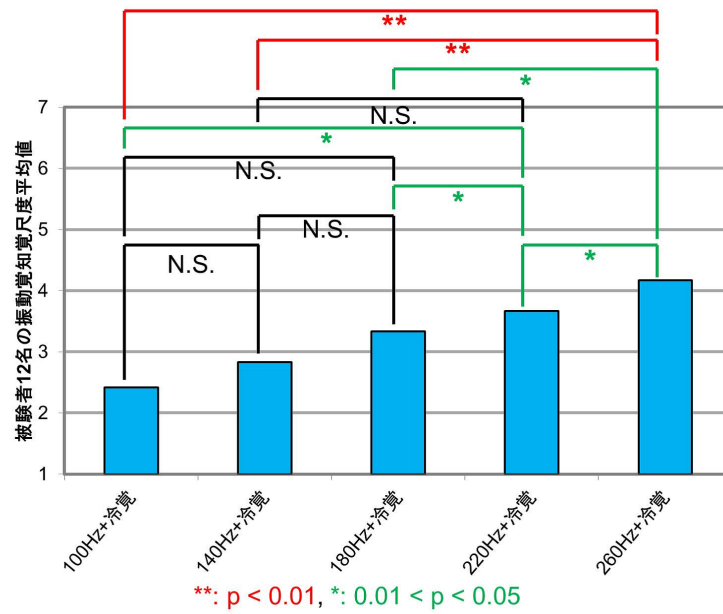


図 C.3: 振動覚刺激と冷覚刺激を同時に呈示した場合の評価実験結果

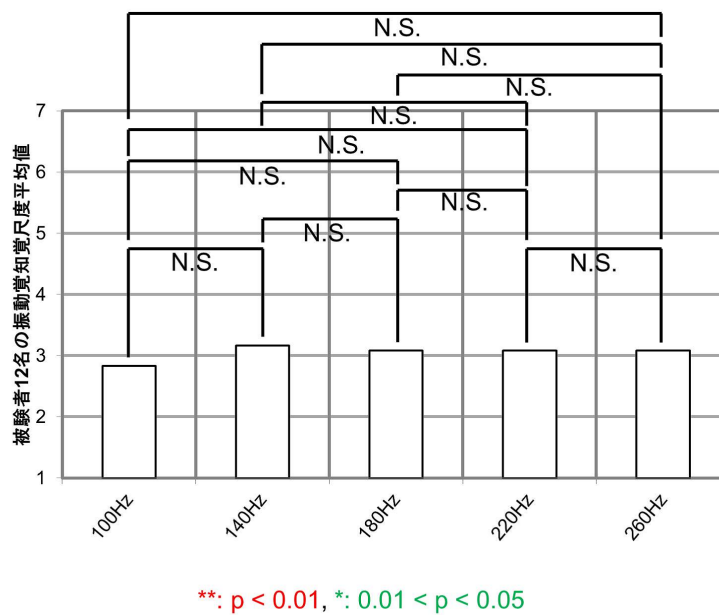


図 C.4: 振動覚刺激のみを呈示した場合の評価実験結果

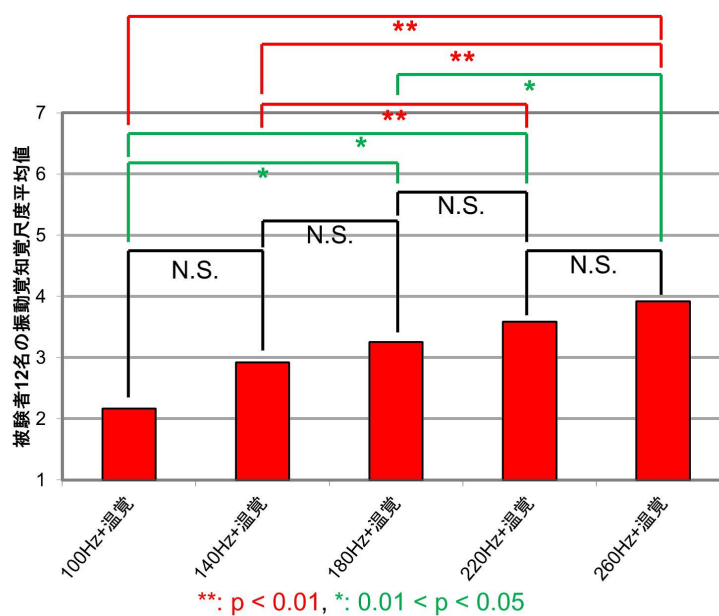


図 C.5: 振動覚刺激と温覚刺激を同時に呈示した場合の評価実験結果

# 学会発表等

- 1) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: タッチブレンドの再検討, 日本機械学会第 21 回バイオフロンティア講演会, 金沢, 2010.11.12-13.
- 2) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: タッチブレンドを用いた触覚再現, 日本機械学会第 23 回バイオエンジニアリング講演会, 熊本, 2011.1.8-9.
- 3) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 触覚を表現するためのタッチブレンドの再検討, 日本機械学会北陸信越支部大会, 2011.3.4-5.
- 4) Manabu CHIKAI, Naomi SHIRAI and Hitoshi MIYAKE: Haptic Presentation Device for Complex Stimulus Model, 第 50 回日本生体医工学会記念大会, 東京, 2011.4.29-5.1.
- 5) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 触覚知覚機構の分析及び感覚提示装置の評価実験, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 東京, 2011.9.12-14.
- 6) 近井学, 三宅仁: タッチブレンドの再検討, 生体医工学シンポジウム 2011, 長野, 2011.9.16-17.
- 7) Manabu CHIKAI and Hitoshi MIYAKE: Development of a Novel Haptic Perception Device Using "Touch Blend," Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2011 4th International Conference, Shanghai, 2011.10.15-17.
- 8) 近井学, 三宅仁: 医用ロボット用人工表在覚モデルの開発, 第 49 回日本人工臓器学会大会, 東京, 2011.11.25-27.
- 9) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: Touch Blend を応用した感覚提示装置の開発, 第 24 回日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 豊中, 2012.1.7-8.
- 10) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 新しい感覚提示装置を用いた Touch Blend の再検討, 第 51 回日本生体医工学会大会, 福岡, 2012.5.10-12.
- 11) 近井学, 三宅仁: 温覚・冷覚と他感覚同時刺激の影響, 日本サーモロジー学会第 29 回大会, 長岡, 2012.6.22-23.

- 12) 近井学, 三宅仁: Touch Blend を応用した触覚ディスプレイの開発, 生体医工学シンポジウム 2012, 豊中, 2012.9.7-8.
- 13) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: Haptic Map に基づいた感覚提示装置の製作, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012.9.10-12.
- 14) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 触覚記憶は存在するか?, 日本機械学会第 23 回バイオフロンティア講演会, 弘前, 2012.10.5-6.
- 15) 近井学, 三宅仁: 表在覚を工学的に再現するためには, 第 50 回日本人工臓器学会大会, 福岡, 2012.11.22-24.
- 16) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 複合提示型触覚ディスプレイの開発, 日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング講演会, つくば, 2013.1.9-11.
- 17) 近井学, 白井奈穂美, 三宅仁: 触覚提示のための視覚情報の重要性, 日本機械学会北陸信越支部第 50 期講演会, 福井, 2013.3.9.
- 18) 近井学, 三宅仁: 発達障害児の触覚機能診断装置の開発, 第 88 回日本医療機器学会大会, 横浜, 2013.6.6-8. ※優秀賞受賞
- 19) Manabu CHIKAI, Akira SHIONOYA, Ashu MARASINGHE and Hitoshi MIYAKE: A Cognitive Psychological Approach to Identify The Significant of The Role of Visual Sense in Haptic Sense, 2013 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering, Akihabara, 2013.7.5-7.
- 20) 近井学, 三宅仁: リハビリにおける触覚感覚の早期回復を目指す新装置の提案, 第 11 回生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会, 山梨, 2013.9.2-4.
- 21) 近井学, 白井奈穂美, 塩野谷明, Ashu MARASINGHE, 三宅仁: 触覚官能評価のための基準試料の役割, 第 15 回日本感性工学会大会, 吉祥寺, 2013.9.5-7.
- 22) 近井学, 三宅仁: 表在覚提示装置の開発と評価, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013.9.9-11.
- 23) 近井学, 三宅仁: 完全な人工皮膚のための表在覚提示機構の開発, 第 51 回日本人工臓器学会大会, 横浜, 2013.9.27-29.

- 24) Manabu CHIKAI, Mohammad A. FARD and Hitoshi MIYAKE: Characterization of the Role of Contact Surface Temperature on the Perception of Hand-Transmitted Vibrations, 15th International Conference on Biomedical Engineering, Singapore, 2013.12.4-6.

## 研究会・学会発表等（その他）

- 1) 近井学, 井野秀一, 高橋紀代, 大西忠輔, 佐藤満, 布川清彦, 土井幸輝, 吉村眞一: 足底皮膚にずれ刺激を呈示する装置の試作と閾値測定, 電子情報通信学会福祉情報工学会, 札幌, 2013.8.29-30.
- 2) 近井学, 井野秀一, 高橋紀代, 大西忠輔, 吉村眞一, 佐藤満, 和田親宗, 土井幸輝, 布川清彦: 足底皮膚のずれ刺激に対する感覚閾値に関する部位依存性, 第14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講演会, 神戸, 2013.12.18-20.
- 3) 近井学, 井野秀一, 大西忠輔, 山下和彦, 土井幸輝, 布川清彦, 三宅仁, 本田哲三: 足圧分布パターンを考慮した足底感覚の評価, 日本機械学会第26回バイオエンジニアリング講演会, 仙台, 2013.1.10-11.



# 発表論文

[ 国内誌 査読有り 筆頭 ]

- 1) 近井学, 三宅仁, 温覚・冷覚と他触覚感覚同時刺激の影響, Biomedical Thermology, Vol.32, No.2, (2013), pp.65-71.
- 2) 近井学, 三宅仁, Touch Blend を応用した触覚ディスプレイの開発, 生体医工学, Vol.51, No.2 (2013), pp.112-118.
- 3) 近井学, 三宅仁, 発達障害児の触覚機能診断装置の開発, 医科器械学, Vol.84, No.1 (2014), pp.18-22.
- 4) 近井学, 白井奈穂美, 塩野谷明, Ashu MARASINGHE, 三宅仁, 触覚官能評価のための基準試料の役割, 感性工学, Vol.13, No.1 (2014), pp.1-10.

[ 口頭発表 国際学会 筆頭・登壇者 ]

- 1) Manabu CHIKAI and Hitoshi MIYAKE: Development of a Novel Haptic Perception Device Using “Touch Blend,” Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2011 4th International Conference, Shanghai, 2011.10.15-17.
- 2) Manabu CHIKAI, Akira SHIONOYA, Ashu MARASINGHE and Hitoshi MIYAKE: A Cognitive Psychological Approach to Identify The Significant of The Role of Visual Sense in Haptic Sense, 2013 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering, Akihabara, 2013.7.5-7.
- 3) Manabu CHIKAI, Mohammad A. FARD and Hitoshi MIYAKE: Characterization of the Role of Contact Surface Temperature on the Perception of Hand-Transmitted Vibrations, 15th International Conference on Biomedical Engineering, Singapore, 2013.12.4-6.