

**指先力触覚の
身体異部位への転移に関する研究**

森山 多覇

電気通信大学大学院情報理工学研究科

博士学位申請論文（工学）

2022年3月

指先力触覚の 身体異部位への転移に関する研究

博士論文審査委員会

主査	梶本 裕之	教授
委員	広田 光一	教授
	橋本 直己	教授
	野嶋 琢也	准教授
	小泉 直也	准教授

著作権所有者

森山多覇

2022 年

Haptic Sensation Transfer of Fingertip to the Other Parts of the Body

Taha Moriyama

Abstract

In recent years, virtual reality (VR) has become widely used due to the availability of low-cost head-mounted displays (HMDs). In particular, many studies have been conducted to present haptic information to the body in the VR environment in order to provide a realistic experience in the VR space. The main target of such haptic presentation research is the finger. This is because we manipulate objects with our fingers and our fingers are embedded with many receptors that are sensitive to texture, shape and weight.

Haptic presentation devices for objects in VR space are often designed to present the haptic sensations generated by the fingertips to the actual fingertips. However, these devices face certain challenges, such as physical interference between the devices, practically when multi-degree-of-freedom (DOF) force needs to be presented to multiple fingers. To address this issue, we propose a haptic presentation method that solves these problems by transmits haptic sensations generated by the fingertips in the VR to other parts of the body.

This paper separates the finger that actually interacts with the VR object from the part of the body where the haptic sensation is presented. We focused on the two senses of "force" and "distributed haptic sensation" that occur at the fingertips, and considered a method to present each sense to different parts of the body. In this paper, we describe the research background and purpose of each haptic sensation presentation method, implement haptic interaction after building a prototype device, and verify the effectiveness of each method through evaluation according to the purpose. Then, we summarize the designed and developed devices and haptic interactions, and summarize the impact of the different methods on users.

In Chapter 1, we describe the importance of haptic interaction in VR technology, the background of haptic interaction in VR technology, and the challenges of haptic

presentation devices. Next, we describe a haptic transfer method as one of the approaches to solve the problems.

In Chapter 2, we share the physiological findings that are important for constructing haptic presentation devices. In particular, we explain the haptic perception mechanism of the fingertip and back, which is the target of this research, and the receptors related to skin sensation and the receptors related to intrinsic sensation such as force.

In Chapter 3, we first try to present the different sites of "force sensation". We describe a prototype of a wearable force feedback device with a five-bar linkage mechanism that presents the force of the fingertips on the forearm. Next, the device was worn by a user, and the spatial arrangement of the forearm corresponding to the thumb, index finger and middle finger was tested in VR. We also investigated the realism of the force feedback interaction by actually working with the VR objects.

In Chapter 4, we describe how to improve the quality of the prototype device developed in Chapter 3. The magnitude and direction of the force presented to the skin by the device were measured by constructing a measurement system and compared with values calculated from inverse kinematics. Next, we fabricated a prototype force-feedback device for two fingers and evaluated the efficiency of the device when working in a VR.

In Chapter 5, we describe the prototype and development of a vest-type haptic device that transfers the "distributed haptic sensation" of the fingertips to the back. The pressure distribution of a fingertip was presented to the back using more than 88 vibrators installed in a vest. We evaluated the vibration frequency and intensity that the vest-type haptic display can present, and presented the vibration sensation on the back according to the interaction of the fingertips in the VR. Next, we measured the pressure applied to the fingertip using a glove that can measure the pressure distribution at the fingertip, and matched it to the vibrators of the vest-type haptic device. We investigated whether letters and symbols could be recognized by the senses on the back by presenting haptic sensations by magnifying and expanding the trivial pressure applied to the fingertips.

In Chapter 6, we summarize our research on haptic sensation transfer. By reevaluating each research and organizing the issues, we summarize the requirements of the haptic feedback method in VR and its realism to users. Then, we summarize the conclusions of this paper and the future prospects of haptic interaction using the haptic sensation transfer method.

概要

近年バーチャルリアリティ（VR）は低価格な頭部搭載型ディスプレイ（HMD）が入手可能になった事から広く普及しつつある。特に、VR 空間中で臨場感のある体験を提供するために、VR 環境中での身体への力触覚情報の提示を試みる研究が数多く進められている。こうした力触覚提示研究の主なターゲットは指である。これは、我々が主に指を用いて作業を行っており、また、我々の指は他の体の部位と比較するとその受容器の密度の高さから、物体に触れた時の質感や形状、重さといった重要な情報に非常に敏感であるためである。

VR 空間内にある物体に対する力触覚提示デバイスは、多くの場合、VR 空間中の指先に生じる力触覚を実際の指先に提示する事を前提として作られている。しかしながら、これらのデバイスは特に多自由度の力を指に提示しようとする脱着の手間や、装置同士の干渉が指の動きを妨げてしまう課題がある。

そこで、本論文では実際に物体と相互作用する指と、力触覚を提示する部分を分離する力触覚提示手法を提案する。指先で生じる力触覚を身体の異部位に提示する事で、これらの課題を解決する。

本論文では、指先に生じる「分布的触覚を含まない力触覚」と「分布的触覚」の 2 点に着目し、それぞれの感覚を身体の異部位に提示可能なウェアラブルデバイスを開発した。各力触覚提示手法の個別の研究背景および目的について述べ、デバイスの試作を行った後に力触覚インタラクションを実装し、目的に則した評価によって個々の手法の有効性を検証する。そして、設計・開発したデバイスおよび力触覚インタラクションを総括し、異部位提示手法がユーザに与える影響についてまとめる。本論文は全 6 章から構成され、内容の要旨は以下のとおりである。

第 1 章では、VR 技術における力触覚インタラクションの重要性を述べる。また、VR 技術で力触覚インタラクションが着目されてきた背景と、力触覚デバイスが持つ課題について述べる。次に、課題を解決するアプローチの 1 つとして、力触覚転移手法について述べる。本論文の目的を設定し、指先の力触覚を身体の異部位に転移するデバイスの開発と力触覚インタラクションの指標を設定する。

第 2 章では、力触覚デバイスを構築する上で重要な力触覚の心理・生理学的知見を共有する。特に、本研究でターゲットにしている指先の力触覚認知メカニズムと、皮膚感覚に関する受容器と力覚等の固有感覚に関する受容器の説明をする。用語の定義を行った上で、本研究の立ち位置を示す。

第 3 章では、「分布的触覚を含まない力触覚」の異部位提示を試みる。前腕に指先の力触覚を提示する 5 節のリンク機構を採用したウェアラブル力触覚デバイスの原理試作について述べる。次に、装置をユーザに装着させ、親指、人差し指および中指に対応する前腕部の空間的配置について、VR 空間内で実験を行った。また、実際に VR 物体を用いて作業を行い、力触覚インタラクションのリアリズムについて調査した。

第 4 章では、第 3 章で試作したデバイスの高品質化について述べる。デバイスが皮膚に提示する力の大きさや向きについて、計測系を組み立て計測し、逆運動学から算出される値と比較した。次に、2 本の指に対応した力触覚デバイスを試作し、VR 空間内で作業を行う際の作業効率の評価を行った。

第 5 章では、指先の「分布的触覚」を背部に提示するベスト型の触覚デバイスの試作および開発について述べる。本章からは「分布的触覚」の異部位提示を試みる。本研究では指先の圧力分布を、ベスト内に設置した 100 個以上の振動子を用いて背部に提示した。ベスト型触覚ディスプレイが提示できる振動周波数や強度についての評価を行い、VR 空間内の指先のインタラクションに合わせて背部に振動感覚を提示した。次に、指先の圧力分布を計測可能なグローブを用いて、指先に加わる圧力を計測し、ベスト型の触覚デバイスの振動子と対応させた。指先に加わる些細な圧力を背部に拡大拡張して触覚を提示する事によって、文字や記号が背部の感覚で認知可能か調査した。

第 6 章では力触覚転移に関する研究を総括する。各々の研究を再評価し、課題を整理する事で、VR 空間内での力触覚転移手法が及ぼすユーザへの実感性とその要件を整理する。そして、本論文における結論と、今後の力触覚転移手法を用いた力触覚インタラクションのあり方・展望についてまとめた。

目次

第1章	1	
1.1	バーチャルリアリティ	1
1.2	VR 物体との力触覚インタラクション	2
1.2.1	指先への力触覚提示デバイスが持つ課題	2
1.2.2	異部位転移技術による解決策	3
1.3	本論文の目的および構成	3
1.3.1	分布的触覚を含まない力触覚の転移	4
1.3.2	分布的触覚の転移	4
1.3.3	本論文の構成	4
第2章	6	
2.1	本論文が対象としている感覚	6
2.2	力感覚に関する受容器	7
2.3	皮膚感覚の触覚に関する受容器	8
2.3.1	触覚受容器の機能	9
2.3.2	皮膚の2点弁別閾	11
第3章	12	
3.1	関連研究	12
3.1.1	グローブ形状の力触覚提示デバイス	13
3.1.2	指先に装着可能な力触覚提示デバイス	15
3.1.3	その他の力触覚提示デバイス	17
3.1.4	感覚義手における感覚代行デバイス	18
3.1.5	異部位力触覚転移デバイス	19
3.2	腕への力触覚転移デバイスのコンセプト	20
3.2.1	5節リンク機構	21
3.3	第1試作：1本指に対応するデバイス	24
3.3.1	実験1：人差し指に対応する前腕への力触覚提示部位の検討	28
3.3.1.1	実験の条件および実験環境	28
3.3.1.2	実験結果	30
3.3.1.3	考察	33
3.3.2	実験2：異なる方向からVR物体に触れた際の違和感の評価	33
3.3.2.1	実験の条件および環境	34
3.3.2.2	実験結果	36
3.3.2.3	考察	38

3.4	第2試作：3本指に対応するデバイス	39
3.4.1	デバイスの構成	40
3.5	力触覚弁別実験	41
3.5.1	実験の条件および実験	41
3.5.2	実験の結果および考察	44
3.6	3本指での把持におけるデバイスの装着位置の検討	45
3.6.1	実験の条件および環境	46
3.6.2	実験結果および考察	47
3.7	複数指でVR物体を把持した際の違和感の調査	48
3.7.1	2本指を用いた違和感の調査	49
3.7.2	実験結果および考察	51
3.7.3	3本指を用いた違和感の調査	53
3.7.4	実験の結果および考察	54
3.7.5	複数指で把持した際の違和感の評価とまとめ	55
3.8	3章のまとめ	56
第4章		58
4.1	DCモータを用いた力触覚デバイス	58
4.2	逆運動学を用いた力の算出	59
4.3	提示される力の測定	61
4.4	左右の前腕および足首における検討	63
4.4.1	実験の条件および環境	64
4.4.2	実験結果および考察	65
4.5	VR空間内での作業効率の評価	67
4.5.1	実験の条件および環境	67
4.5.2	実験の結果および考察	69
4.6	異なるレンダリング手法による違和感の評価：垂直方向のみの力提示	72
4.6.1	実験の条件および環境	72
4.6.2	実験の結果および考察	73
4.7	異なるレンダリング手法による違和感の評価：把持動作における垂直および水平方向の力提示	74
4.7.1	実験の条件および環境	74
4.7.2	実験の結果および考察	75
4.8	異なるレンダリング手法による違和感の評価：なぞり動作における垂直および水平方向の力提示	76
4.8.1	実験の条件および環境	76
4.8.2	実験の結果および考察	77

4.9	試作したアプリケーションおよびデモ展示の内容	78
4.10	4章のまとめ	81
第5章	83
5.1	研究背景	84
5.2	関連研究	85
5.3	HARVEST：ベスト型のマルチチャンネル振動触覚提示デバイス	86
5.3.1	ベスト型触覚提示デバイスのハードウェア評価	89
5.3.2	触覚センシンググローブ	90
5.4	実験1：背部における直線角度の認知評価	92
5.4.1	実験の条件および環境	94
5.4.2	実験結果	95
5.5	実験2：背部における図形の認知評価	96
5.5.1	振動周波数を 350Hz に設定した条件	96
5.5.2	実験の条件および環境	97
5.5.3	実験結果	99
5.5.4	考察	100
5.5.5	振動周波数を 50Hz に設定した条件	100
5.5.6	実験の結果および考察	100
5.6	試作アプリケーションおよびデモ	102
5.7	第5章のまとめ	104
第6章	105
6.1	分布的触覚を含まない力触覚に着目した前腕への力触覚転移	105
6.1.1	本研究の成果	105
6.1.2	前腕への力触覚転移デバイスの課題	106
6.2	分布的触覚に着目した背部への力触覚転移	106
6.2.1	本研究の成果	106
6.2.2	背部への力触覚転移デバイスの課題	106
6.3	今後の展望	107
6.3.1	分布的触覚と分布的触覚を含まない力触覚転移デバイスの併用	107
6.3.2	他の感覚での感覚代行の検証	108
6.3.3	異部位への力触覚転移	108

謝辞

関連発表

参考文献

図表目次

図 2-1：皮膚感覚および自己受容感覚の分類.....	6
図 2-2：筋骨格系受容器の構造.....	7
図 2-3：ヒトの皮膚無毛部の断面図（[10]を改変）， a)マイスナー小体， b)メルケル盤， c)パチニ小体， d)ルフィニ終末.....	8
図 2-4：身体の 2 点弁別閾（[63]を改変）	11
図 3-1：グローブ形状の力触覚提示デバイス[5].....	13
図 3-2： a)振動子を手掌部に配置したグローブ形状の振動触覚提示デバイス[12]， b) 振動子を指や手掌部全体に配置した振動触覚提示デバイス[13]	14
図 3-3： a) 2 本の指に力覚の提示を行うデバイス[20]， b) 5 本の指に力覚（圧覚）を 提示するデバイス[11]	14
図 3-4：指先に装着するデバイスの例[23].....	15
図 3-5： a)RC サーボモータを用いて圧覚を提示する指先デバイス[33]， DC モータを 用いて圧覚を提示する指先デバイス[6].....	16
図 3-6： a) 5 節リンク機構を DC モータで駆動させ圧覚と横ずれ感を提示するデバイス [39]， 指先に皮膚変形を生じさせるデバイス[35].....	17
図 3-7： 5 本の指に対応して前腕に圧覚を提示する感覚義手の研究[41]	19
図 3-8： a)腕への皮膚変形を利用した力触覚デバイス[46]， b)足裏に指先の力触覚提 示するデバイス[42].....	20
図 3-9： 1 節を固定端としたときのリンク機構の軌跡	21
図 3-10：自由度が 0 の 3 節リンク機構	22
図 3-11： 5 節リンク機構の自由度.....	23
図 3-12：両端の 2 節を異なる方向に駆動する事で， 中心の節が垂直に動く	23
図 3-13：両端の 2 節を同じ方向に駆動する事で， 中心の節が左右に動く	24
図 3-14： 1 本指に対応するデバイス	25
図 3-15： M 字型をした 5 節のリンク機構を採用	25
図 3-16： 5 節リンク機構の中央節に粘着ゲルシールを設置	26
図 3-17：システム構成	26
図 3-18：圧覚の提示（2 節のモータを反対方向に駆動）	27
図 3-19：せん断力提示（2 節のモータを同じ方向に駆動）	27
図 3-20：指先の触覚を提示する部位	28
図 3-21：実験の様子.....	30
図 3-22：前腕に圧覚を提示した時の違和感	31
図 3-23：前腕に映像と同じ方向に横ずれ感を提示した時の違和感.....	32

図 3-24：前腕に映像と異なる方向に横ずれ感を提示した時の違和感	32
図 3-25：前腕の刺激部位.....	34
図 3-26：VR 物体に対する触れ方 a)左側から触れる， b)下部から触れる， c)上部から触れる， d)右側から触れる	35
図 3-27：前腕に対して圧覚を提示する際に指を用いて a)物体を上部から触れる場合， b)物体を下部から触れる場合， c) 物体を右側から触れる場合， d)物体を左側から触れる場合.....	37
図 3-28：前腕に対して横ずれ感を提示する際に指を用いて a)物体を上部から触れた際， b)物体を下部から触れた際， c)物体を右側から触れた際， c)物体を左側から触れた場合	38
図 3-29：親指・人差し指・中指に対応する 5 節リンク機構を搭載した第 2 試作デバイス	40
図 3-30：圧覚の弁別実験で使用した部位	42
図 3-31：圧覚および横ずれ感の弁別実験で使用した部位	42
図 3-32：弁別実験を行う被験者の様子.....	44
図 3-33：圧覚を全ての指の組み合わせに提示した結果	44
図 3-34：a) 力触覚提示部位が前腕の背側部に 2 ヶ所， 腹側部に 1 か所（中指の力触覚提示部位が前腕の背後方部）， b) 力触覚提示部位が背側部に 1 か所， 腹側部に 2 ヶ所（中指の力触覚提示部位が前腕の腹後方部）	46
図 3-35：3 本指に対応する試作デバイスを用いて VR 物体を把持する被験者の様子	47
図 3-36：圧覚を提示した時の違和感	48
図 3-37：力触覚刺激の条件， 左から力触覚提示無， VR 物体と把持時にのみ振動を提示， VR 物体を把持時に常に振動を提示， VR 物体を把持時に圧覚を提示， VR 物体を把持時に圧覚および横ずれを提示	50
図 3-38：HMD に表示されている映像	51
図 3-39：2 本指を力触覚転移させた時の違和感の調査	52
図 3-40：2 本指を力触覚転移させた時の違和感の調査	54
図 4-1：DC モータを用いた力触覚デバイス	59
図 4-2：リンクに作用している力.....	60
図 4-3：力の測定システム	62
図 4-4：垂直方向の出力測定結果.....	62
図 4-5：デバイスの装着図.....	64
図 4-6：実験の様子.....	65
図 4-7：異なる部位に力触覚デバイスを装着した時の違和感の結果	66
図 4-8：試作機から出力される力の算出方法.....	69
図 4-9：タスク遂行時間.....	70

図 4-10：各条件での納得感の評価.....	71
図 4-11：各条件でのリアリズムの評価.....	74
図 4-12：各条件間のリアリズムの変化.....	76
図 4-13：各条件間のリアリズムの変化.....	78
図 4-14：温冷感提示のためにペルチェ素子を用いたデバイスを試作.....	79
図 4-15：開発したアプリケーション.....	79
図 4-16：デモ展示の様子.....	80
図 5-1：背部へのマッピングのイメージ.....	84
図 5-2：a) 空気圧迫モジュールを内蔵したベストが圧覚デバイス[65], b) 振動子を大量に椅子に埋め込んだ振動提示デバイス[66].....	85
図 5-3：a) センシンググローブ, b)ベスト型触覚提示デバイス, c)ベスト型触覚提示デバイス内の振動子の配置, d)“—”や“×”を背部に提示した時のイメージ図.....	86
図 5-4：ベスト型触覚提示デバイスと回路の配置.....	87
図 5-5：ベスト型触覚提示デバイスの中身と振動子の配置.....	87
図 5-6：ベスト型触覚提示デバイスのシステム構成.....	88
図 5-7：ボイスコイル型振動子の加速度測定.....	89
図 5-8：センシンググローブ.....	91
図 5-9：センシンググローブの出力値.....	92
図 5-10：圧力センサと触覚ベストのボイスコイル型振動子の対応関係（圧力センサとボイスコイル型振動子は空間的に 1 対 1 で対応している。また、圧力センサは 10×10 の行列に対し、触覚ベストが 10×8 であるため、圧力センサの両端 1 行のデータは無視している）.....	93
図 5-11：各直線における圧力センサの出力.....	94
図 5-12：被験者の様子.....	95
図 5-13：それぞれの条件における直線の傾きの正答率.....	96
図 5-14：各図形における圧力センサの出力.....	97
図 5-15：100msec 間隔で 1 列ずつ駆動する方法図(例として, a)P の文字を b)左から 1 列ずつ 100msec 間隔で駆動する).....	98
図 5-16：それぞれの条件における図形の正答率.....	99
図 5-17：それぞれの条件における図形の正答率.....	101
図 5-18：閉眼状態で箸を用いて豆腐を持ち上げる被験者の様子.....	103

第1章

序論

1.1 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (VR) と聞いて、何を連想するであろうか。多くの人はゴーグルの様な頭部搭載型ディスプレイ (HMD) を装着したユーザの姿であろう。VR は、しばしば日本語で「仮想現実」と訳され広まっているが、これは誤訳であり「Virtual Reality」本来の意味とは大きく異なる。「仮想」とは、この世に存在しない空虚の意味だが、「Virtual」は正しく訳すと「実質・本質」の意味を持つ[95]。つまり「Virtual Reality」を正しく訳すと「実質現実」となり、コンピュータの力を使って実質的な体験を可能にする技術の事を指す。

近年の VR は、ユーザの視覚を HMD で覆う事で現実とは異なる世界を視覚的に再現する技術が急速に普及している。これは 2010 年代から低価格 HMD が続々と発売されたためである。HMD は我々が日々体感している五感のうち視覚面を光学的に可能な限り再現し、ユーザの頭部の動きに対応した画面推移を行う事で、視覚の情報を限りなく現実に近づけ没入感を向上させている。HTC Vive[1]や Oculus Rift[2]、PlayStation に接続して利用する PlayStation VR[3]等、2021 年現在でも VR 業界を牽引する存在である HMD はディスプレイの解像度や視野角が年々飛躍的に向上しており、視覚を拡張して現実に非常に近い臨場感のある状況を構築している。

人間の五感の内、視覚以外に着目した VR も数多く研究されており、例えばユーザへの力触覚提示を目的とした VR も存在する。ユーザへの力触覚提示では、現実世界と同等の体験を提供するために、人間の力触覚の感覚特性や運動特性を考慮した力触覚レンダリングやモデル化を行う必要がある。そのため力触覚情報のセンシングや解析、再現まで様々な力触覚レンダリング手法と力触覚デバイスが提案されてきた[4]。特に、人は指を用いて作業を行うため、指先に着目したタイプの力触覚デバイスが数多く存在する。他にも全身に振動触覚を提示するスーツや、力覚提示だけに特化した力覚提示デバイス等、様々な形状のデバイスが提案されている[5][6]。力触覚提示を目的とした VR の他にも、嗅覚や聴覚、味覚に訴求する VR も数多く研究・開発がされており、VR を構成する個々の基盤技術は着実に日常生活に浸透してきている。

コンピュータで拡張した環境を、ユーザの五感を刺激する事で実質的な体験を可能とする VR では、体験の評価に臨場感や没入感といった尺度が使われる。この臨場感・没入感を向上させる事を目的として、人間の五感を全て刺激するマルチモーダル（あるいはクロスモーダル）という手法が存在する。人間は外界とインタラクションを行うとき、全ての五感を用いて空間の認知・識別を行う。そのため、五感全てに訴求する VR が究極の VR と言える。

1.2 VR 物体との力触覚インタラクション

力触覚の認知メカニズムについては第 2 章で述べるが、力触覚的認知は他の感覚と比べインタラクティブ性が高い。音楽や映像鑑賞といった受動的な体験とは異なり、VR 物体に触れる・掴む等といった働きかけと、VR 物体からの応答で反応する筋肉や関節、そして皮膚の感覚が統合して力触覚として認知される。

一方で力触覚的認知は視覚や聴覚と比べ劣位に扱われる事が多い。例えば視覚と力触覚のモーダルの研究において、視覚が空間的知覚の優位性をもつ事が知られている。また、人間の五感による知覚の割合は、それぞれの感覚器が処理可能な情報量を基準にすると、視覚が 83%、聴覚が 11%、力触覚が 1.5%である[94]。このように感覚統合における力触覚の重要度は視覚や聴覚と比べ低く、また、力触覚の研究は視覚・聴覚などと比較すると研究の歴史が浅く、社会に普及しているデバイスも発展途上である。

しかし、VR 物体とインタラクションする上で、力触覚認知は非常に優れたインタフェースである。VR 物体の素材や重み等の力触覚的手掛かりは視覚情報のみでは判断できず、実感性の高いインタラクションには力触覚認知が必要である。力触覚認知は VR 物体に存在感を与え、対象物の操作性が向上すると言われている。そのため、VR コンテンツ体験の没入感をさらに高めるために、ユーザの視覚と力触覚の両方にアプローチする手法が提案されてきており、様々なタイプの力触覚提示デバイスが発表されている。力触覚認知は、実質的な体験を可能とする VR では欠かせない要素の一つであると考えられる。

1.2.1 指先への力触覚提示デバイスが持つ課題

力触覚インタラクションの中でも、ユーザに力触覚刺激を行う身体の部位として、特に指先や手掌部に力触覚刺激を提示する事が多く行われているが[5][6]、多指に対して複数自由度の力触覚を提示しようとするデバイスが大きくなり、指の

動きも妨げてしまう問題が生じてしまう。デバイスのサイズが大掛かりになってしまう原因の 1 つはアクチュエータによるものである。指に対して十分な力提示を実現するアクチュエータは、サイズと重量が大きくなってしまいう課題を持つ。そのため多くの時間とコストをかけても、一般的に使用できる力触覚提示デバイスが開発されていない。

1.2.2 異部位転移技術による解決策

指先への力触覚提示デバイスは、アクチュエータの制約に対する根本的な問題で装置が大掛かりになってしまい、複数指に装着すると物理的な干渉を引き起こす。本論文では、以上のような課題に対して次のような考えに基づき解決を試みる。VR 物体が相互作用する指と、力触覚を提示する部位を分離する。つまり、指先の力触覚を身体の内部位に提示する事で課題の解決を試みる。これを本論文では異部位への「力触覚転移」と呼ぶ事とする。

異部位への力触覚転移は、福祉分野における感覚代行技術と高い類似性を持つ。特に、義手関連の研究で、指や手掌部を失った人の感覚を代行する技術として多く用いられる。感覚義手が知覚する物理的な力触覚情報をセンサで検知し、身体の内部位に刺激を再現する[7]。つまり、物体と相互作用している感覚義手と力触覚を提示している身体部位が分離しており、本論文ではこの技術を VR 技術に応用できるのではないかと考えた。直接指や手にデバイスを装着する事無く身体の内部位に力触覚を転移する事によって、指の動きを妨げる事無く自由に動かせる事が可能となる。さらに、アクチュエータの大きさによる制約を受けないデバイスの設計が可能となる。

1.3 本論文の目的および構成

本論文の目的は、指先の力触覚情報を身体の内部位に転移する事で、デバイスの実現可能性を担保する事である。また、設計・開発した力触覚転移デバイスを基に、力触覚インタラクションのリアリズムを向上させるための要件を明らかにする事を目的とする。具体的にはまず、VR 物体を操作する上で重要な触知覚要素である「分布的触覚を含まない力触覚」と「分布的触覚」に着目し、デバイスの設計・開発の指針に設定する。次に、「分布的触覚を含まない力触覚」と「分布的触覚」に基づく力触覚デバイスの設計に関する研究について述べる。各研究では個々の研究背景を述べ、それに則した目標を設定し、具体的な力触覚インタラクションの実装および評価を行う。そして、試作した力触覚転移デバイスをそれぞれ総括し、異部位転移における力触覚イ

インタラクションのリアリズムを向上させるための要件を明らかにする。

1.3.1 分布的触覚を含まない力触覚の転移

指や手掌部への力触覚提示デバイスが真価を発揮する場面は、複数指で物体を把持し物体を操作する状況である。特に、指で作業を行うという観点では、重要な力触覚提示要素の1つは「力の強さおよび方向（力触覚）」である。VRの物体を把持した際に生じる力を、大きさと向きの情報も含めて異部位に提示する事で、指の動きを阻害する事なく作業を支援できると考える。

そこで、本論文ではまず「力の大きさおよび方向」の提示が可能なデバイスを試作する。分布的触覚を含まない力触覚の転移では、指に加わる「力の大きさおよび方向」を異部位に提示し、提示された力触覚を指が知覚するものと同じように、違和感無く解釈可能かどうか調べる事を目的とする。また、指に対応して提示される力触覚が正しく伝わるかどうか調べる。最後に、VR物体を把持して操作する際の体験のリアリズムと操作性について評価する。

1.3.2 分布的触覚の転移

皮膚の空間解像度が最も高い身体の部位は指であり、物体に触れた時の質感や重さといった作業の際に必要な情報を取得する事ができる。また、指皮膚の二点弁別閾（2点に機械的刺激を与えた時、これらが別々の刺激によるものであると識別できる最小の距離）は最短で2mmであり（[63]）、対象物の形状やエッジなどの分布的な触覚情報を取得する。

分布的触覚の転移では、指皮膚の接触分布を背部に投射し、誤解無く力触覚情報を伝える事を目的とする。指皮膚の2点弁別刺激点毎に変化する力の圧力分布情報をセンサで検出し、背部に対応する部位に投射する事で、押下力を適切に伝える。物体に触れる際や、把持して作業する際の「皮膚の接触分布」が、力覚と同様に重要な力触覚提示要素の1つであると考え、指先の圧力分布を背部に振動子を用いて提示する手法を提案する。

1.3.3 本論文の構成

本論文では本章を含む全6章から構成される。各章の内容の趣旨は以下のとおりである。

第 1 章では、VR 技術における力触覚インタラクションの重要性を述べた。また、VR 技術で力触覚インタラクションが着目されてきた背景と、力触覚デバイスが持つ課題について述べた。次に、課題を解決するアプローチの 1 つとして、力触覚転移手法について述べた。本論文の目的を設定し、指先の力触覚を身体の異部位に転移するデバイスの開発と力触覚インタラクションの指標を設定した。

第 2 章では、力触覚デバイスを構築する上で重要な力触覚の心理・生理学的知見を共有する。特に、本研究でターゲットにしている指先の力触覚認知メカニズムと、皮膚感覚に関する受容器と力覚等の固有感覚に関する受容器の説明をする。用語の定義を行った上で、本研究の立ち位置を示す。

第 3 章では、まず、「分布的触覚を含まない力触覚」の異部位提示を試みる。前腕に指先の力触覚を提示する 5 節のリンク機構を採用したウェアラブル力触覚デバイスの原理試作について述べる。次に、装置をユーザに装着させ、親指、人差し指および中指に対応する前腕部の空間的配置について、VR 空間内で実験を行った。また、実際に VR 物体を用いて作業を行い、力触覚インタラクションのリアリズムについて調査した。

第 4 章では、第 3 章で試作したデバイスの高品質化について述べる。デバイスが皮膚に提示する力の大きさや向きについて、計測系を組み立て計測し、逆運動学から算出される値と比較した。次に、2 本の指に対応した力触覚デバイスを試作し、VR 空間内で作業を行う際の作業効率の評価を行った。

第 5 章では、指先の「分布的触覚」を背部に転移するベスト型の触覚デバイスの試作および開発について述べる。本章からは「分布的触覚」の異部位提示を試みる。本研究では指先の圧力分布を、ベスト内に設置した 100 個以上の振動子を用いて背部に提示した。ベスト型触覚ディスプレイが提示できる振動周波数や強度についての評価を行い、VR 空間内の指先のインタラクションに合わせて背部に振動感覚を提示した。次に、指先の圧力分布を計測可能なグローブを用いて、指先に加わる圧力を計測し、ベスト型の触覚デバイスの振動子と対応させた。指先に加わる些細な圧力を背部に拡大拡張して触覚を提示する事によって、文字や記号が背部の感覚で認知可能か調査した。

第 6 章では力触覚転移に関する研究を総括する。各々の研究を再評価し、課題を整理する事で、VR 空間内での力触覚転移手法が及ぼすユーザへの実感性とその要件を整理する。そして、本論文における結論と、今後の力触覚転移手法を用いた力触覚インタラクションのあり方・展望についてまとめる。

第2章

力触覚の心理・生理学的知見

力触覚の受容器は全身に備わっており，外界との刺激を受け止め神経信号を発生する細胞が存在する．この神経信号が脳に伝わる事で，ヒトは外界との接触を知覚する事ができる．本章では用語の定義を行った上で，力触覚の構造と機能および心理・生理学的知見について述べる[8][9]．

2.1 本論文が対象としている感覚

触覚や温度感覚，痛覚をまとめて体表面に生起する感覚の事を皮膚感覚と呼ぶ．また，力感覚や運動感覚等は，関節の位置や筋肉の伸張具合の状態を感じる感覚の事を指し，自己受容感覚（または深部感覚）と呼ぶ．近年ではこれらの感覚をまとめ，五感に相当する体性感覚と呼ばれる事が多い（図 2-1）．

本論文が対象としている感覚は「力感覚」と「触覚」であり，力によって生じる感覚を「分布的触覚を含まない力触覚」，皮膚変形によって生じる感覚を「分布的触覚」と定義する．解剖レベルではそれぞれの感覚を知覚する受容器が発見されており，本章では「力感覚」と「触覚」に関する受容器の構造とその働きについて説明する．

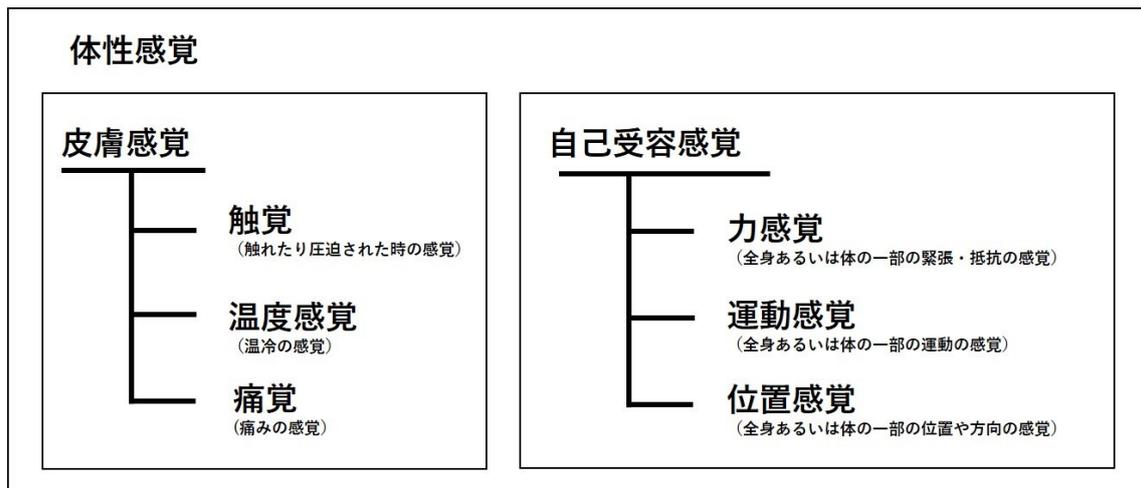


図 2-1：皮膚感覚および自己受容感覚の分類

2.2 力感覚に関する受容器

身体が物体を衝突すると反力が加わり、ヒトは力を感じる。検出そのものは受容器の働きによるものだが、身体と衝突物の力学的な現象は皮膚の変形や筋骨格系の緊張によって伝わる。力感覚の受容に関わる自己受容器は深部感覚ともいわれ、皮膚よりも深部にある筋骨格系に存在する。自己受容器は3種類に分類されるが、特に力感覚に貢献する感覚はゴルジ腱器官と筋紡錘である。運動感覚や関節の位置の感覚、重さの感覚等と関係している[8] (図 2-2)。

- **ゴルジ腱器官：**

10-20 本程度の錘外筋線維と腱の接合部に存在し、一端は筋に、もう一端は腱に接続された散形の終末構造を有している。発火頻度は、筋が収縮して末端の小包が歪む事で変化する。関節への負荷や曲がり方を検知して運動感覚を得るセンサの役割を果たす。

- **筋紡錘：**

骨格筋の筋周膜内に存在し、内部に錘内筋線維を含む。錘内筋線維には遠心性および求心性の神経線維が接続されており、遠心性の神経線維は錘内筋線維の収縮・弛緩の調節に関わり、求心性の神経線維は筋繊維の長さに関わる情報を検出する。姿勢の制御や運動の調節に重要な働きをする。

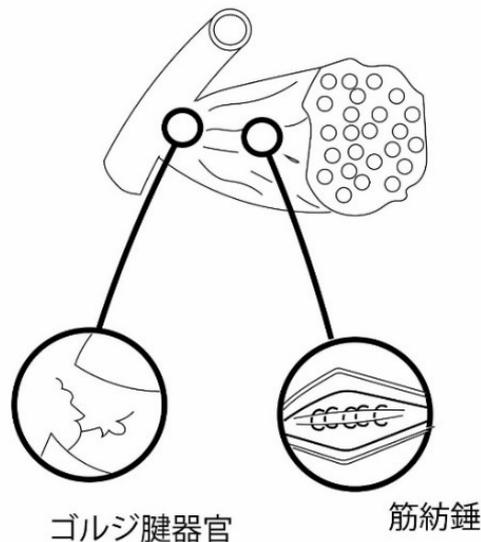


図 2-2：筋骨格系受容器の構造

2.3 皮膚感覚の触覚に関する受容器

皮膚は無毛部と有毛部に分かれている。無毛部は手指や手掌等の部分であり、皮膚全体の面積から見ると、無毛部の面積は狭いが物体に触れる事で世界の情報を得る事が可能になる部位である。有毛部は毛穴が存在する部位であり、皮膚の大部分を占める。ヒトの皮膚は図 2-3 の通りである。表皮、真皮、皮下組織に分けられ、触覚に関する情報を知覚する機械受容器は表皮と真皮の境界から皮下組織にかけて分布している。真皮の厚さは約 1~3mm となっている [8]。

皮膚の内部には、周波数特性の異なる 4 つの機械受容器が存在する。これらはカプセルなどの特殊な構造を持つ。無毛部に存在する特殊構造を持つ機械受容器は、マイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末の 4 種類である。有毛部にはマイスナー小体が無く、毛根部の神経繊維が巻き付いた毛包受容器が存在する。

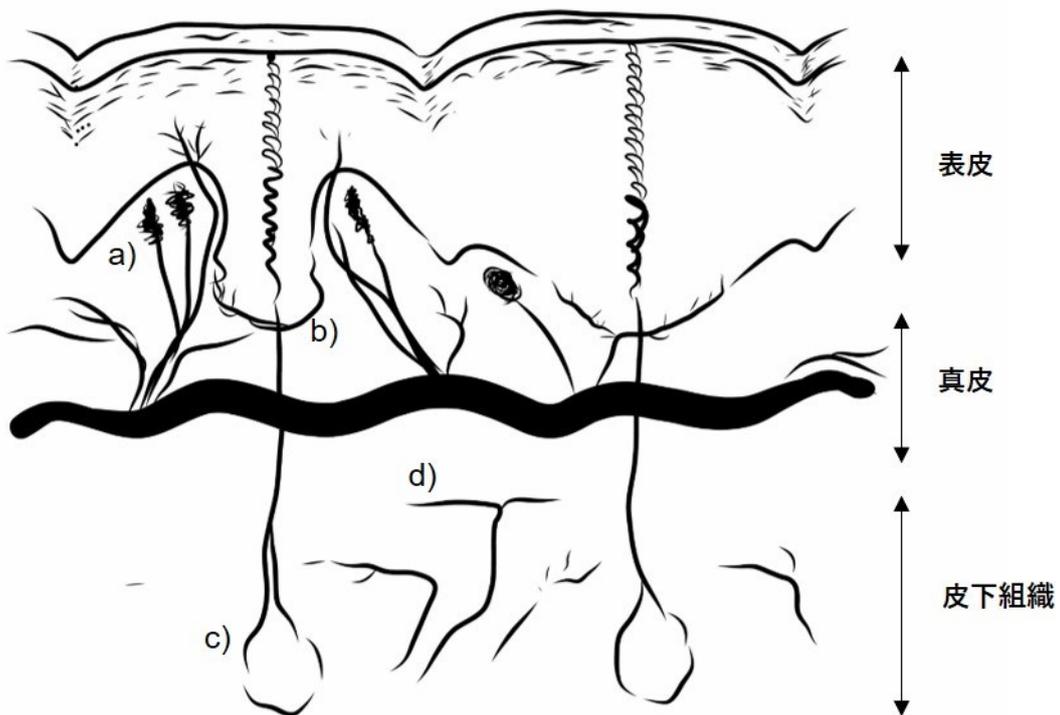


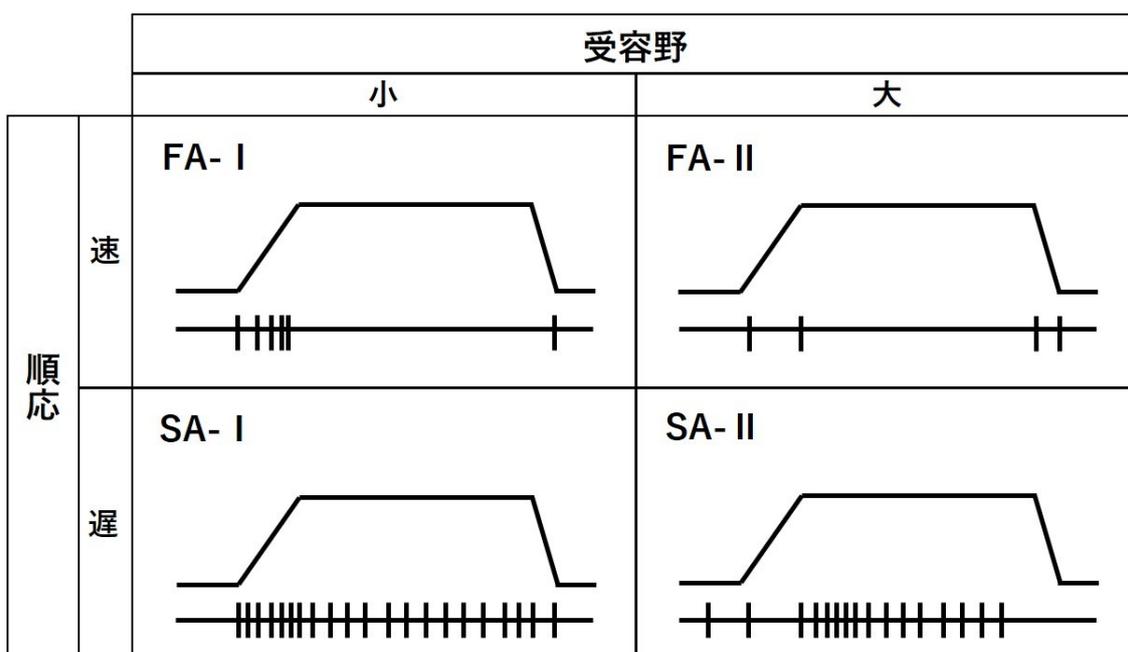
図 2-3 : ヒトの皮膚無毛部の断面図 ([10]を改変) ,
a)マイスナー小体, b)メルケル盤, c)パチニ小体, d)ルフィニ終末

2.3.1 触覚受容器の機能

ヒトの触覚受容器についての理解は、1960年代末の微小神経電図法が開発された事により、その理解が急速に進んだ。ここでは、この手法により明らかにされた触覚受容器の神経活動と、4種類の触覚受容器の機能について説明する。

微小電極を皮膚に刺入し、末端神経から単一神経発射活動を記録する。この時、受容単位で皮膚上に対応する受容野が表れる。この受容野の形態と機械的刺激に対する神経発射特性から、ヒトの触覚受容器単位は4種類に分類される事が知られている(表2-1)。

表 2-1：触覚受容器の受容野と時間応答特性 ([10]を改変) FA-I がマイスナー小体, FA-II がパチニ小体, SA-I がメルケル触盤, SA-II がルフィニ終末に対応。上の線は皮膚の歪み刺激, 下の縦線はインパルスに対応



FA I は速順応 I 型単位, FA II は速順応 II 型単位, SA I は遅順応 I 型単位, SA II は遅順応 II 型単位と名付けられている。FA I と SA I の受容野は直径数ミリ程度で小さく、受容野境界がはっきりしているのに対し、FA II と SA II は、受容野は大きいを受容野境界が不鮮明である。また、皮膚触覚受容器の密度分布は皮膚部位によって異なる。特に FA I と SA I で顕著にみられ、手指と手掌部で調べた結果によれば、指先での受容野単位の密度が最も高く、手掌部では減少する傾向を示している。

- **マイスナー小体：**

FA I に相当する受容器はマイスナー小体である。マイスナー小体は、指や手掌部の表皮の細かい溝に対応する真皮乳頭にある比較的大きい受容器である。エッジの細かさや鋭さのような僅かな盛り上がり反応する。

- **パチニ小体：**

FA II に相当する受容器はパチニ小体である。神経軸索の先端に繊毛様の突起があり、内芯の膜に入り込んでいる。この突起が、外部からの機械的刺激を軸索の受容膜へ伝えると考えられている。パチニ小体は刺激の変化、特に加速度を伴う物理刺激に反応する。また、250Hz の周波数の振動に対して最も良く反応する事が知られている。

- **メルケル触盤：**

SA I に対応する受容器はメルケル触盤である。メルケル触盤には指状の突起が数本出ている、これが周囲からの刺激を知覚するのではないかとされている。垂直方向の変形や圧力の変化、材質・形の感受に影響する。

- **ルフィニ終末：**

SA II に相当する受容器はルフィニ終末である。1本の有髄繊維の先が多数のより細かい分子となって終末を作り内芯をなしている。この繊維が外界と直結していて、外部からの機械的刺激を効率よく神経終末に伝えると言われている。ルフィニ終末は、局所的な圧迫・皮膚の引っ張りを感じることが知られている。

各触覚受容器は、先述した順応性や受容野の大きさだけでなく、反応する周波数も異なる。刺激プローブの形状変化、皮膚の冷却、マスキング刺激などを巧妙に組み合わせた心理実験によって、4つの触覚受容器に対応した4つの周波数別振動域検出曲線が発見された。この曲線は4種類の振動検出チャンネルがあるという意味で、4チャンネル・モデルと呼ばれる。4チャンネル・モデルは、0.4-500Hzの周波数範囲で閾値を調べた結果であり、指先において最も微小な振動を知覚可能な周波数は250Hz付近であると考えられる。また振動の周波数弁別は上記の4つのチャンネルの発火頻度を基に行われていると考えられており、指先で弁別可能な周波数は0Hz(圧覚)―1000Hz程度であると言われている[10]。

2.3.2 皮膚の2点弁別閾

身体の空間的分解能は2点弁別閾（2点に機械的刺激を与えた時，これらが別々の刺激によるものであると識別できる最小の距離）を計測する事で決定されてきた．Weinsteinらは身体の異なる20か所で2点弁別閾値を測定した（図2-4，[63]）．

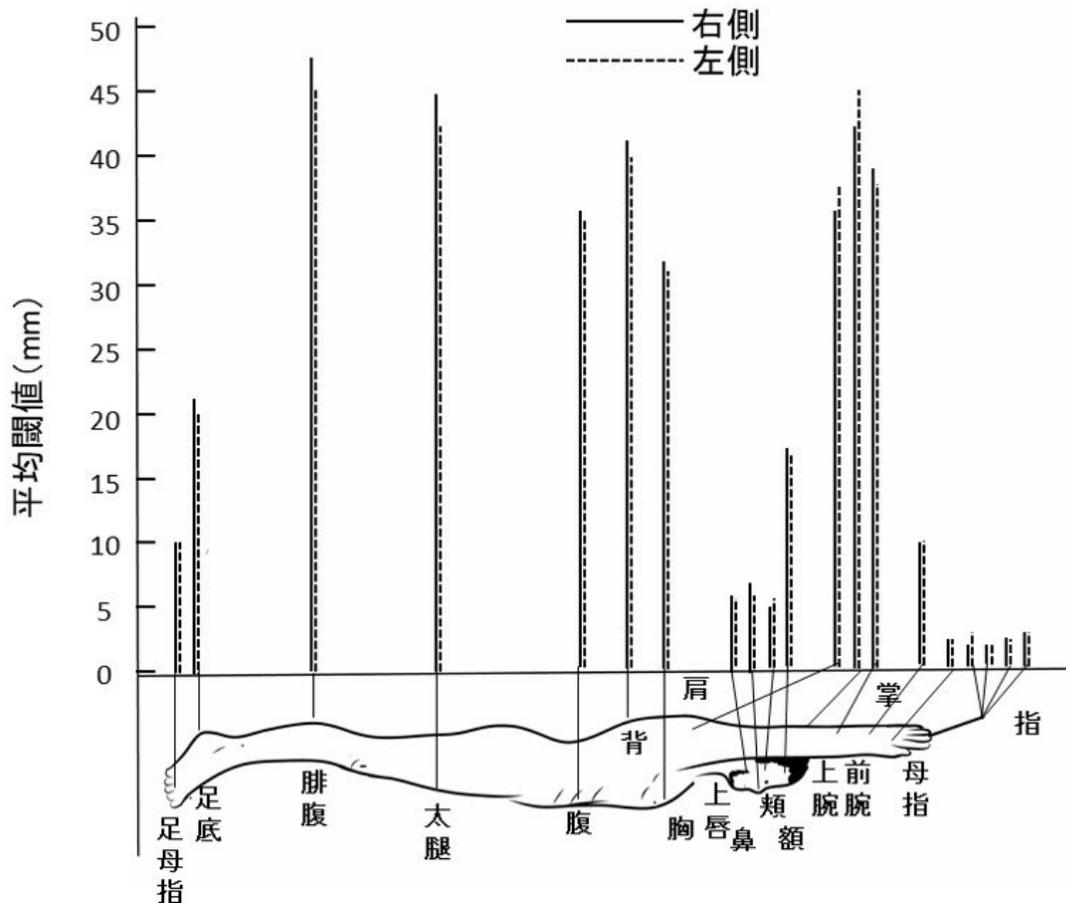


図 2-4 : 身体の2点弁別閾 ([63]を改変)

手指の2点弁別閾が2~3mmと最も小さく，腕，足底を除く足，体幹部は35mm以上となっている．2点弁別閾の大きさは大脳における触覚情報処理面積と強く関係しており，手からの情報処理を行う大脳の面積は広く，体幹部などでは面積が狭いといえる．本研究では，指先の触覚情報を前腕および背部に提示する事を試みる．これらの知見より，前腕では触覚提示装置を40mm以上の間隔を空けて設計する必要がある事が分かる．また，背部では触刺激を提示するアクチュエータを50mm以上の間隔を空けて配置・設計する必要がある事が分かる．

第3章

前腕への力触覚転移： 力触覚デバイスの原理試作

本論文の目的の 1 つは、指先の力触覚情報を身体の異部位に転移する力触覚デバイスの提案とシステムの構築である。本章では、特に指に加わる「分布的触覚を含まない力触覚」に着目した力触覚転移デバイスの設計とシステム構築について議論する。

本章では、まず指先の「分布的触覚を含まない力触覚」を前腕に転移するデバイスの試作について述べる。前腕を選択した理由として、脱着が容易でかつ、義手関連の研究では指先の力触覚代行部位として、腕や肩の選定が多いためである。本章では研究の背景と関連研究、目的について述べた後、試作したデバイスのコンセプトとデザインについて議論する。

次に、指に加わる「力の大きさおよび方向」を異部位で再現し、提示された力触覚を指が知覚するものと同じように、違和感無く解釈可能かどうか調べる事を目的とする。また、指に対応して提示される力触覚が正しく伝わるかどうか調べる。最後に、VR 物体を把持して操作する際の体験のリアリズムと操作性について評価する。

1 本指に対応するデバイスをはじめに試作する。次に、デバイスを 2 本指と 3 本指に対応可能なタイプに改良し、それぞれの指に対応する部位について調べた。最後に、VR 空間で物体を把持して持ち上げる動作を行い、体験の違和感とリアリズムがどの様に変化するか調べた。

3.1 関連研究

我々の指は他の体の部位と比較するとその受容器の数の多さから、物体に触れた時の質感や形状、重さといった重要な情報に非常に敏感である[8]。VR 空間内にある物体に対する力触覚提示デバイスは、多くの場合、VR 空間中の指先に生じる力触覚を実際の指先に提示することを前提として作られている[81]。ここではまず手掌部に装着可能で、かつ振動と力の感覚を提示可能な力触覚デバイスについてそれぞれ概観する。次に、手掌部への装着を必要としないデバイスについて概観した後、身体への異部位

に力触覚転移を行うデバイスについて概観する。

3.1.1 グローブ形状の力触覚提示デバイス

第一のタイプの装着可能な力触覚提示デバイスは、グローブ形状のものであり（図 3-1）、手掌部に装着するものである[5]。

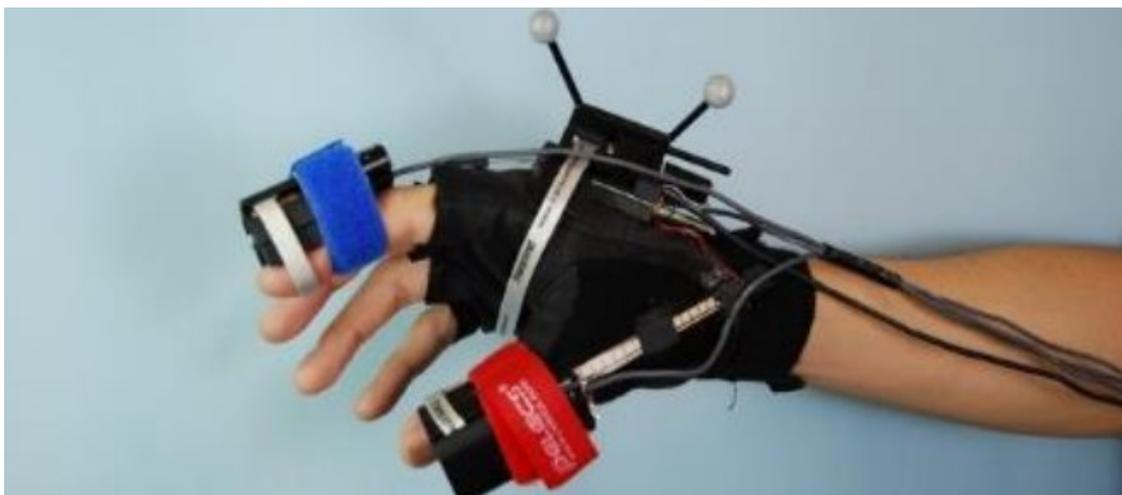


図 3-1：グローブ形状の力触覚提示デバイス[5]

外骨格型の力触覚提示ディスプレイは、振動子を提供するアクチュエータと比較すると大がかりなものが多い。まず、振動提示を目的とした触覚ディスプレイの先駆けとなったものは、内山らによって開発されたものである[12]（図 3-2）。視覚障害のある車椅子利用者に方向と空間表現を提供するためのものであった。振動情報は、手の甲に配置された 3 行 3 列の振動触覚アクチュエータを用いて提供されていた。Kim らは映画やコンピュータゲームのようなマルチメディア体験の没入性を高めるために同様のアプローチを用いた[13]。デバイスには 20 個の振動触覚アクチュエータを内蔵した物を開発し、触刺激とコンテンツを連動させるアルゴリズムを考案した。Sziebig らは指先に 5 つ、手のひらに 1 つの合計 6 つの振動触覚アクチュエータで構成される VR 用の振動触覚グローブを開発した[14]。

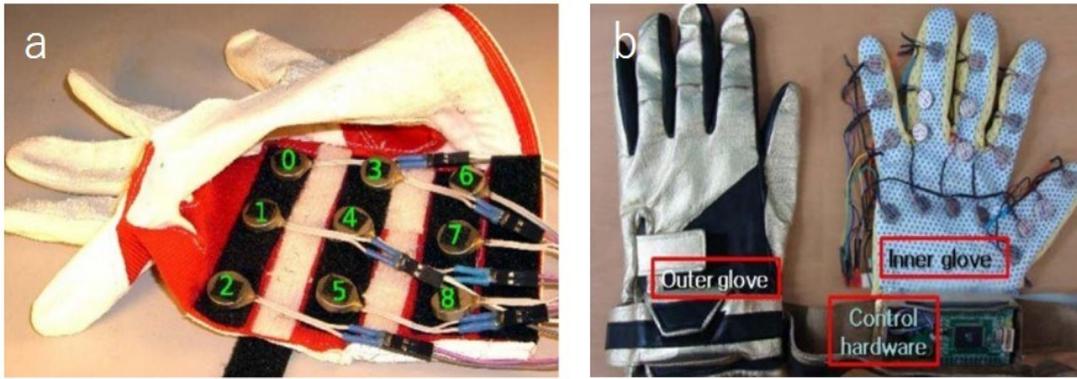


図 3-2 : a)振動子を手掌部に配置したグローブ形状の振動触覚提示デバイス[12], b) 振動子を指や手掌部全体に配置した振動触覚提示デバイス[13]

振動触覚の提示は、複雑機構を必要としない簡単な手法の 1 つであるため、振動子を用いたグローブ型形状のデバイスは多い。しかしながら、実際に触れた際の力や力の大きさといった情報の提示は振動子だけでは困難であり、触れた、触れていない等の 0 か 1 で表現される事が多く、豊かなインタラクションを創出するにはより工夫が必要だと考えられる。また、脱着の手間や、デバイスが大きくなってしまおうという課題を持つ。

グローブ形状のデバイスを用いて、圧覚や皮膚のせん断力等の力触覚の提示を可能とするデバイスは古くから開発されている (図 3-3)。例えば 1992 年に Bergamasco らは手に対し力触覚提示を行うグローブ形状のデバイスの開発している [15][16]。Ferrier[17]らは、4本のリンクを持つリンク機構を使って手掌部の基点から指先に力を提示するデバイスを開発している。その他にも、空気圧バルーンアクチュエータを用いて指に力のフィードバックを提示する研究も存在する [18][19]。さらに、VR 物体を把持するために特化した力触覚提示デバイス等、特定の場面に特化した力触覚提示デバイスが多数発表されている [21]。



図 3-3 : a) 2本の指に力覚の提示を行うデバイス[20], b) 5本の指に力覚 (圧覚) を提示するデバイス[11]

グローブ形状のデバイスや外骨格のデバイスは、指先とは異なる場所に基点があるため指を曲げるための実際の力を提示する事ができる。しかし、脱着の手間や、デバイスが大掛かりになるという課題を持つ[84]。また、グローブ形状のデバイスは対象の指や手に確実に力を提示するため、しっかりと固定されている場合が多い。アクチュエータの数も指の本数に合わせて必要になるため、デバイスの重量も増加する。特に外骨格型のデバイスは長時間着用していると、不快感やストレス、疲労を招く事もある。鋭い縁、固い布バンドやデバイスが発する熱は、デバイスを装着した時の不快感の原因となる。さらに、指や手の大きさといった個人差を考慮しなければならない。これらの問題に対する解決策の1つとしては、柔らかい調節可能なストラップを用いる事や、変形可能な材料を用いる事である。

3.1.2 指先に装着可能な力触覚提示デバイス

第二のタイプの装着可能な力触覚提示デバイスは、指先に装着し、皮膚変形を生じさせるものである。この場合、指先に対して、指を曲げるような実際の力を生じさせることは出来ないが、皮膚変形は力を知覚するための重要な手がかりであるため、擬似的な力提示デバイスとして利用可能である(図3-4)。

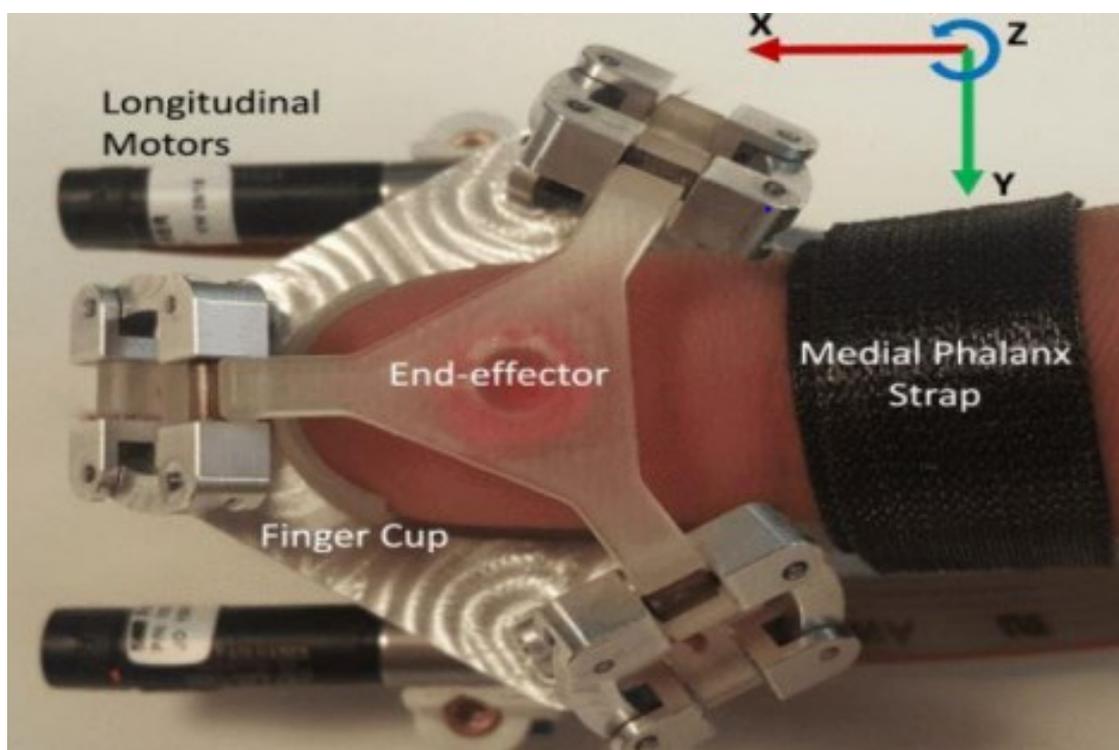


図 3-4 : 指先に装着するデバイスの例[23]

通常圧覚は、皮膚の上部から刺激（圧力）を加える事で達成できる（図 3-5）。Prattichizzo らは、RC サーボモータや DC モータを用いたデバイスを開発した。指先に設置されたプレートがモータによって上下に動く事で指に対し力触覚を提示している[22]。他にも、ピンアレイを並べ、圧覚提示を行うもの[24][25][26][27]も存在するが、ピンアレイの多チャンネル制御は困難であり、多くのモジュールとアクチュエータを必要とするデメリットが存在する。その他バルーンを用いて圧覚提示を行うものも存在する[28][29][30][31][32]。しかしながら、指先に装着するデバイスの場合、身体の他の部位と比較すると皮膚の面積は狭いため、デバイス側の工夫が必要であり、強い圧覚を提示するのは困難である。

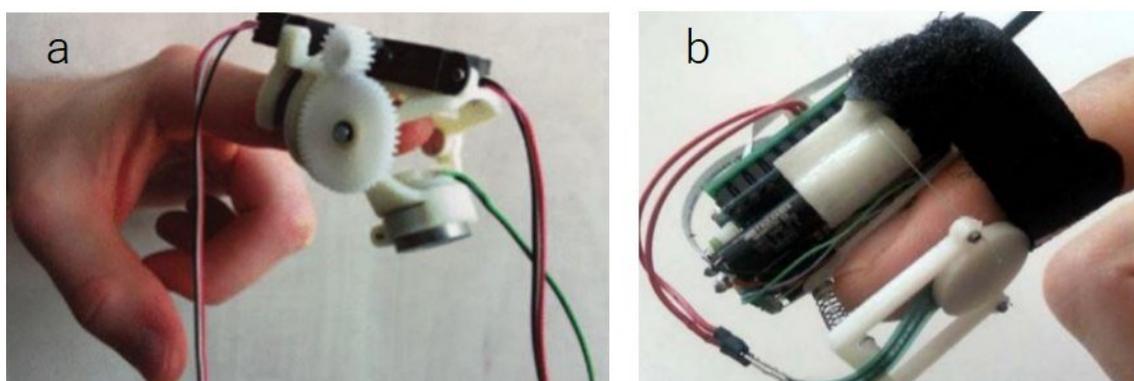


図 3-5 : a)RC サーボモータを用いて圧覚を提示する指先デバイス[33], DC モータを用いて圧覚を提示する指先デバイス[6]

皮膚変形（横ずれ感）は、指先で作業を行ったときに力の加わる方向を知覚する重要な触覚情報の1つである。例として、Gleeson らは指先の皮膚に横ずれを発生させる 2-DoF のデバイスを開発した[34]。皮膚の垂直と水平方向の運動刺激を組み合わせることで、物体をなぞる感覚を提示する事が可能である。

近年 DC モータを使用するデバイスが増えており[36][37][38]、振動触覚を提示できる事が RC サーボモータと比較して優位な要素である。DC モータを用いた力触覚提示デバイスの例として、Tsetserukou らは 5 節のリンク機構を搭載した指先装着型のデバイス（図 3-6）を開発した[39]。この機構では指に対して平面 2 自由度の力を提示する事が可能である[60]。Minamizawa らは、指刺激に対して水平方向および垂直方向の皮膚刺激で、VR 物体の重量をレンダリング可能なデバイスを開発した[35]（図 3-6）。ユーザの指先と接触しているベルトを動かす 2 つの DC モータからできている。モータが反対方向に回転すると、ベルトが指先に押し込まれ、モータが同じ方向に回転すると、ベルトが皮膚に水平方向の力を加えるものであった。

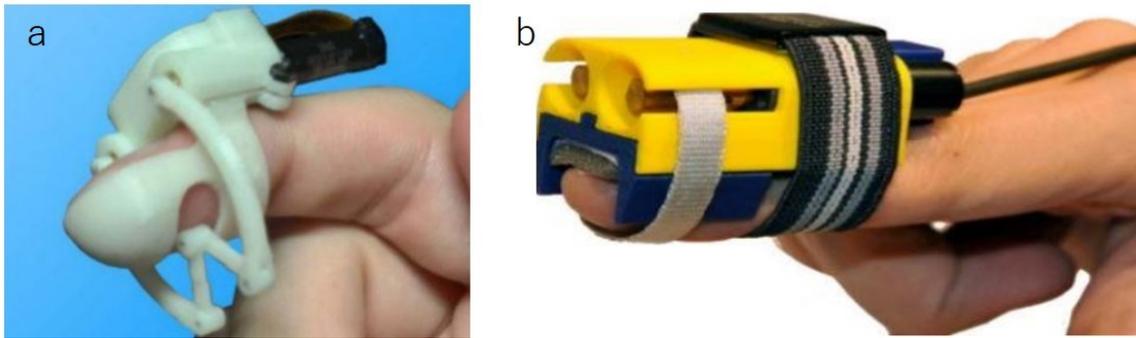


図 3-6 : a) 5 節リンク機構を DC モーターで駆動させ圧覚と横ずれ感を提示するデバイス[39], 指先に皮膚変形を生じさせるデバイス[35]

以上の様に、指先に装着する事で、圧覚を提示するデバイス[33]、皮膚のせん断や皮膚変形を用いて物体の形状や位置の認識を可能とするデバイス[35]、指腹上で 3 自由度に動く小型のデバイス[23][38]などが提案されている。しかしながら、特に指先に力の方向も含めた情報を提示する（すなわち多自由度力提示）場合、装置の重みはユーザに大きな負担となる。さらにデバイス同士の物理的な干渉の問題も避けられない。

3.1.3 その他の力触覚提示デバイス

これまでは指や手掌部に装着可能なデバイスについて概観した。これらのデバイスのメリットは、デバイス本体が使用者と独立していないため、装着場所を選ぶ必要が無い。一方で、デメリットとしては使用者に対して目的以外の力が加わる点が挙げられる。装着可能なデバイスの場合、力触覚提示デバイスは使用者にしか接していない。このため力呈示を行うと、作用反作用の法則により逆向きの力が別の場所に生じる。

上記の課題を解決するデバイスの 1 例として、本体を使用者と独立させ地面や卓上に置く事である[44][45]。VR 空間内の力触覚提示デバイスとしては、ウェアラブルなデバイスより質の高い力覚を使用者に提示できるが、大掛かりで非常に複雑な機構をしており、大変高価である。例えば Sigma.7 は、パラレルリンク機構を用いた 6 自由度を持つデバイスであり、20N の力覚提示が可能だが価格は 1 台 7 万ドルである[44]。このため、より納得感のある力触覚情報を提供する事と、装着性およびシステムコストとの間には、トレードオフを見つける事が重要とされる。

3.1.4 感覚義手における感覚代行デバイス

複数本の指に力触覚提示を試みる場合では、特に指先に力の方向も含めた多自由度の力提示を行う場合、装置の重みはユーザには大きな負担になり、さらにはデバイス同士の干渉も避けられない。こうした問題に対する現実的な解決策の 1 つは、指先ではなく体の異部位に指先の力触覚情報を提示することである。例えば指先の力触覚情報を腕や肩に提示するといった、力触覚情報の代行を試みる研究として、義手の研究が挙げられる (図 3-7)。

義手とは、触る・動くといった失われた感覚を再現する装置の事である。様々な研究やプロトタイプが開発されており、義手を装着している手指切断者の割合は 50~60% という調査結果が報告されている [96]。一方で、約半数は義手を拒否しているのが現状である。義手の装着を拒否する理由として、触覚的な手掛かりや通知が無い事が 1 つの原因だと言われている。義手の利便性を更に向上させるために、義手装具のための触覚提示技術 (感覚義手) は現在、電気刺激で行われる手法や機械的刺激によるもの等の様々な研究が進められている。

Peerdeman らは感覚義手として満たすべき機能の要件を調査し、下記の 5 点を定めている [97]。

- 1) リニアに力触覚が出力可能である事
- 2) 触刺激の解釈について簡単で直感的である事
- 3) ユーザへの義肢の位置のフィードバックが可能である事
- 4) フィードバックは装着者に対して控えめである事
- 5) フィードバックは装着者に合わせて調整可能である事

現在の感覚義手では、感覚を身体の異部位で代行するデバイスが一般的であり、特に腕や肩に振動子を配置する試みは数多く存在する [41][75][76][77][82][83]。これらの研究は、皮膚への電気刺激の手法と比較して手術が必要としない事や簡易的に装置の試作が可能な点から、機械刺激による触覚的手掛かりにフォーカスにした研究である。振動刺激や単純なパタンによる圧覚提示で触覚を通知しているが、把持力を伝達する研究は少ない。

このように、異部位への力触覚転移は福祉分野における感覚代行技術と高い類似性を持つ。物体と相互作用している感覚義手と力触覚を提示している身体部位が分離しており、本論文ではこの技術を VR 技術に応用する。特に、感覚義手ではハードルが高いとされている物体を把持して作業を行う状況に着目し、違和感無く力触覚が転移

可能か調べる。

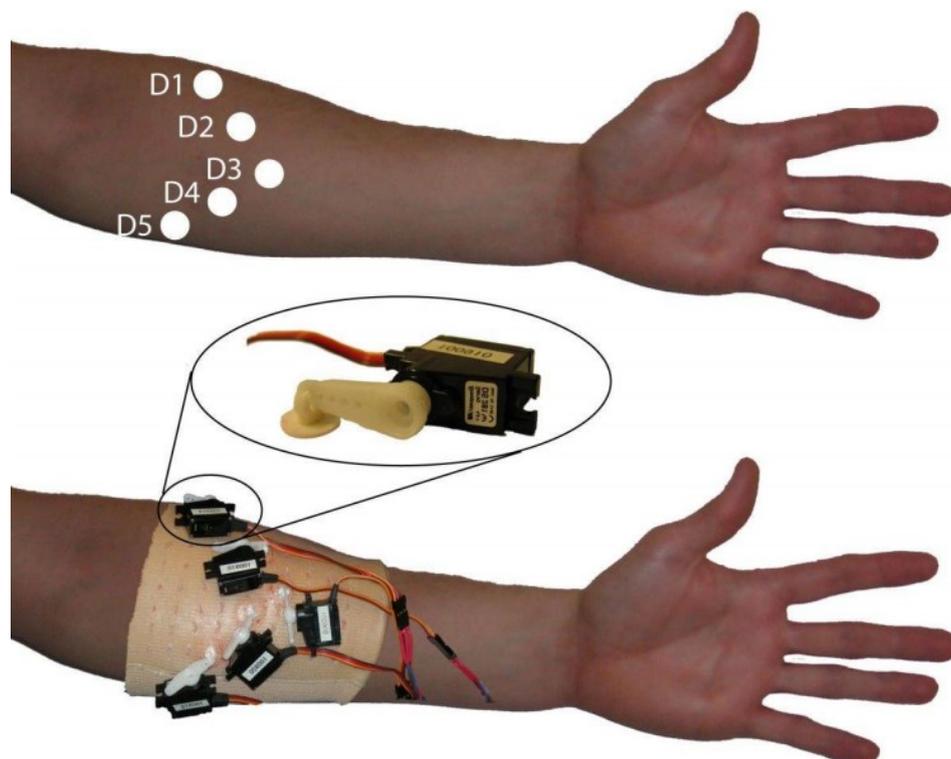


図 3-7：5本の指に対応して前腕に圧覚を提示する感覚義手の研究[41]

3.1.5 異部位力触覚転移デバイス

福祉機器で知られた感覚代行技術を，VR 技術に応用した研究も存在する．例えば，空気圧駆動型デバイスを用いて手が受けた力触覚を足裏へ提示する研究が行われている[42]，これにより，手にデバイスを装着する事無く力触覚が提示できる可能性が示唆されている（図 3-8）．また，指の力触覚を，吸引デバイスを用いて顔に提示する研究や[47][48]，リング状のデバイスを手首に装着する事で，手首に力触覚提示を試みるデバイスも存在する[49][89]．さらに，HMD を装着することを前提とする場合，顔を力触覚提示部位にすることで装着デバイスを HMD のみにし，装置の着脱を簡略化することができる．HMD に力触覚提示装置を内蔵する取り組みは多種多様な感覚モダリティを用いて提案されている[78][79][80]．ただし感覚義手の研究も含め，力の方向に関する情報を提示するものではなかった．回転方向[50][51]および並進方向[52][53][54]に皮膚を变形する事で，疑似力覚の提示を試みる研究が存在する．また，Casini らは手首に 2 自由度の力覚を提示可能な装置を発表している[55]．ただし，複数個所に力触覚を提示できるものでは無かった．



図 3-8 : a)腕への皮膚変形を利用した力触覚デバイス[46], b)足裏に指先の力触覚提示するデバイス[42]

3.2 腕への力触覚転移デバイスのコンセプト

VR空間中で物体に触れた時に、ウェアラブルデバイスを用いて、人差し指に対応する力触覚情報を前腕部位に転移するデバイスのコンセプトをまとめる。まず、1本指に限定したデバイスを試作し、実験や評価を行う。次に、親指・人差し指・中指の合計3本の指に対応するデバイスを試作する。最終的に3本の指に対応するデバイスの試作を目指す理由としては、実作業でのロボットハンドを用いる場面では、3本指である事が多いためである[56][57][58][59]。

力触覚転移デバイスでは、直接指や手に装置を装着する事無く体の異部位に力触覚を提示するため、指の動きを妨げる事無く指を自由に動かすことが可能となり、装置の着脱も容易となる。力触覚の転移部位として前腕を選択した理由としては、感覚義手の研究を参考にし、指と連動して動く腕の固有受容器を刺激する事で、指先で物体に触れている感覚を生起できるのではないかと考えた。また、従来の同様の試みとは異なり、力の方向も提示可能とすることによって把持などの作業にも利用できることを目指す。

本研究では、物体を把持する際に指に働く力を垂直方向と水平方向に分解する。垂直方向の力は、腕に対して「圧覚」を表現するため1自由度である。垂直方向の力は、腕に対して前後左右の「横ずれ」を表現するため2自由度となり、垂直方向の力の提示と合わせデバイスは3自由度の力提示が可能となる。一方で、Shibaharaらの研究では、指への水平方向の提示は必ずしも2自由度必要では無く、「水平運動である」とい

うだけで体験のリアリズムを担保できる、との研究結果が存在する[61]。この知見に基づき、本来2自由度が必要な水平方向の力提示を1自由度で抑える事とする。結果として、デバイスの複雑化も避けられる。

多自由度の力を提示するデバイスとして、5節のリンク機構を用いた指先や手掌部に装着可能な力触覚提示デバイスが Tsetserukou らより発表されている[39][60]。力触覚提示部位に対し、平面2自由度の力を提示可能であり、本研究で試作する力触覚転移デバイスのコンセプトと一致する。Tsetserukou らが採用した5節のリンク機構を持つ指先装着型デバイスを参考に、試作した M 字型の5節リンク機構の構造と利点について述べる。

3.2.1 5節リンク機構

まず、リンク機構とは複数のリンクがジョイントと呼ばれる可動部分により接続され、1つ以上の閉路を構成する組み合わせでできている構造を持つ。リンク機構は多種類の動きを生成する事ができ、多くの種類が存在する。最も基本的な動作をするリンク機構を図 3-9 に示す。

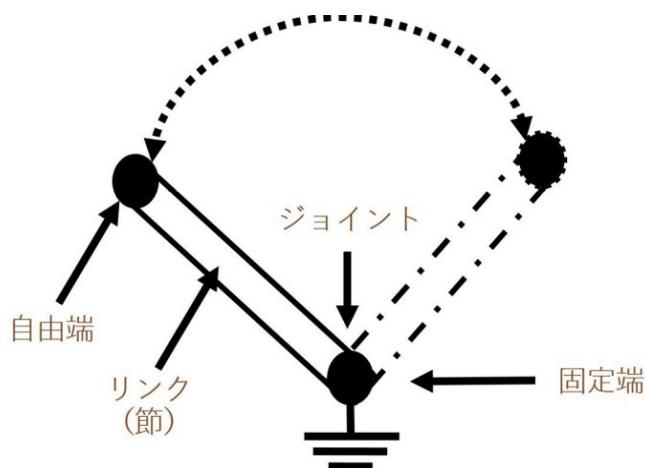


図 3-9：1節を固定端としたときのリンク機構の軌跡

自由度とは、「数式モデルにおいて、ある物体を動かすことができる方向の数」と定義されている。例えば、1本の棒を固定し左右問わず回転だけが可能であるシステムは「1自由度である」と言う。この棒は上下にも左右方向にも動くことができず、1本の軸の上で回転できるシステムだからである。反対に、回転はできないが、前後にスライドする場合も「1自由度」という事になる。

リンク機構の自由度の数は、グロブラーの式から求める事ができる。なお、 F は自

自由度, n はリンクの総数, j はジョイントが持つ1自由度の総数である(1).

$$F = 3(n - 1) - 2j \quad (1)$$

例として, 次の図 3-10 に示す 3 節のリンク機構は自由度が 0 である. つまり, 機構としては動くことがない. これを「固定連鎖」と呼び, 吊り橋などの建築物で見かける.

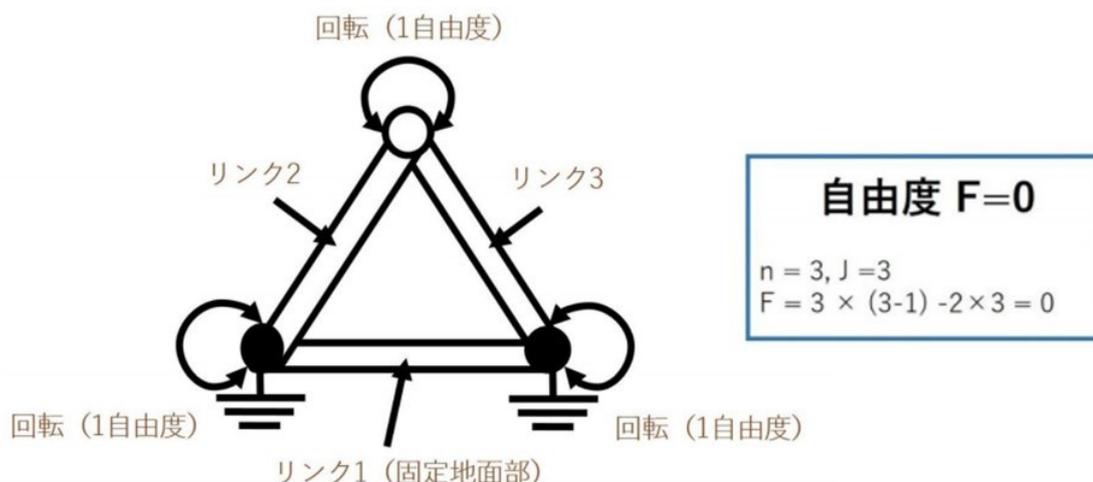


図 3-10 : 自由度が 0 の 3 節リンク機構

5 節リンク機構では, 2 節を駆動する事で平面 2 自由度の制御を実現できるが, 機構として決まった動作に従わず不定な動きをする (図 3-11). そこで, 本研究では 2 つのリンクを駆動用として固定し, 中心の節点を力触覚提示部位として定め, 固定する. この時, 不安定な動きとなるリンクの節点に動作拘束を与える事で, 実質的には 4 節のリンク機構としての動きを実現する. 5 節のうち 2 節を駆動する事で, 安定した平面 2 自由度の制御を実現した. 力触覚提示部位は上下左右に動く事が可能である. 上下 (垂直方向) の動きでは力触覚提示部位に圧覚を, 左右 (水平方向) の動きでは力触覚提示部位に横ずれ感を提示する事ができる (図 3-12, 図 3-13).

2 自由度の力提示を実現可能にする機構は, アクチュエータの数や種類によってその他の手法や機構も考えられる. まず, 垂直方向の力提示のみを考えると, 直動アクチュエータやバルーンを用いた力触覚提示が考えられるが, 水平方向の力提示との組み合わせを考えると, デバイスとシステム制御の複雑化が避けられない[17]. 次に, 水平方向のせん断力のみを提示を考える. 水平方向の力提示では, 2 辺のモータを駆動して皮膚上のジョイントをまきとる方式が存在し, 力触覚デバイスに良く用いられている. ここで, 水平方向と同時に垂直方向の力提示を行おうとすると, 皮膚接触部

に対してある程度の「高さ」が必要となり、垂直方向に十分な力提示が困難である [35]. 皮膚に対して十分な「垂直」と「水平」方向の力提示を行うためには、2辺のモータを駆動して皮膚にせん断力が提示可能で、なおかつ力触覚提示部位に対して垂直方向の力提示に必要な十分な「高さ」を担保できる 5 節のリンク機構が、本章で定めたデバイスのコンセプトに最も近いスペックを達成できると考え、M 字型の 5 節リンク機構の搭載を決定した.

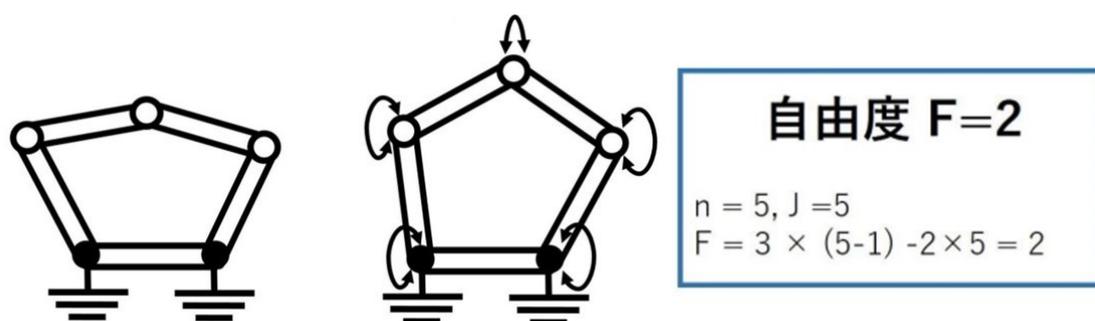


図 3-11 : 5 節リンク機構の自由度

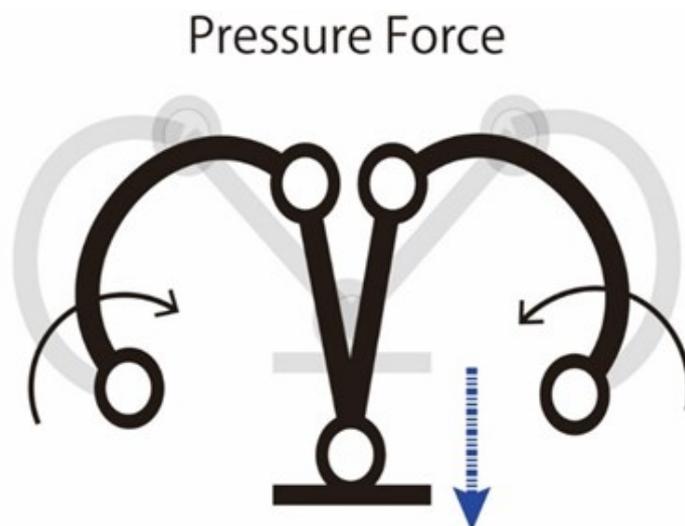


図 3-12 : 両端の 2 節を異なる方向に駆動する事で、中心の節が垂直に動く

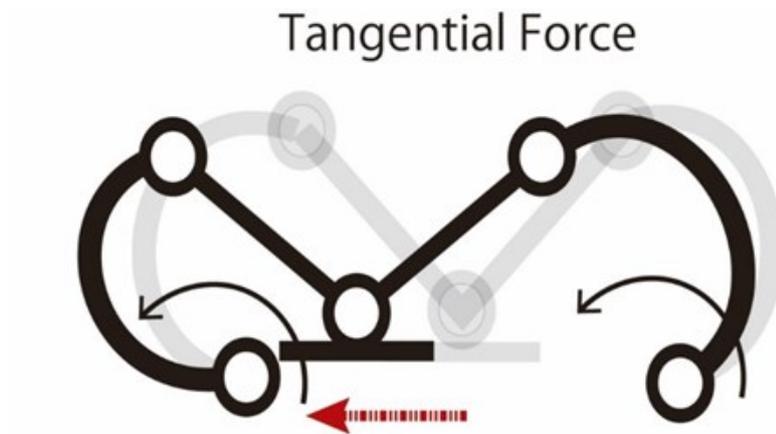


図 3-13 : 両端の 2 節を同じ方向に駆動する事で，中心の節が左右に動く

3.3 第 1 試作：1 本指に対応するデバイス

図 3-14 に作成した第 1 試作のデバイスを示す。まず，人差し指 1 本に対応するデバイスを試作した。デバイスは，腕への接触を防ぐため，M 字型をした 5 節のリンク機構をデザインした (図 3-15, 表 3-1)。デバイスの重みは約 100g であり，3D プリンタを用いて作成した。デバイスのマジックテープに手を通すだけで脱着が可能であるため，利便性が高い。腕に固定する事で，デバイスによる力提示で作用点が働きデバイスそのものが浮く事の無いように，ベース部分 (マジックテープでとめる部分) の面積を広く取り，力が分散する様に設計した。力触覚提示する部位 (前腕) の皮膚に粘着ゲルシート (Vitrode F, 日本光電製) を張り付ける (図 3-16)。この粘着ゲルシートは，電極パッドとして用いるものであるが，皮膚とデバイスを接続する素材として適当であったため使用した。粘着ゲルシートに付属した突起部にデバイスを接続する事により，デバイスの動きに皮膚が追従し，垂直および水平方向の力触覚を提示する事が可能である (図 3-18, 図 3-19)。



図 3-14 : 1 本指に対応するデバイス

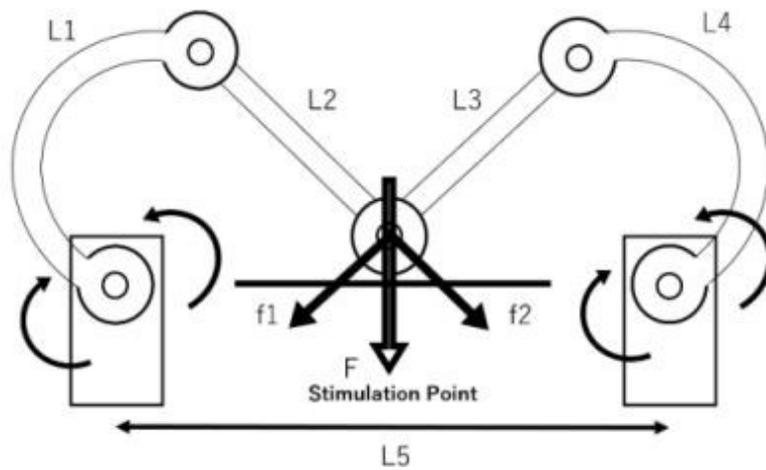


図 3-15 : M 字型をした 5 節のリンク機構を採用

表 3-1 : 1 本指試作デバイスのスペック一覧

Servo Motor	Towor Pro SG90
Link Length L1, L2, L3, L4 [mm]	50
Length L5 [mm]	180
Weight [g]	100
Vertical Force F [N]	6.0
Horizontal Force F [N]	1.2



図 3-16 : 5 節リンク機構の中央節に粘着ゲルシールを設置

試作したデバイスの両端の 2 節には，RC サーボモータ（SG90，梅本合同会社および Tower Pro Pte Ltd.）を用いた．RC サーボモータはマイクロコントローラ（ESP32，Espressif）と接続されており，PWM 比を変化させる事でモータを駆動させる．マイクロコントローラは PC と接続されている（図 3-17）．

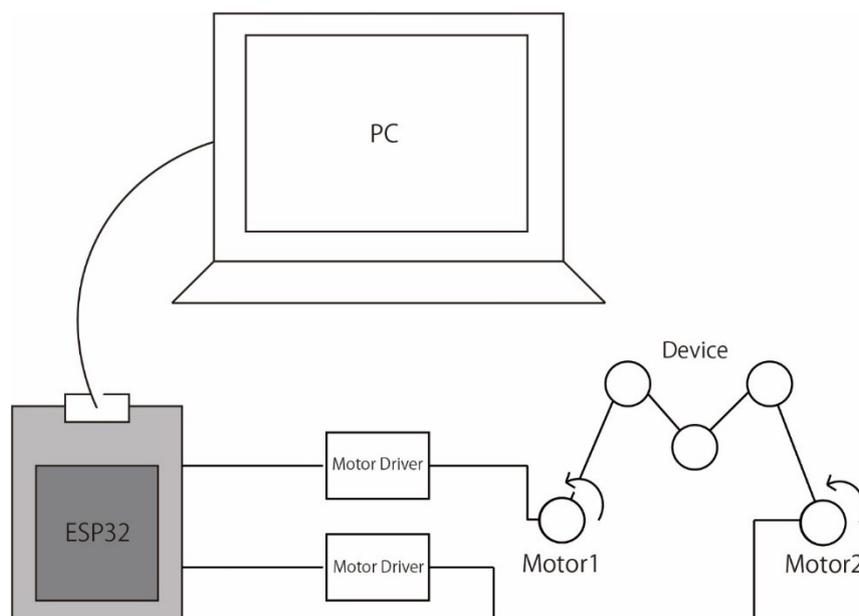


図 3-17 : システム構成

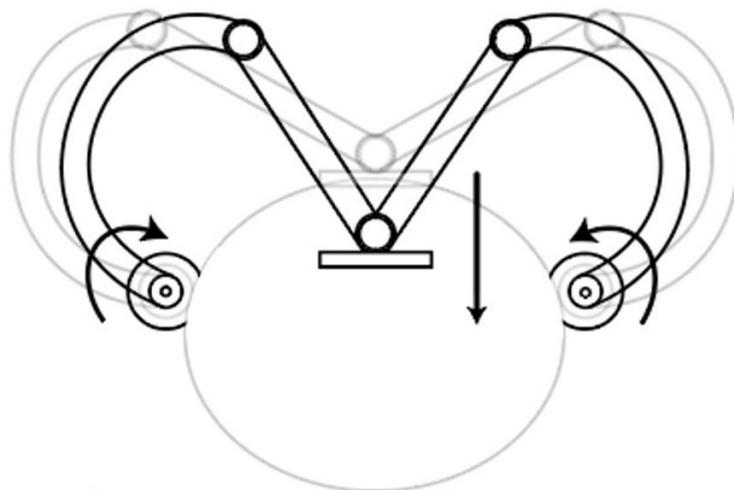


図 3-18 : 圧覚の提示 (2 節のモータを反対方向に駆動)

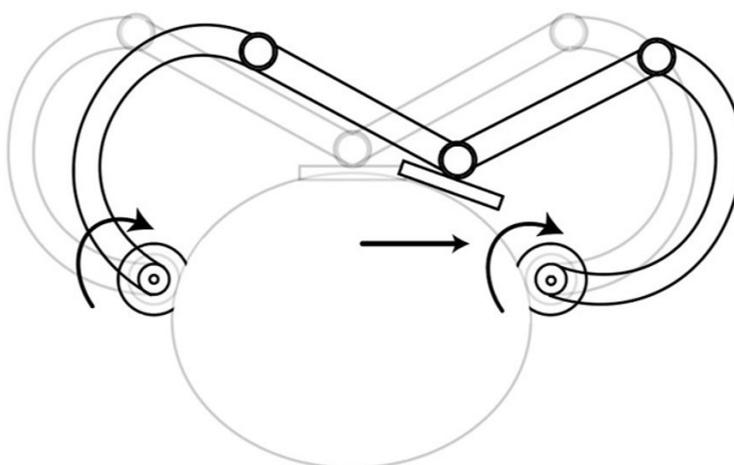


図 3-19 : せん断力提示 (2 節のモータを同じ方向に駆動)

3.3.1 実験1：人差し指に対応する前腕への力触覚提示部位の検討

本項では試作したデバイスを用いて、指に加わる「力の大きさおよび方向」を異部位で提示し、提示された力触覚を指が知覚するものと同じように、違和感無く解釈可能かどうか調べる事を目的とした。本実験では、1本指に対応する5節リンク機構デバイスを用いて行い、VR空間内で物体に触れた際の指先の力触覚情報を、前腕前方部の腹側・背側部と、前腕後方部の腹側・背側部の4ヶ所に提示した。指に発生する力の向きと、デバイスから提示される力の向きの関係を調査する事で、最も違和感無く力触覚の提示が可能な部位を調査した。

3.3.1.1 実験の条件および実験環境

力触覚を提示する部位は人差し指を突き出した時、人差し指から直線上になる部位を選択した。前腕前方部と前腕後方部の2か所、それぞれ上下を合わせた合計4か所で実験を行った(図3-20)。手首を屈曲させた位置を基準に、前腕方向に5cm測定した場所で実験を行った。前腕前方部と前腕後方部の力触覚提示距離Dは120mmである。視覚提示は、HMDとしてOculus Riftを使用した。また、LeapMotionを用いて被験者の指をトラッキングし、Unityを用いて提示映像を描画した。

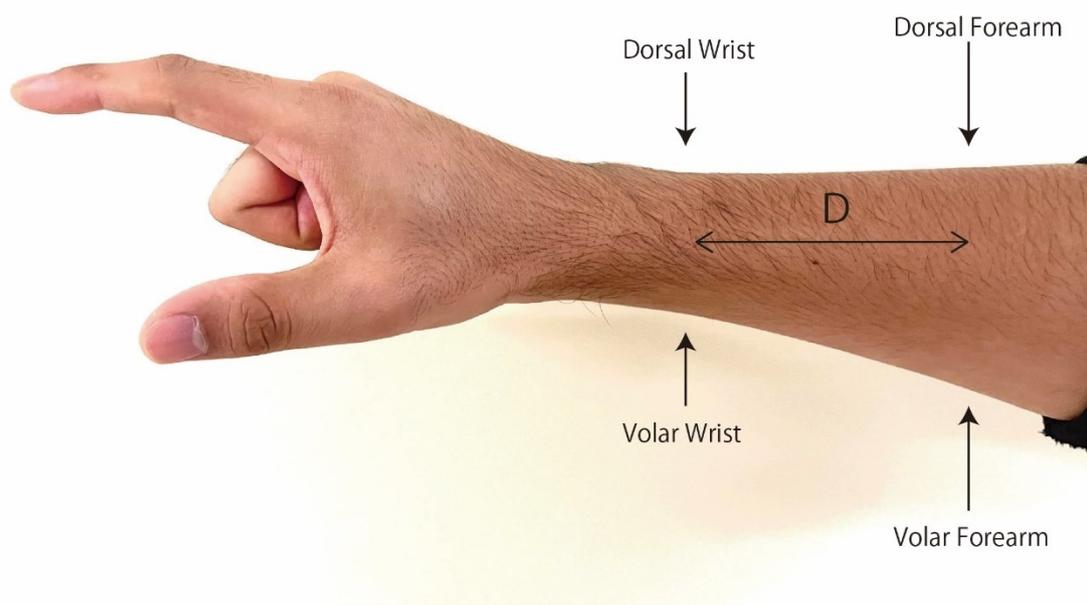


図 3-20：指先の触覚を提示する部位

指の運動と力触覚提示手法は以下の 3 条件を用意した。

1. 圧覚（垂直方向の力）
2. 映像と同じ向きの横ずれ（水平方向の力）
3. 映像と逆の向きの横ずれ（水平方向の力）

条件 1 の圧覚提示では、地面に対して垂直方面に約 40cm、4 秒かけて往復するマーカールにあわせて 10 往復手を動かしてもらい、VR 空間中の机に触れると同時に皮膚を圧迫する方向に力を加えた。条件 2 と条件 3 の横ずれ感の提示では、地面に対して水平方向に約 10cm、2 秒かけて往復するマーカールにあわせて 7 往復手を動かす。この時の皮膚への提示は、条件 2 では映像と同じ向き、すなわちマーカールが右に動く時に皮膚も右方向に牽引するもの、条件 3 では映像と逆向きであった。

実験条件は、提示位置 4 条件×提示する力触覚 3 条件の計 12 条件であった。まず被験者ごとにランダムで 4 箇所の力触覚提示部位を決め、条件 1 の圧覚での実験を行った。次に、ランダムで条件 2 と条件 3 のどちらかの条件を決め、4 箇所をランダムに決めて実験を行った。各試行において、提示された力触覚情報に対して違和感の無さを 1(違和感がある) から 7(違和感が無い) の 7 段階リッカートスケールで回答させた。被験者は研究室内のメンバー 7 名（男性 3 名、女性 4 名、21~24 歳）であった。

VR 空間中の視覚映像には机と赤いマーカールが表示されており、被験者は自身の指先をそのマーカールに追従させる。マーカールの動きとデバイスの動きは連動している。LeapMotion によって取得した指の位置はユーザにマーカールを追従させるためにだけ用いており、トラッキングした指とデバイスは連動していない。このマーカールの動きに慣れ正確な追従を行うため、被験者はそれぞれ 2 種類の力触覚提示に対してデバイスを装着する前に 30 秒の練習を行った（図 3-21）。実験中は HMD とヘッドホン装着させ、ホワイトノイズを聞かせることでモータの駆動音をマスクした。マーカールを 5 回追従した後、圧覚および横ずれを提示した際の違和感について回答する。



図 3-21：実験の様子

3.3.1.2 実験結果

圧覚を提示した際の違和感に対する回答結果を表したグラフを図 3-22 に示す。ノンパラメトリック分散分析(フリードマン法)を実施したところ、前腕前方部の背側部と腹側部に有意な差がみられた ($p<0.05$)。その他の部位同士には、有意な差は観察されなかった事から、4 つの部位の中で、人差し指に対応する最も違和感の無い部位は前腕前方部の背側部であることが言える。

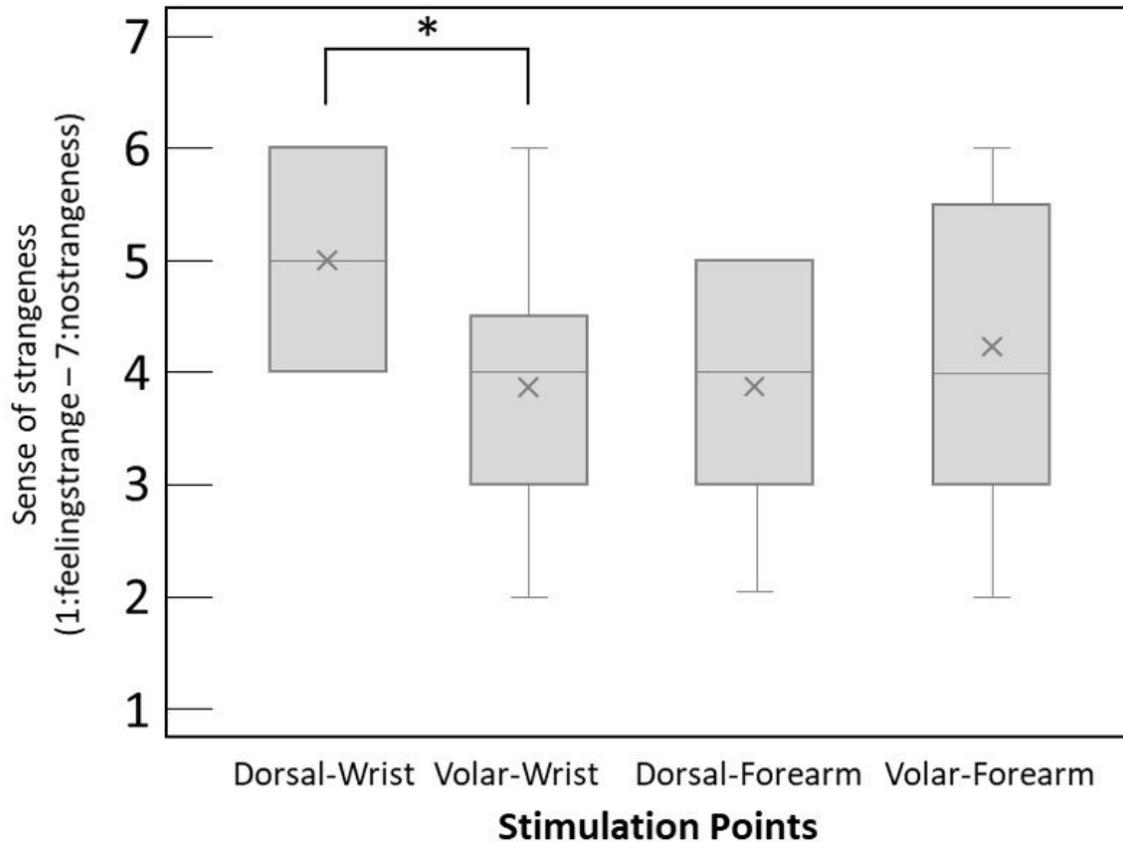


図 3-22 : 前腕に圧覚を提示した時の違和感

次に、7名の被験者に映像と同じ向きの横ずれ感を提示した場合、および反対の向きに横ずれ感を提示した場合の違和感に対する回答結果をまとめたものを図 3-23 と図 3-24 に示す。結果から、前腕前方部の背側部と腹側部、前腕後方部の背側部と腹側部で違和感の無さに大きな差が見られない事が分かる。また、前腕前方部と前腕後方部で比較する場合、前腕前方部での横ずれ感を提示した方が違和感は少なくなる事が分かった。また提示する横ずれ感の向きは、どちらの方向であっても結果はほぼ同じである事が分かった。

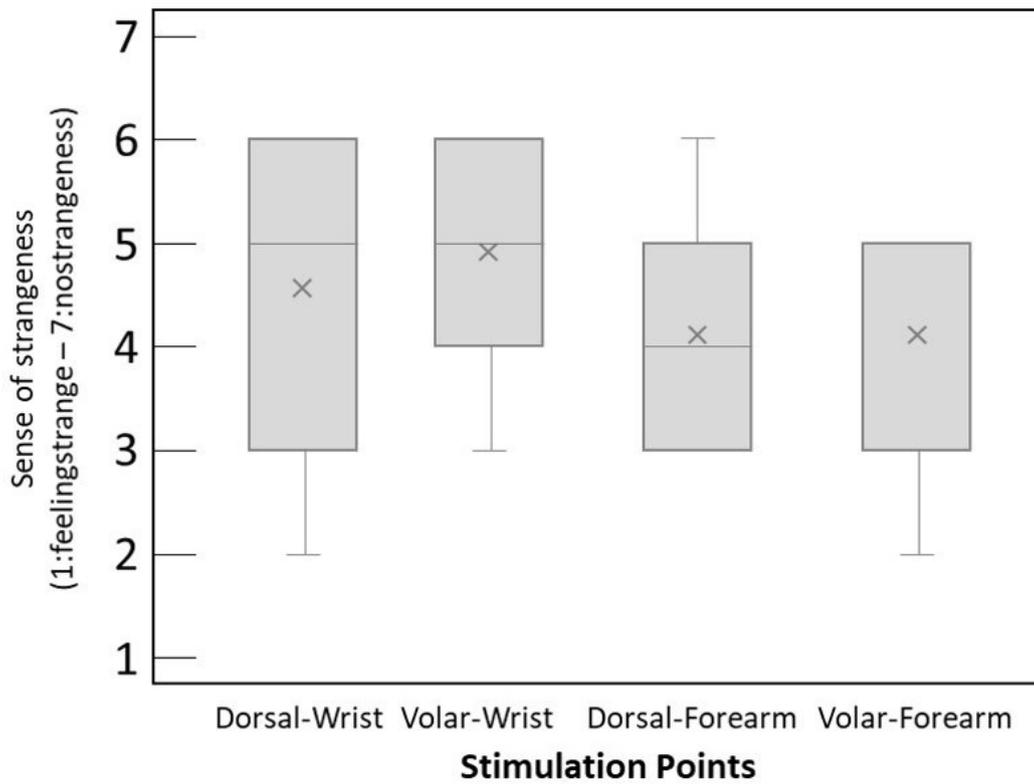


図 3-23 : 前腕に映像と同じ方向に横ずれ感を提示した時の違和感

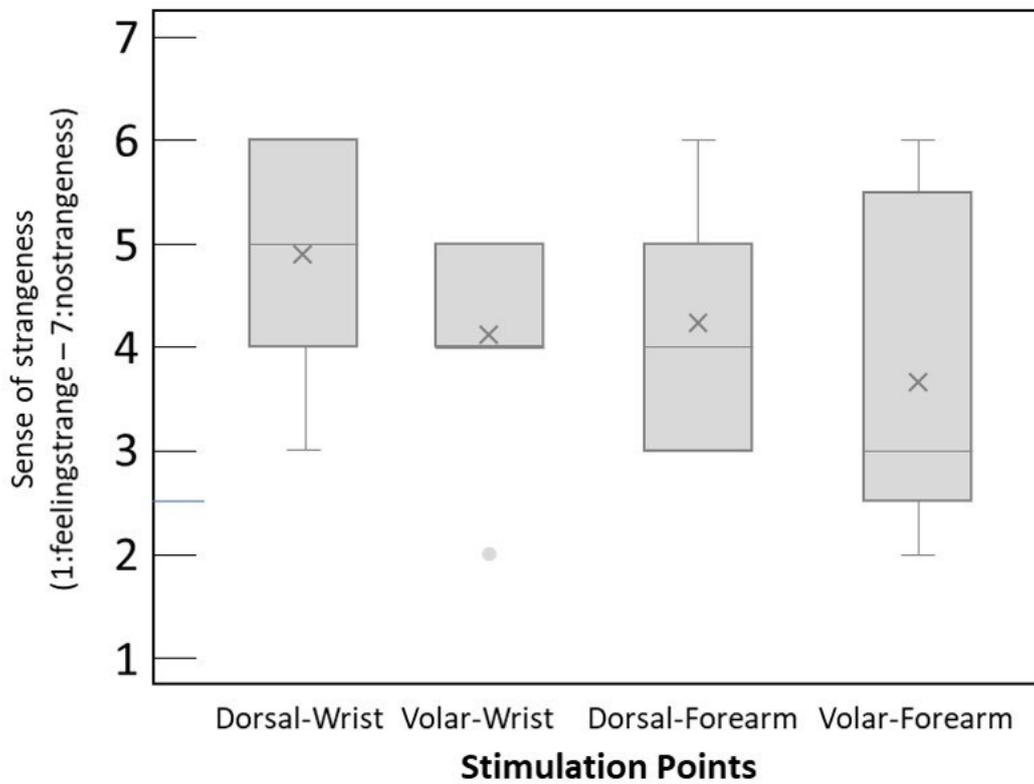


図 3-24 : 前腕に映像と異なる方向に横ずれ感を提示した時の違和感

3.3.1.3 考察

VR空間において人差し指の指先で物体に触れる時、圧覚を提示する際は、前腕前方部の背側部が最も違和感が無いという結果になった。これは、指が物体にかかる力の向きとデバイスから提示される力の向きが同じであることが重要であったと考えられる。実際に被験者からは、「腹側部だと、自分の意図に反した力が加わっている様を感じる」というコメントを得た。また、人差し指から最も近い直線上の部位であることから、実際の人差し指で物体を触った時の感覚と鮮明に比較できてしまうため、腹側部の方が背側部に比べ違和感が大きかったのではないかと考えられる。また、前腕後方部の評価が高いのは、距離が長くなったため、人差し指の実際の力触覚とは切り離し、記号的な提示として捉えているからではないかと考える。

次に横ずれ感提示の場合では、映像と同じ向きに横ずれ感を提示した場合と、反対の向きの場合では評価の差はほとんどなく、どちらに関しても前腕前方部に力触覚提示した場合が最も違和感が少なく評価される事がわかった。条件2と条件3の条件の違いが分からないとコメントした被験者が7名中5名にのぼった。これは横ずれに関してはその方向はリアリズムにあまり寄与しないという、Shibaharaらの発見した現象と類似した結果である[61]。また、前腕前方部の背側部と腹側部も、違和感に対する評価の差はほとんどないという結果になった。

本実験で用いた評価軸としての「違和感」はタスクに大きく依存し、被験者の解釈によって得点が大きく異なる。そのため、本実験では各条件間でのばらつきが大きくなってしまったのではないかと推測する。今後の課題として、VR物体に触れた際のリアルさやデバイスの使いやすさ、力の大きさ等細かく評価軸を分ける事で、デバイスの機能に対する具体的な評価を行う事が必要であると考えられる。

以上の結果を合わせると、人差し指の圧覚と横ずれ感を提示する部位は、上手首が最も適切であると言える。すなわち、人差し指1本に対する圧覚と横ずれ感の2種類の力触覚情報を1つの部位に提示できるデバイス構成が実現できる事を示唆している。

3.3.2 実験2：異なる方向からVR物体に触れた際の違和感の評価

次に、VR空間内での物体を人差し指で異なる方向（上下左右）から触れた時に、最も違和感なく圧覚と横ずれ感の力触覚提示が可能な部位を調べた。前節ではVR空間内の物体を上部から触れる際に、人差し指に対応する部位として前腕前方部の背側部が適切である事を見出したが、物体に触れる方向は固定であった。本項では人差し指

と物体の空間的な配置が変化する事で、指に対応する妥当な力触覚提示位置が変化する
か調べた。

3.3.2.1 実験の条件および環境

力触覚を提示する部位は、前腕の前方部の腹部と背部の合計 2 カ所とした。視覚提示には HMD (Windows MR, Lenovo) を使用した。また、光学式モーションキャプチャ (OptiTrackTrio, Acuity inc.) を用いて被験者の指をトラッキングし、Unity を用いて提示映像を描画した。



図 3-25：前腕の刺激部位

指の運動と力触覚提示手法は以下の 3 条件を用意した。

1. 圧覚（水平方向の力）
2. 映像と同じ向きの横ずれ（水平方向の力）
3. 映像と逆の向きの横ずれ（水平方向の力）

条件 1 の圧覚提示では、地面に対して垂直方向に約 40cm、5 秒かけて往復するマーカーに合わせて 5 往復手を動かしてもらい、VR 空間中の机に触れると同時に皮膚を圧迫する方向に力を加えた。条件 2 と条件 3 の横ずれ感の提示では、机に対して水平方向と垂直方向に約 40cm、5 秒かけて往復するマーカーにあわせて 5 往復手を動かしてもらった。この時の皮膚への提示は、条件 2 では映像と同じ向き、すなわちマーカーが右に動く時に皮膚も右方向に牽引するもの、条件 3 では映像と逆向きであった。

物体の触り方は以下の 4 条件を用意した。

1. 物体の上部から触れる
2. 物体の下部から触れる
3. 物体の右側から触れる
4. 物体の左側から触れる

実験条件は、提示位置2条件×物体に触れる指の向き4条件の合計8条件であった。まず、被験者ごとにランダムで2カ所の力触覚提示部位を決め、物体の触れ方は、ランダムな順に実験を行った。横ずれ時の実験条件は、提示位置2条件×横ずれの方向2条件×物体に触れる指の向き4条件の合計16条件であった。実験の手順は圧覚時と同様であり、ランダムで2カ所の力触覚提示部位を定め、ランダムな順に行った（図3-26）。

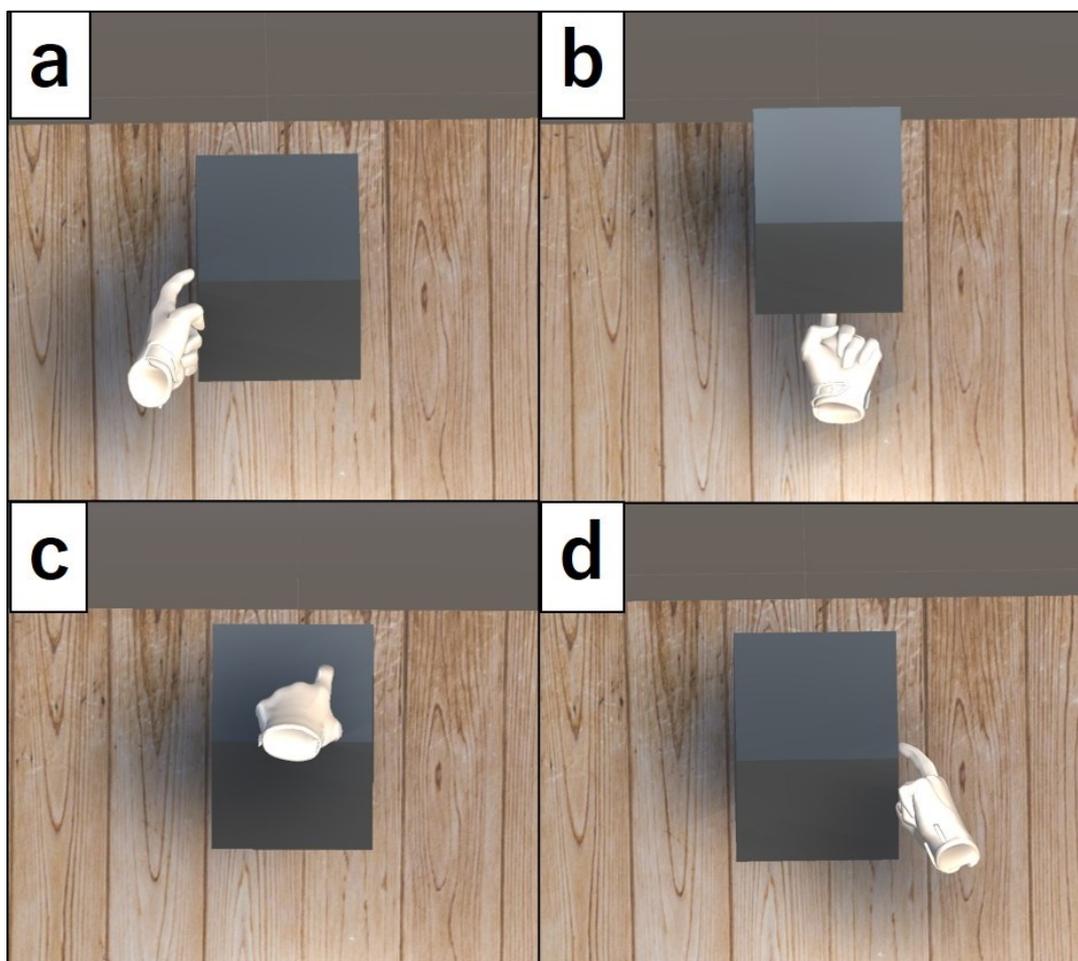


図 3-26 : VR 物体に対する触れ方 a)左側から触れる, b)下部から触れる, c)上部から触れる, d)右側から触れる

各試行において、提示された力触覚情報に対して違和感のなさを1（違和感がある）から7（違和感が無い）の7段階リッカートスケールで回答させた。各試行の前に、デ

バイスから力触覚提示が行われない状態を基準刺激として、5往復手を動かしてもらった。圧覚を提示する実験では被験者は研究室内のメンバー9名（男性9名、21~27歳）であった。横ずれ感を提示する実験では被験者は同じく研究室内のメンバー7名（男性9名、21~27歳）であった。

VR空間中の視覚映像には机と白いマーカーが表示されており、被験者は自身の指先をそのマーカーに追従させた。マーカーの動きに慣れ正確な追従を行うため、被験者はそれぞれの物体の触り方に対してデバイスを装着した状態で5往復手を動かし練習を行った。垂直方向には2.6N、水平方向には1.8Nの力を提示した。実験中はHMDとヘッドホン装着させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータの駆動音をマスクした。

3.3.2.2 実験結果

圧覚を提示した際の違和感に対する回答結果を表したグラフを図 3-27 に示す。それぞれの物体に対する触わり方の条件と、力触覚刺激提示位置によって差がみられるかどうかを検証するため分散分析を行った。その結果、物体を上部から触れる時、最も違和感の少ない提示部位は前腕の背側部である事が分かった($p<0.05$)。また、物体を下部から触れる時、最も違和感の少ない提示部位は前腕の腹側部である事が分かった($p<0.05$)。物体を左右から触れた時は、違和感の無さに大きな差がみられない事が分かる。

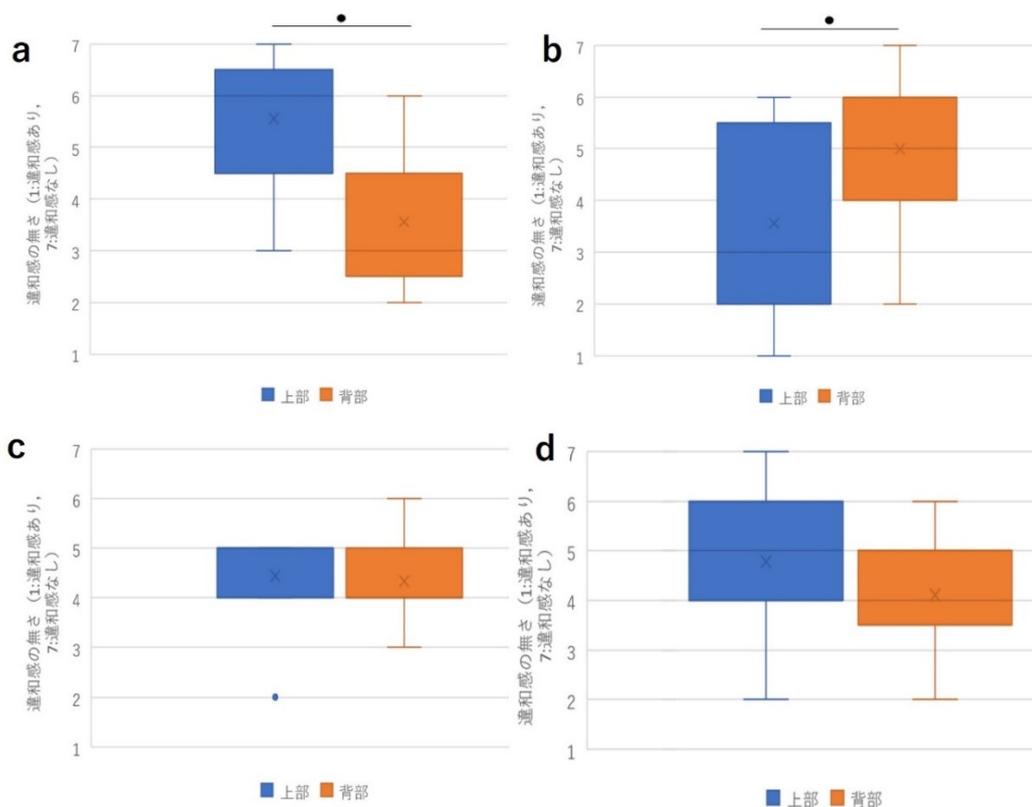


図 3-27：前腕に対して圧覚を提示する際に指を用いて a)物体を上部から触れる場合， b)物体を下部から触れる場合， c) 物体を右側から触れる場合， d)物体を左側から触れる場合

映像と同じ向きの横ずれ感を提示した場合，および反対の向きに横ずれ感を提示した場合の違和感に対する回答結果をまとめたものを図 3-28 に示す．それぞれの物体に対する触わり方の条件と，力触覚刺激提示位置によって差がみられるかどうかを検証するため分散分析を行ったが，どの条件にも有意な差は観察されなかった．この結果から，前腕前方部の腹側部と背側部を比較すると，違和感の無さに大きな差は見られず，また，提示する横ずれ感の向きは，どちらの方向であっても結果はほぼ同じである事が分かった．

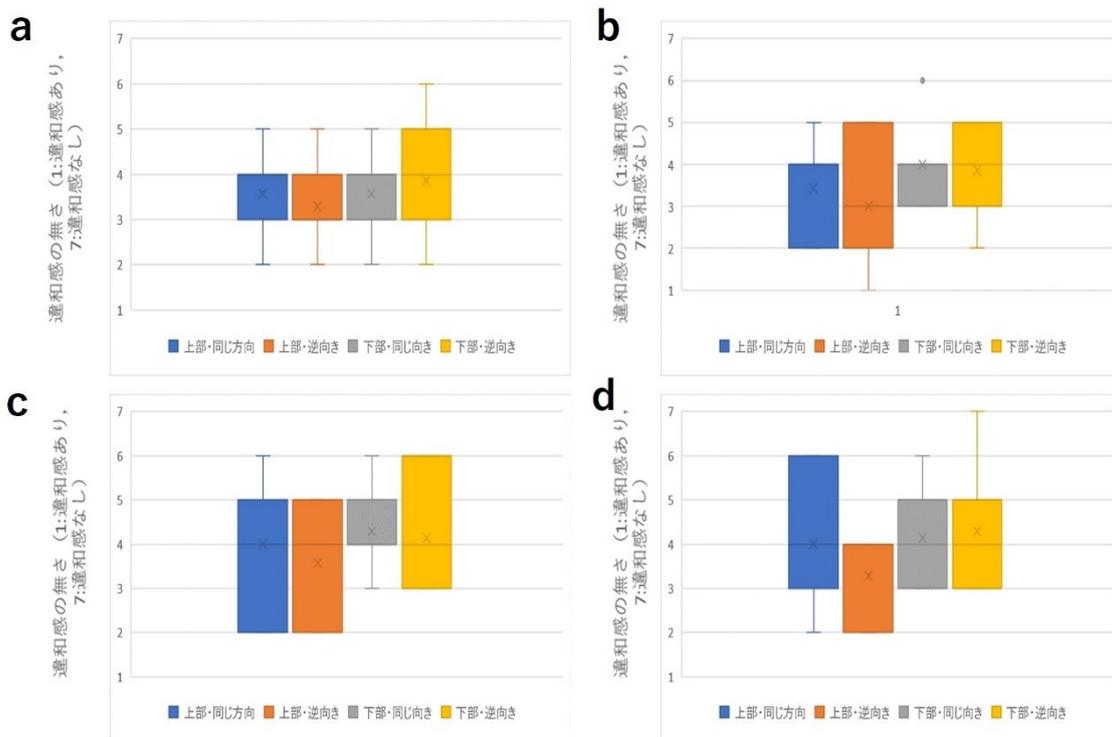


図 3-28 : 前腕に対して横ずれ感を提示する際に指を用いて a)物体を上部から触れた際, b)物体を下部から触れた際, c)物体を右側から触れた際, c)物体を左側から触れた場合

3.3.2.3 考察

VR空間において人差し指の指先で物体の上から触れる時、圧覚を提示する際は前腕前方部の背側部が最も違和感が無いという結果になった。反対に、人差し指の指先で物体の下から触れる時、圧覚を提示する際は前腕前方部の腹側部が最も違和感が無いという結果になった。3.3.1項の実験では、指が物体にかける力の向きとデバイスから提示される力の向きが同じである事が重要であると考察したが、本実験の場合では力の向きは逆である。本実験の結果から、物体と指の空間的配置が変化すると違和感が生起する部位が変化するという事を示している。

物体への触り方が上部と下部で力触覚提示に最適な部位が変化する理由としては、まず座標系の観点から考えることができる。普段我々は掌を下向きにする姿勢を取る場合の方がその逆の場合よりも多く、このため前腕の背側部を「上」、腹側部を「下」と認識していると考えられる。このとき今回触った対象物の上部を触ったときと下部を触ったときの違いを、この認識に当てはめることで、対象物の上部を触った=前腕の「上部」を触った、対象物の下部を触った=前腕の「下部」を触った、という解釈

が成立した時に違和感が少なかった可能性がある。つまり被験者は、提示されている前腕部を、自分自身の身体というよりは、触る対象物として解釈していたという可能性である。

一方で、単純な刺激の強さが実験に影響していた可能性も考えられる。今回被験者は、手の姿勢を一定に保っていた（明示的に教示していないが、VR空間中の手に合わせて動かすという教示を行っており、VR空間中の手は姿勢を動的に変化させていないため、一定の姿勢のまま運動していた）。このため、物体の上から触れる時、前腕前方部は多くの場合屈曲し、下から触れる時、前腕前方部は多くの場合伸展していた。このため、物体の上部から触れる場合（前腕の屈曲姿勢の場合）、前腕上部の皮膚と筋肉は伸びている状態であり、デバイスからの圧力提示がより強い力触覚として感じられた可能性がある。逆に物体を下から触れる時、前腕の伸展により、前腕腹側部の皮膚と筋肉が伸びている状態となり、デバイスからの圧力をより強く感じる事ができたと考えられる。今回の実験に置いては、指と物体の空間的配置の関係よりも、連続的な圧覚刺激が正確に伝わる前腕の姿勢が重要であった可能性が考えられる。物体を左右方向から触れる時、前腕は屈伸しておらず背側部・腹側部どちらも同じ圧力刺激が提示されていた事から、違和感もほぼ等しく感じたのではないかと考える。

次に横ずれ感提示の場合では、上下左右の触り方に対しての評価の差はほとんどなく、どちらに関しても映像と同じ向きに横ずれ感を提示した場合と、反対の向きの場合で評価の差はほとんどなかった。また、左右の横ずれ間の違いが判らないと評価した被験者が5人にのぼった。これは横ずれに関してはその方向はリアリズムにあまり関与しないという、Shibaharaらの発見した現象と類似した結果である[61]。

以上の結果を合わせると、横ずれを提示する部位は、物体の触り方に寄らず、前腕背側部と腹側部でどちらでも良いと言える。圧覚を提示する部位は、前腕の屈伸方向に合わせて圧覚刺激を提示する必要がある。ただし、人差し指を用いて物体の下部に触れるシチュエーションは少なく、親指と人差し指の空間的な配置から親指である事が多い。

3.4 第2試作：3本指に対応するデバイス

これまでは人差し指のみに加わる力の大きさと方向の情報を、異部位に提示する場合のマッピングについて評価した。5節リンク機構を採用したデバイスを試作し、人差し指に対応する部位として前腕前方部の背側部が適切であることを見出した。本節では、VR空間中の物体に3本の指（親指・人差し指・中指）で触れた際の力と力の向きに関する情報を、身体の異部位（前腕）に提示するデバイスを再設計、試作した

(図 3-29). 3 本指の理由としては、物体を安定的に把持し、作業するには 3 本の指が最小限の指の数であり、多くのロボティクスの分野で 3 本指が採用されているためである。

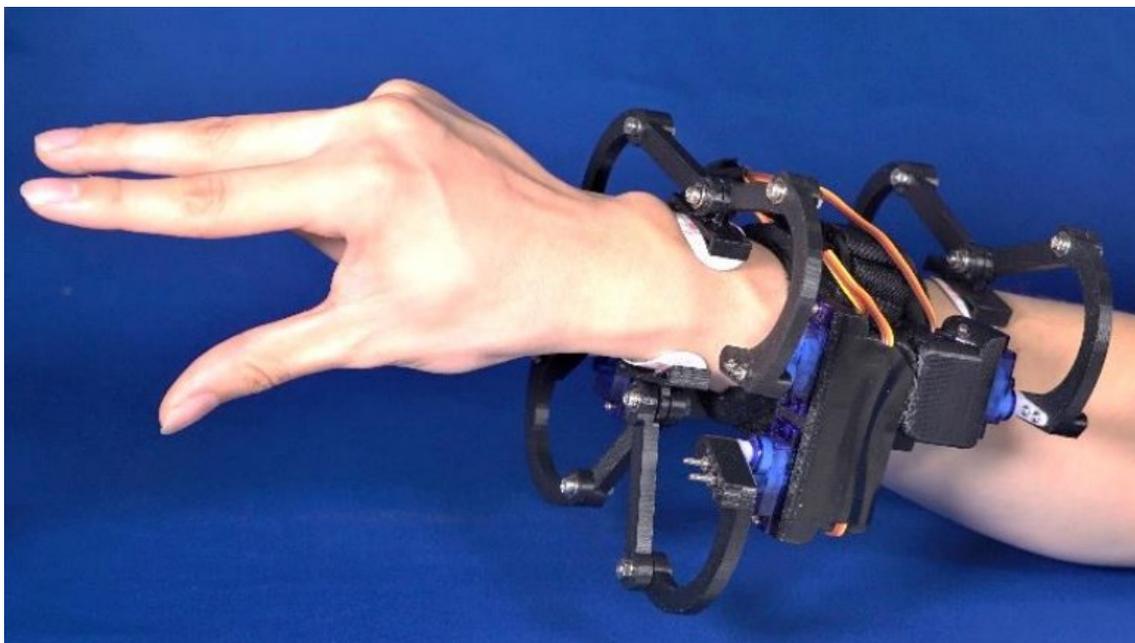


図 3-29 : 親指・人差し指・中指に対応する 5 節リンク機構を搭載した第 2 試作デバイス

本節では 3 つの実験について述べる。最初の実験では、試作したデバイスから提示される圧覚と横ずれ感の力触覚情報をすべて区別して知覚できるかを確認した。第 2、第 3 の実験では VR 物体を親指、人差し指および中指で把持する作業の動きに対応できる VR 環境を整え、指に対応する力触覚提示位置が妥当なものであるかを調べた。次に、VR 物体を把持して持ち上げる際に、指先に生じる力の大きさと力の向きを前腕に提示した。これにより、VR 空間上の体験の価値が向上するか調べた。

3.4.1 デバイスの構成

デバイスの重みは約 190g であり、3D プリンタを用いて作成した。デバイスのマジックテープに手を通すだけで脱着が可能であるため、利便性が高い。力触覚提示する部位に粘着ゲルシール(Vitrode F, 日本光電製)を張り付ける。この粘着ゲルシートに付属した突起部にデバイスを接続する事により、上下左右方向の力触覚を提示することが可能である。力触覚提示可能部位は 3 か所であり、親指、人差し指および中指の 3 本に対応できる本数である。それぞれのリンクの長さを表 3-2 に示す。

このデバイスには 5 節リンク機構が前面部の上下に 2 つ、後面部に 1 つ存在する。マジックテープの位置を考慮して RC サーボモータを前後に設置したため、前面部と後面部の力触覚提示位置は 100mm 離れている。

前節において、人差し指に対応する力触覚提示部位の候補として前腕前方部の背側部、前腕前方部の腹側部、前腕後方部の背側部、前腕後方部の腹側部の 4 箇所を選び、提示される力の違和感について比較した。その結果、人差し指では、前腕前方部の背側部を対応させた場合が最も違和感が無いとの結果を得た。この結果を踏まえ、今回のデバイスは人差し指を前腕前方部の背側部に対応させ、親指はそれに対向するように前腕前方部の腹側部に、中指は人差し指の隣に配置した。前腕部の 2 点弁別閾は 40mm とされており、今回は人差し指と中指に対応する部位をこの 2 点弁別閾よりも十分大きく 100mm 離れた。

表 3-2：複数指試作デバイスのスペック一覧

Link Length [mm]	50
Base Length [mm]	180
Vertical Force F [N]	6.0
Horizontal Force F [N]	1.2

3.5 力触覚弁別実験

試作したデバイスを装着した状態で前腕の異なる部位に力触覚提示した場所に、これらを区別して知覚できることを確認した。まず、垂直方向の力、すなわち圧覚を提示した際に、3 つの力触覚提示位置をそれぞれ区別して認識が可能か調べた。次に、水平方向の力、すなわち横ずれ感も含めて提示した際に提示部位および提示方向の異なるものを区別して認識が可能か調べた。

3.5.1 実験の条件および実験

垂直方向の力（圧覚）の力触覚の弁別実験に際しては、人差し指と中指に対応している力触覚提示部位を全て用いた（図 3-30）。また、水平方向の力も含めた弁別実験に際しては、実験時間短縮のため、特に区別が難しいと思われる前腕背側部の 2 箇所の提示に限定して行った。この 2 箇所は人差し指と中指に対応している（図 3-31）。

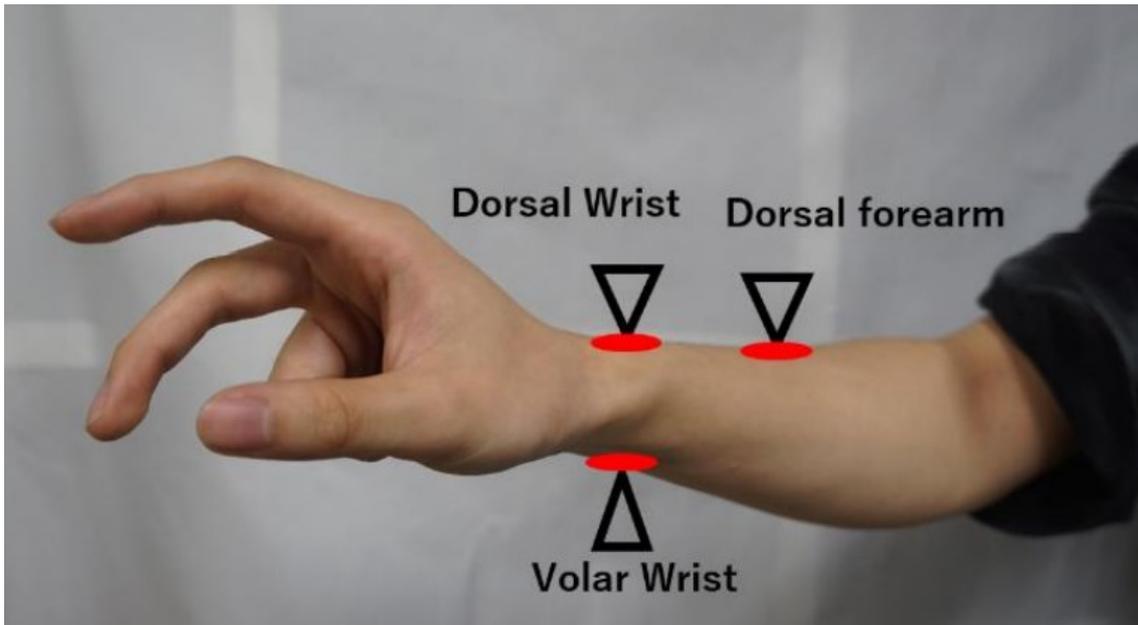


図 3-30 : 圧覚の弁別実験で使用了部位

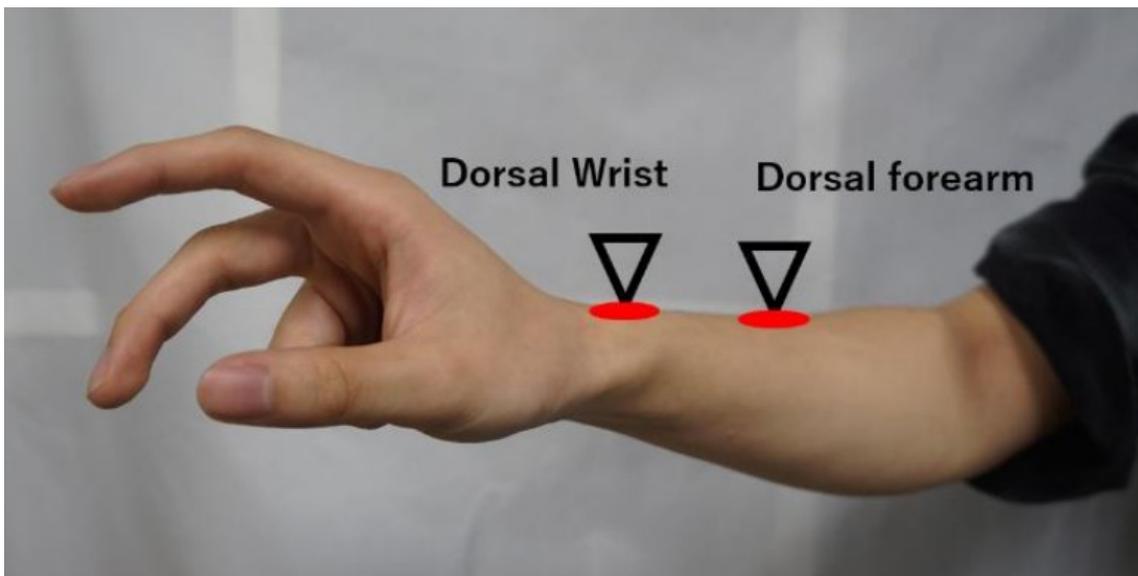


図 3-31 : 圧覚および横ずれ感の弁別実験で使用了部位

それぞれの力触覚提示部位と力触覚提示手法は、以下のとおりである。

1. 3本の指に対応した位置のうち2箇所を選び、圧覚を提示した際の弁別、すなわち、{人差し指, 中指}, {中指, 親指}, {親指, 人差し指}のそれぞれのペアを弁別できるかどうかを確認した。
2. 圧覚と横ずれ感（右方向の横ずれ・左方向の横ずれ）を人差し指, 中指の2本の指に対応した位置に提示した際の弁別、例えば {人差し指の圧覚, 中指の左方向横

ずれ} や {人差し指の左方向の横ずれ, 人差し指の右方向の横ずれ} などのペアを弁別できるかどうかを確認した。

ペア内の刺激を A,B として, 以下の手順で弁別能力を調べた。

- (1) A の刺激を 1 秒行い, 1 秒程度休む
- (2) B の刺激を 1 秒行い, 2 秒程度休む
- (3) A か B かの刺激をランダムに 1 秒行い, この刺激が先の 2 つの刺激の (1) か (2) で回答する。

条件 1 では圧覚 (垂直方向) の力のみを親指, 人差し指および中指に対応する合計 3 か所の力触覚提示部位で行うため, 組み合わせは順序を考慮しなければ 3 通りであり, 1 通りあたり 10 回をランダムな順番 (AB の順序を 5 回, BA の順序を 5 回) で行った。合計で 30 試行を行い, 1 試行ずつ回答してもらい, それぞれの組み合わせの正答率を記録した。

条件 2 では, 圧覚と横ずれ (左方向と右方向) の 3 つの力触覚情報を, 人差し指および中指の 2 本に対応する力触覚提示部位で行った。条件 1 と同様に, 組み合わせは順序を考慮しなければ 15 通りであり, 1 通りあたり 10 回をランダムな順番 (AB の順序を 5 回, BA の順序を 5 回) で行った。合計で 150 試行を行い, 1 試行ずつ回答してもらい, それぞれの組み合わせの正答率を記録した。被験者は 10 名 (男性 6 名, 女性 4 名, 21~34 歳) であった。実験ではデバイスを装着した後, アイマスクをする事で被験者の視界を遮断した。また, ヘッドホン装着させ, ホワイトノイズを聞かせることでモータの駆動音をマスクした (図 3-32)。



図 3-32：弁別実験を行う被験者の様子

3.5.2 実験の結果および考察

全ての指の組合せにおいて、圧覚を提示した場合の正答率を次の図 3-33 に示す。

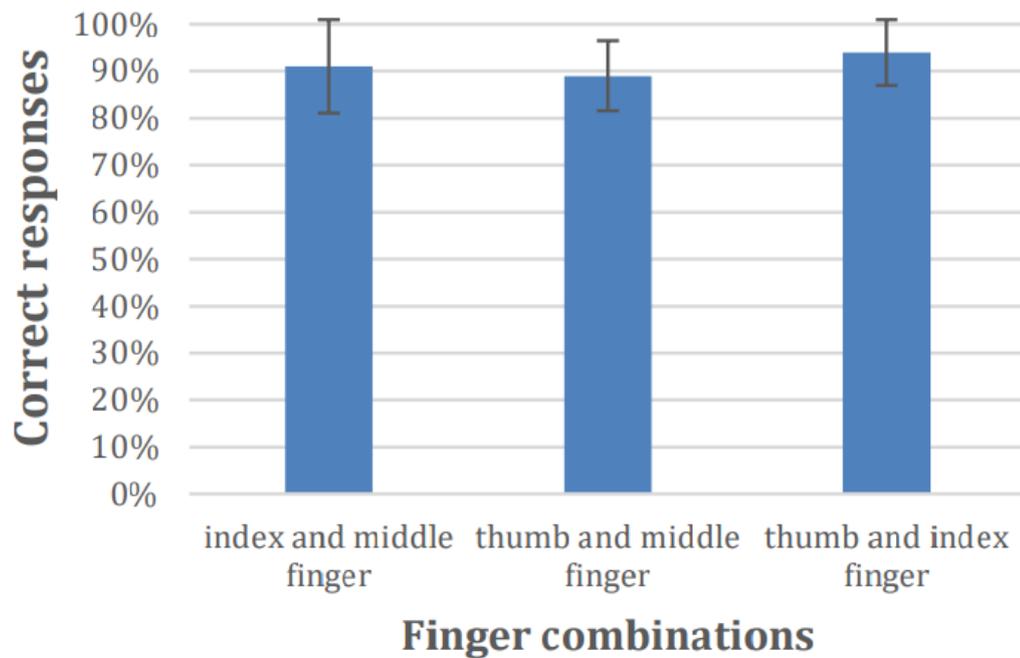


図 3-33：圧覚を全ての指の組み合わせに提示した結果

図 3-33 の結果より，全ての指の組み合わせに対し圧覚を提示した場合，89%以上の確率で，どの部位に圧覚が提示されたか識別できる事が分かった。

人差し指および中指に対応する組み合わせにおいて，圧覚および横ずれ感を提示した場合の正答率を次の表 3-3 に示す。灰色の枠が同じ部位に異なる力触覚情報を提示した場合であり，白と黄色の枠が異なる部位に力触覚情報を提示した場合の結果である。

表 3-3：圧覚と横ずれを 2 本の指の組み合わせに提示した結果

	人差し指 (左方向)	人差し指 (右方向)	中指 (圧覚)	中指 (左方向)	中指 (右方向)
人差し指 (圧覚)	95%±4.2%	95%±6.1%	98%±4.5%	98%±4.5%	99%±2.1%
人差し指 (左方向)		88%±6.9%	94%±8.6%	94%±6.6%	95%±6.9%
人差し指 (右方向)			96%±5.6%	97%±4.7%	95%±5.3%
中指 (圧覚)				97%±3.5%	95%±5.5%
中指 (左方向)					96%±4.7%

表 3-3 より，全ての部位における圧覚と横ずれ感の識別率は，88%以上であった。人差し指に対応する右方向のせん断と，人差し指に対応する左方向のせん断が最も識別率が低かった（表 3-3，黄枠）。また，異なる力触覚提示部位であれば，93%以上の正答率を記録した。よって，全ての異なる力触覚提示位置と力触覚提示情報において，高い確率で識別できる事が分かった。

条件 1 と条件 2，どちらの条件であっても，非常に高い識別率を得る事ができた。このデバイスが提示している力触覚提示部位において，全ての力触覚情報を識別できる事を示唆している。

3.6 3 本指での把持におけるデバイスの装着位置の検討

3.5 の実験の際には，人差し指，中指，親指に対応する力触覚提示部位として，前腕前方部の背側 2 か所，腹側 1 か所を対応させた。この配置は，人差し指に対応させる

提示部位が前腕前方部の背側部であるともっとも違和感が少ないとの結果によるものであった。しかしこれまで複数指に対応した状況での配置に関する検討は行っていなかった。

物体を把持する時に、人差し指と親指は力が対抗する状況にある。この位置関係と、触覚提示位置の空間的な配置を等しくするため、人差し指の裏に位置する前腕背側部が最も違和感無く力触覚が提示できると考えた。そこで、ここでは配置に関する簡便な比較として、デバイスを逆に装着した場合（人差し指、中指に対する部位が前腕腹側となる）を用意し、圧覚を提示した場合にどちらの配置がより違和感が少ないかを評価した（図 3-34）。



a



b

図 3-34 : a) 力触覚提示部位が前腕の背側部に 2 ヶ所、腹側部に 1 か所（中指の力触覚提示部位が前腕の背後方部）、b) 力触覚提示部位が背側部に 1 か所、腹側部に 2 ヶ所（中指の力触覚提示部位が前腕の腹後方部）

3.6.1 実験の条件および環境

力触覚提示位置は以下の 2 条件を用意した。

1. 力触覚提示位置が前腕背側に 2 か所，腹側に 1 か所
2. 力触覚提示位置が前腕背側に 1 か所，腹側に 2 か所

実験では，デバイスから圧覚（垂直方向の力）のみを提示した．視覚提示は，HMD として Oculus Rift を使用した．また，LeapMotion を用いて被験者の指をトラッキングし，Unity を用いて提示映像を描画した．

VR 空間中の視覚映像には机と立方体が表示されており，被験者は親指を下から，人差し指と中指を立方体の上から掴んでもらった．指と VR 物体に接触すると，皮膚に対して 6.0N の垂直方向の力が提示される．被験者は石を掴み，離す動作を 5 回行った．体験では，違和感が無いを 7，違和感があるを 1 とした 7 段階のリッカートスケールで回答させた（図 3-35）．被験者は 8 名（男性 4 名，女性 4 名，21~24 歳）であった．



図 3-35：3 本指に対応する試作デバイスを用いて VR 物体を把持する被験者の様子

3.6.2 実験結果および考察

違和感に対する回答結果を図 3-36 に示す．ノンパラメトリック分析のフリードマン検定を行ったところ，条件の間に有意差が見られた($p < 0.05$)．この結果から少なくとも今回比較した 2 つの条件間では，人差し指と中指を前腕の背側部に，親指を前腕の腹側部に対応させた場合のほうがその逆の場合に比べて違和感が少ないことがわかった．

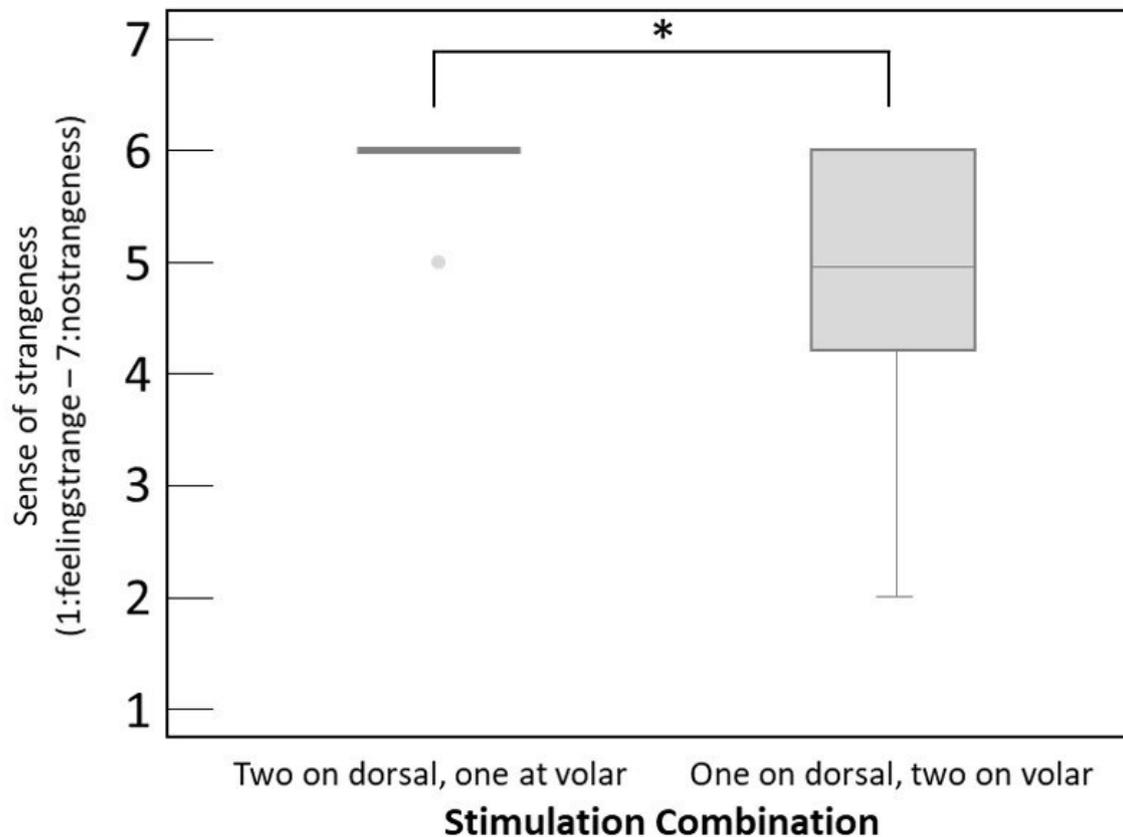


図 3-36 : 圧覚を提示した時の違和感

VR空間において物体を把持する時、圧覚を提示する際は、人差し指と中指に対応した部位として前腕の背側部に2か所、親指に対応した部位として前腕の腹側部に提示する方が、その逆よりも違和感が少ないという結果になった。これは前節での人差し指1本に対して行った実験結果と符合する。例えば中指の場合、物体から指に加わる力が上向きであり、前腕で皮膚を圧迫する力の向きが下向きであることを考えると、人体に加わる力の向きとしては逆である。しかし指が対象にかける力の向きとデバイスから提示される力の向きが同じであることから、デバイスの方に自己投射した（デバイスを自己の指と解釈した）可能性が考えられる。

3.7 複数指でVR物体を把持した際の違和感の調査

本実験の目的は、腕への力触覚転移を実装する時に、転移する指の本数で違和感や体験のリズムがどのように変化するか調査する事である。例えば、指の本数を変化させても、体験の評価に影響がない場合では、指の本数を減らしてデバイスを設計した方が、コストの削減やデバイスの重量削減に繋がる。本実験ではデバイスを装着し、

親指と人差し指で VR 物体を把持した際のリアリズムについて調査した。前節までは主にマッピングについての評価を行っており、単純な動作を伴う力触覚インタラクションの中で最も違和感無く力触覚を転移可能な部位を調査した。本項では、垂直および水平方向の力の提示が必要な力触覚インタラクションを設定する。VR 物体を把持し持ち上げる動作の中で、それぞれの力を独立して提示した場合と同時に提示した場合で、体験のリアリズムが変化するか調べた。

3.3, 3.4 の結果より、人差し指に対応する力触覚提示部位は前腕前方部の背側部である事がわかった。また、試作機を用いた場合の腕へのマッピング部位として、親指が腹側部、中指が前腕後方を刺激する事が最も違和感が少なる事が分かった。そのため、本実験では親指は前腕前方部に対応させ、中指は前腕後方部に対応させた状態で実験を行った。

本項では2つの実験を行った。最初に、2本指に対応するデバイスを用いて、VR 物体を把持し、持ち上げた際の違和感について評価した。力触覚提示がされない条件を基準刺激とし、試作機を用いた圧覚提示と、圧覚および横ずれ感提示、そして振動子を用いた条件でそれぞれ比較した。次に、3本指に対応するデバイスを用いて、VR 物体を把持し、持ち上げた際の違和感について評価した。

3.7.1 2本指を用いた違和感の調査

2本指に対応する試作機を用いて、VR 物体を把持した際に人差し指と親指が知覚する力触覚情報（垂直方向および水平方向の力）を前腕前方部に提示した。力触覚情報を提示しない場合と、振動子で振動触覚情報を提示する場合で、リアリズムが変化するか検証した。今回使用した振動子は、150Hz で振動するリニアアクチュエータ（LRA、日本電産コパル株式会社、LD 14-002）である。

視覚提示は、HMD として Oculus Rift を使用し、LeapMotion を用いて被験者の指をトラッキングして Unity を用いて提示映像を描画した。

前腕への力触覚提示手法は以下 5 条件を用意した。全ての条件において被験者には試作したデバイスを装着した状態で行った。

1. 力触覚提示無し
2. 物体に接触した時のみ振動子を駆動する
3. 物体を把持している時は常に振動子を駆動する
4. 前腕前方部の背側部、腹側部および前腕後方部の全ての力触覚提示部位に圧覚を提示する
5. 前腕前方部の背側部、腹側部および前腕後方部の全ての力触覚提示部位に圧覚と、

物体を把持した際に指先に生じる横ずれ感を提示する

条件1は、力触覚提示を伴わない。条件2と条件3では振動子を用いて振動触覚を提示した。条件2では指が対象物に触れた時に0.5秒間だけ振動子を駆動した。力触覚的な手掛かりとして、物体に触れた瞬間に生じる刺激を振動等によって提示する手法が開発されており、条件2ではこれを応用した[92]。条件3では、対象物に触れている際は常に駆動した。VR物体を把持する力を、振動触覚として記号的に代行して提示を行った。条件4では、VR物体を把持する際に、前腕の背側部、腹側部の両側から垂直方向の力（圧覚）を加えた。条件5では、物体を把持する際に、垂直方向および水平方向の両方の力を提示した（図3-37）。

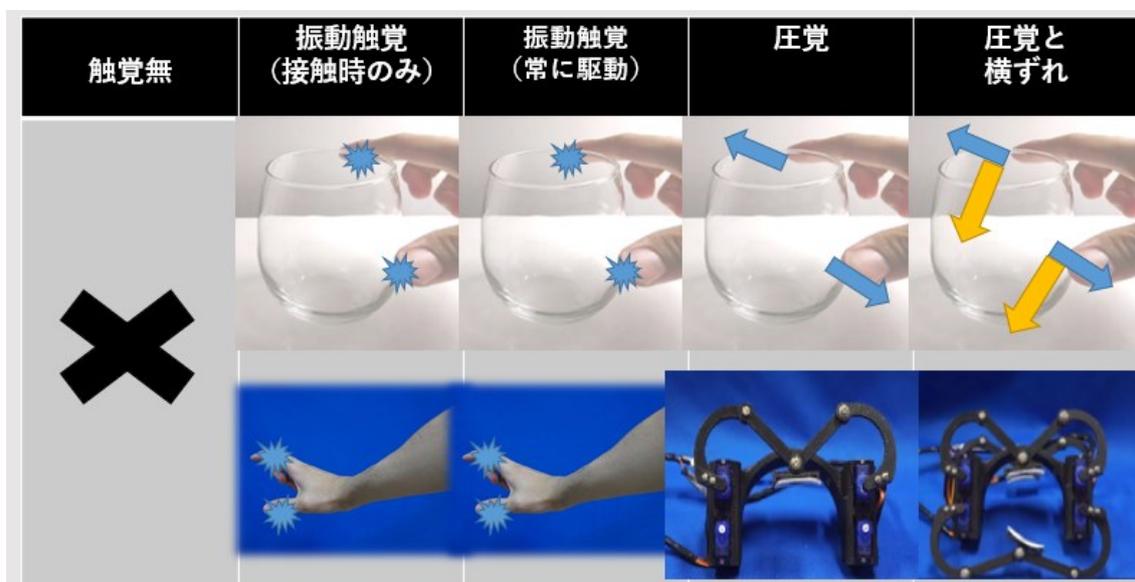


図 3-37：力触覚刺激の条件，左から力触覚提示無，VR 物体と把持時にのみ振動を提示，VR 物体を把持時に常に振動を提示，VR 物体を把持時に圧覚を提示，VR 物体を把持時に圧覚および横ずれを提示

実験では力触覚が提示されない条件を標準刺激とし、5つの条件をそれぞれランダムな順序で提示した。被験者には、主観的なリアリズムを7段階のリッカートスケールで回答してもらった。(7:リアリズムが標準刺激に比べてかなり大きい、1:リアリズムが標準刺激に比べてかなり小さい)被験者は21歳から24歳の女性4名、男性7名の合計11名であった。VR映像には、机と鉄製のコップが表示されていた(図3-38)。被験者には人差し指と親指でコップを把持し、持ち上げて机に戻す動作を5回行ってもらった。まず、練習として力触覚を提示せずに5回動作を行ってもらった。その後、5つの条件がランダムな順序で提示された。

条件 4 の垂直方向のみの力提示では，前腕に対し 6.0N の垂直方向の力が提示された．条件 5 の垂直および水平方向の力提示では，まず物体を把持した際に 6.0N の垂直方向の力が提示された．VR 物体を持ち上げると同時に，垂直方向および水平方向の力提示を行った．垂直方向には 4N，水平方向には 1.2N の力を提示し，条件 4 および条件 5 で提示される力はリニアでは無く一定であった．



図 3-38 : HMD に表示されている映像

3.7.2 実験結果および考察

図 3-39 に実験の結果を示す．ノンパラメトリック分散分析（フリードマン法）の結果，条件 1 と 4（力触覚提示無の条件と，垂直方向の力提示の条件， $p < 0.005$ ），条件 1 と 5（力触覚提示無の条件と，垂直および水平方向の力提示の条件， $p < 0.005$ ），条件 2 と 4（接触の瞬間のみに振動触覚が提示される条件と，垂直方向の力提示の条件， $p < 0.05$ ），条件 2 と 5（接触の瞬間のみに振動触覚が提示される条件と，垂直および水平方向の力提示の条件， $p < 0.05$ ）の間に有意な差がみられた．

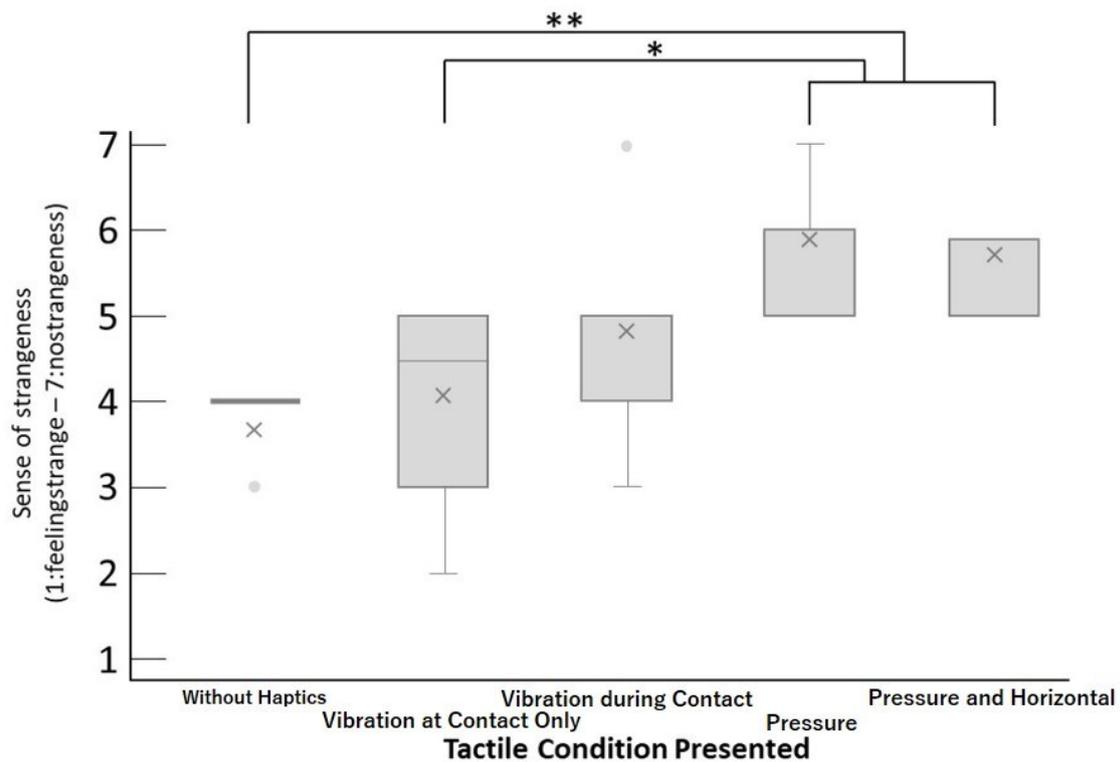


図 3-39 : 2 本指を力触覚転移させた時の違和感の調査

振動提示の条件と、垂直および水平方向の力を提示する条件と比較すると、作成したデバイスで力触覚を提示した場合、リアリズムが大きく向上した。被験者からは、「指先に近い感触だった」「指先でなくても、物を触った、掴んだという認知だけでなく、物を掴んだという感覚がはっきりと感じられた」というコメントが寄せられた。これらのコメントからも、前腕に指先に提示される力を提示することで、体験のリアリズムを十分に高めることが可能である事が言える。

垂直方向の力のみを提示した場合（条件 4）と、垂直および水平方向の力を提示した場合（条件 5）では、有意な差は無かった。条件 4 の中央値が 6 だったことを考えると、今回はスコアが飽和してしまった可能性がある。また、本実験ではサーボモータの制御がリニアでは無く、さらに垂直方向および水平方向の力の比率が腕の太さに依存するため、参加者によっては水平方向の力が不適切に強く、あるいは弱かった可能性がある。さらに、条件 5 では瞬間的な力が 2 回感じられ、やや違和感があったというコメントも得られた。試作機を用いた力触覚提示の場合は、振動触覚を提示する条件と比較して、リアリズムの評価が有意に高い結果となったものの、力提示アルゴリズムが適切でなかった可能性がある。これは、現在使用しているサーボモータの特性上、力をスムーズに変化させることが難しいためと考えられ、よりリニアな力の変換

が可能な DC モータを用いて改善する必要があると考える。

一方で、水平方向の力提示の時は、垂直方向のみの力提示の時と比較すると、VR 物体に重さを感じたというコメントがあった。このコメントは、手首に力の方向を提示することに意味があることを示唆している。

3.7.3 3本指を用いた違和感の調査

本実験では、前節で行った2本指でのリアリズムの評価を拡大し、3本指で行った。指の本数が増える事で、リアリズムの評価に影響が出るか調べた。実験2と同様に、VR物体を把持し、持ち上げた場合に、垂直方向および水平方向の力を提示する。

これまでの実験(3.7.2 まで)では、人差し指と親指に対応する部位の検討のみの実験を行っている。今回の実験では、VR物体を把持した時の、親指、人差し指および中指が知覚する力触覚情報(垂直および水平方向の力)を前腕部に提示した。この場合のリアリズムが、触覚提示が無い場合と、振動触覚を行う場合でどのように変化するか調べる。本実験で用いた振動子は、150Hzで振動するリニアアクチュエータ(日本コパル株式会社, LD 14-002)である。指に直接振動子を張り付けて実験を行った。

視覚提示は、HMDとしてOculus Riftを同様に使用し、LeapMotionを用いて被験者の指をトラッキングしてUnityを用いて提示映像を描画した。

手首への力触覚提示手法は以下4条件を用意した。全ての条件において被験者には試作したデバイスを装着した状態で行った。

1. 力触覚提示無し
2. 物体を把持している時は常に振動子を駆動する
3. 前腕の全ての力触覚提示部位に圧覚を提示する
4. 前腕の全ての触覚提示部位に圧覚と、物体を把持した時に指先に生じる横ずれ感を提示する

条件1は、力触覚提示を行わなかった。条件2ではVR物体を把持している時は常に振動子を用いて振動触覚を提示した。3.7.1の実験では振動提示の条件が2種類であったが、接触の瞬間に振動を提示する条件は試作機による力触覚提示と比較し有意に低い結果が観察された事から、本実験では1種類に減らした。条件3では、VR物体を把持する際に、前腕の背側部、腹側部の両側から垂直方向の力(圧覚)を加えた。条件4では、物体を把持する際に、垂直方向および水平方向の両方の力を提示した。

実験では力触覚が提示されない条件を標準刺激とし、4つの条件をそれぞれランダムな順序で提示した。被験者には、主観的なリアリズムを7段階のリッカートスケールで回答してもらう。(7:リアリズムが標準刺激に比べてかなり大きい, 1:リアリズム

が標準刺激に比べてかなり小さい) 被験者は 21 歳から 24 歳の女性 4 名, 男性 7 名の合計 11 名であった。VR 映像には, 机と鉄製のコップが表示されていた。被験者には人差し指と親指でコップを把持し, 持ち上げて机に戻す動作を 5 回行ってもらった。まず, 練習として力触覚を提示せずに 5 回動作を行ってもらった。その後, 4 つの条件がランダムな順序で提示された。

3.7.4 実験の結果および考察

図 3-40 に実験の結果を示す。

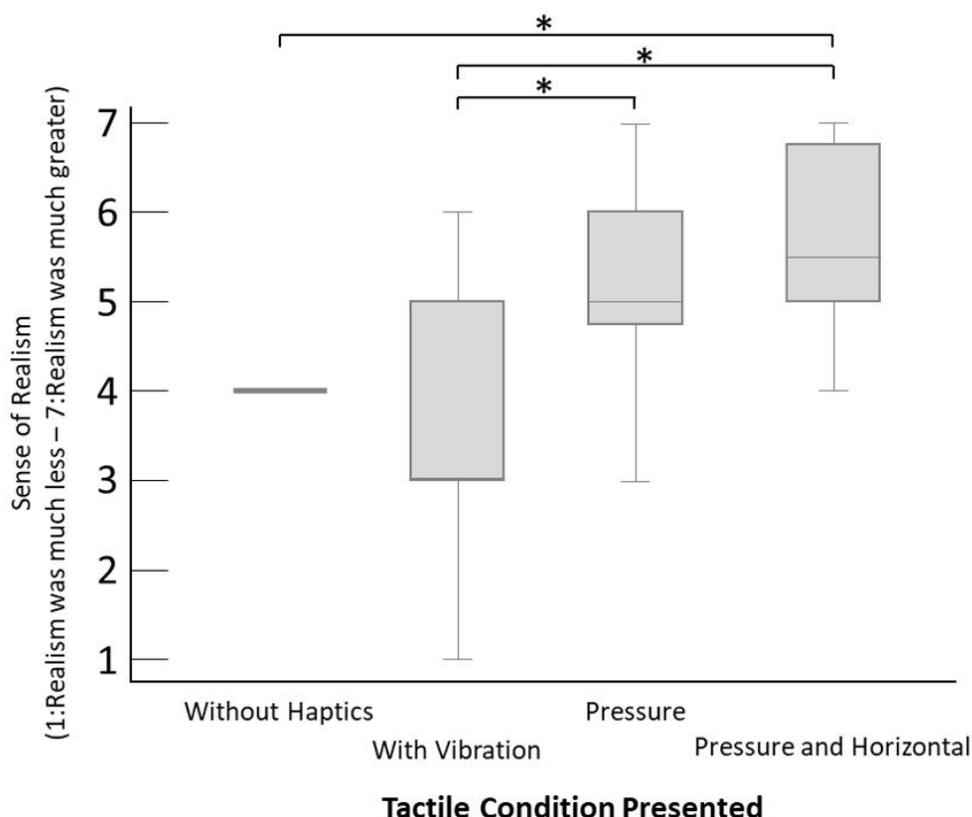


図 3-40 : 2 本指を力触覚転移させた時の違和感の調査

フリードマンのノンパラメトリック検定では, 力触覚提示が行われない条件と, 垂直と水平方向の力の提示を組み合わせさせた条件との間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。さらに, 振動触覚を行う条件と垂直方向の力提示を行う条件, 垂直と水平方向の力を組み合わせさせた条件間でも, 有意な差が見られた ($p < 0.05$)。以上より, 振動触覚のみを行う条件と比較すると, 試作機を用いて力の大きさおよび方向を提示する事はリアリズムの向上に貢献する事が改めて確認できた。

有意な差は確認できなかったが, 垂直および水平方向の力を組み合わせさせた条件では,

垂直方向のみの条件よりもスコアが高くなる傾向があった。前腕部への水平方向の力提示により、重さをレンダリングできるという観測結果がいくつかあり [52]、今回の研究では、このレンダリング手法により、VR 環境でのリアリズムが向上することが示された。

3.7.5 複数指で把持した際の違和感の評価とまとめ

3.7.1 と 3.7.3 での実験の目的は、腕への力触覚転移を実装する時に、転移する指の本数で違和感や体験のリアリズムが変化するか調査する事であった。異部位力触覚提示を行う指の本数を、2 本と 3 本でそれぞれ体験のリアリズムについて調査した。2 本指の提示では、試作機を用いた圧覚および横ずれ感提示が、力触覚が無い条件と、振動子による振動触覚提示よりリアリズムを高く感じる結果であった。同様に、3 本指の提示では力触覚提示が無い条件と、振動子による振動触覚提示よりリアリズムが高くなった。実験の条件が異なるため、直接的な統計的处理を行ってないものの、指の本数 2 本、または 3 本の場合でも、試作機による異部位力触覚提示が最もリアリズムを高く感じる事が分かった。

これまで、最終的に 3 本の指に対応するデバイスの開発を目指し、試作を行ってきた。理由として、実作業でのロボットハンドを用いる場面では、3 本指である事が多いためである。しかしながら、本実験での結果から、2 本指であっても、3 本指と同様に高いリアリズムの評価を獲得できる事が分かった。指に対応する 5 節リンク機構を 1 つ減らす事は、アクチュエータの数が減る事となり、結果としてデバイスの重量も減る。さらにデバイスの利便性も向上する。そのため、第 4 章で述べる力触覚デバイスの高品質化では、2 本指に対応する 5 節リンク機構を搭載したデバイスの試作を行う事にする。

試作機の特徴は、垂直と水平方向の力が提示できる点である。VR 物体を把持して持ち上げる際のリアリズムの評価では、水平方向の力提示のみの条件と、水平および垂直方向の力提示を組み合わせ提示した条件の間で有意な差は見られなかった。つまり、水平方向（皮膚のせん断方向）の力提示が体験のリアリズムに寄与するという事を、本実験では見出せなかった。しかしながら、2 本指に対応する実験で垂直および水平方向の力を組み合わせた条件では、垂直方向のみの条件よりもスコアが高くなる傾向があった。前述のとおり、デバイスの利便性を考慮しつつ、体験のリアリズムを担保できる 2 本指の試作機の高品質化を進めるにあたり、力提示には垂直および水平方向の 2 自由度が提示可能な 5 節のリンク機構を搭載した試作機の設計を引き続き行う事にする。

3.8 3章のまとめ

第3章では、指に加わる「分布的触覚を含まない力触覚」に着目した力触覚転移システムのアプローチについて議論した。これまでのウェアラブル力触覚提示デバイスについて総括した後に、感覚義手の研究を参考に、前腕に力覚を提示可能なシステムの構成について考え、5節のリンク機構を用いて提示する事を提案した。

試作した力触覚デバイスを用いて、1本指と2本指、および3本指に対応する試作機を設計した。それぞれ人差し指、人差し指と親指、人差し指と親指と中指に対応する試作機であり、前腕への各指の提示位置について議論した。それぞれの試作機で、力の大きさと向きを前腕に提示し、提示された力が正しく知覚されている事を確認し、実際にVR物体を把持して持ち上げる動作でリアリズムの評価を行った。結果として、力触覚提示が無い条件と、振動子による振動触覚提示の条件より、試作機を用いた垂直および水平方向の力提示を行う事で、体験のリアリズムが高く評価される事を確認した。

本章で試作したデバイスは、前腕への力提示をRCサーボモータの位置制御で行っており、力の算出は行っていない。VR物体に指が触れると同時に、RCサーボモータのパルス幅を変化させ、RCサーボモータから提示される力が一定になる様に制御している。つまり、力の大きさはリニアに変化させていない。位置制御で腕に対して提示する力を算出するには、試作機による力の出力とサーボモータのホーンの回転位置の関係性を明らかにする必要がある。また、位置制御で水平方向の力提示を算出するには、ユーザの皮膚インピーダンスも考慮する必要がある。正確な力提示を実現するための制御システム構築は手間になり困難である。また、実験3.4.3と3.4.4のVR物体を把持して持ち上げる際のリアリズムの評価では、水平方向の力提示のみの条件と、水平および垂直方向の力提示を組み合わせ提示した条件の間で有意な差は見られず、水平方向（皮膚のせん断方向）の力提示が体験のリアリズムに寄与するという事を、本実験では見出せなかった。

そこで、第4章では試作機のアクチュエータをDCモータに変更し、出力できる力の高品質化を狙う。高品質化とは力の算出を、逆運動学を用いて解き、2節のモータの出力トルクの比（力の比）を用いてデバイスの制御を行うものである。RCサーボモータを用いた位置制御と比較して、腕に提示する力をモータのトルク比だけで簡単に算出する事が出来る。また、提示される力をリニアに出力する事で、VR物体との間に発生している力と把持した際の力を正確に再現する事が可能になる。本章での実験では、水平方向の力提示が体験のリアリズムに寄与する事が見いだせず、原因はRCサーボモータを用いたON/OFF制御によるものだと考察した。デバイスの高品質化は、

水平方向の力を正確に算出・提示が可能となり，作業を行う際の効率や，リアリズムの評価に大きく影響すると思われる．そこで，第4章では DC モータを用いて，新たに設計するデバイスを用いたハードウェア評価とユーザ評価を行う．

第4章

前腕への力触覚転移： 力触覚デバイスの高品質化

前章までの提案では、RC サーボモータで5節のリンク機構を駆動するデバイスを試作し、人差し指に加わる力の大きさと方向を、前腕に提示する事を試みた。ただし、RC サーボモータによる駆動のため正確な力の提示は行われていなかった。そこで、本章では DC モータを用いた正確な力提示を行うシステムを考案し、力の向きと大きさを連続的に提示できるデバイスとシステムを構築した。5節リンク機構の運動学から、下方向および左右方向に提示可能な力の大きさを求め、実機を用いて計測を行い、前腕に十分な力触覚が提示されている事を確認した。また、試作機を用いて、実際に VR 物体を把持して作業する際の作業効率の変化と、体験の違和感の変化について調査した。

4.1 DC モータを用いた力触覚デバイス

本デバイスは、第3章で用いたデバイスを改良し、2節のモータをDCモータに置き換え、小型化を行ったものである（図4-1）。デバイスの重量は250gであり、3Dプリンタを用いて作成した。デバイスは前腕を通すだけで脱着が可能であり、側面のベルトを通すだけで脱着が可能である。力触覚提示する部位には同様に、粘着ゲルシール（Vitrode F、日本光電製）を張り付ける。この粘着ゲルシールに付属した突起物にデバイスを接続する事により、上下左右方向の力触覚を提示する事が可能である。力触覚提示可能部位は2ヶ所である。本論文ではこれまでに、VR物体に触れる際に人差し指に対応する部位として手首の背側が、親指に対応する部位として前腕腹側部が適切である事を見出した。また、2本指にと3本指に対応する試作機をそれぞれ用いてVR物体を把持した際のリアリズムについて評価した。この時、いずれの試作機の場合でも、体験のリアリズムは十分に高く、評価はほぼ同じである事を見出した。指の本数に応じて使用するモータが2個ずつ増える事を鑑みると、力触覚提示部位に対応する指の本数は少ない方がデバイスの重量と装着負荷が減る。2本指と3本指で体験のリアリズムに変化が無かったため、本章では2本指に対応した試作機を新しく設計した。

2ヶ所の力触覚提示可能部位はそれぞれの指の動きと連動し、独立して駆動させる事が可能である。

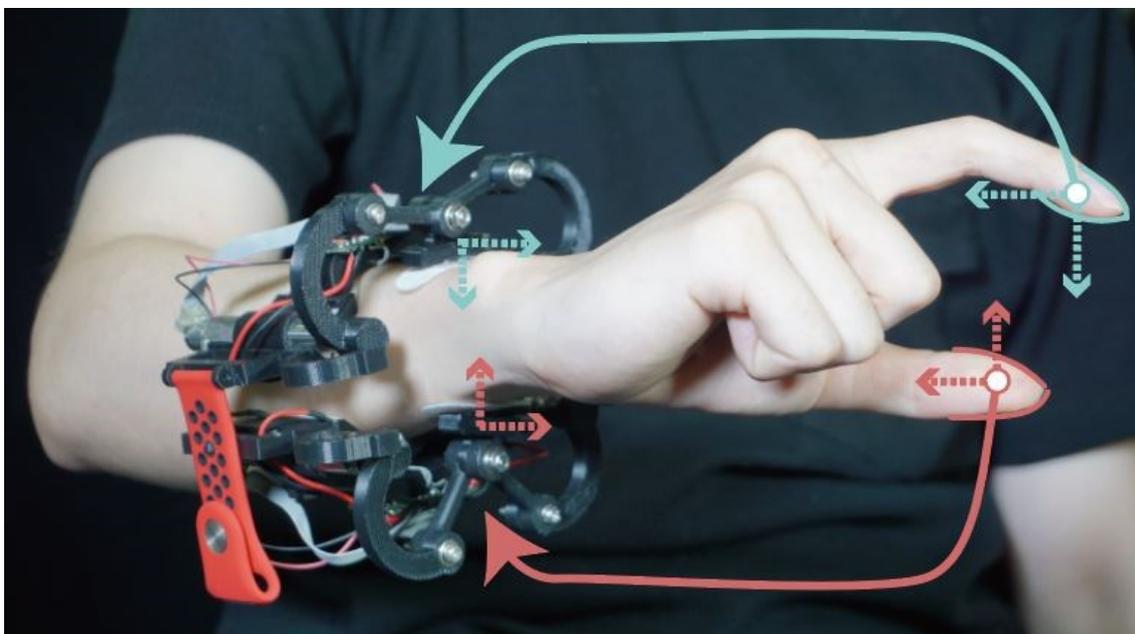


図 4-1 : DC モータを用いた力触覚デバイス

5 節リンク機構は 5 節のリンクが平面の閉ループを成しており、そのうちの 2 節を駆動する事で平面 2 自由度を実現する。本デバイスは回転型の 5 節リンク機構を採用しており、2 節の DC モータ(Maxon Motor)を同じ方向に駆動する事で皮膚に対して横ずれ感を、反対方向に駆動する事で皮膚に圧覚を提示可能である。本デバイスで使用したリンクの長さおよびモータのスペックを表 4-1 に示す。

表 4-1 : DC モータを用いた力触覚デバイスのスペック

Motor	Maxon DCX 12L
Gear head	GPX 12HP 35:1
Link length (L_1, L_2, L_3, L_4) [mm]	60, 35, 35, 35
Device Weight [g]	250
Torque (with gear) [Nm]	0.12

4.2 逆運動学を用いた力の算出

第 3 章では、5 節リンク機構の駆動系に RC サーボモータを用いていた。RC サーボモータは、回転角度にパルス幅を指定する事で駆動する。位置の制御を行い力提示を

行っていたため、正確な力の算出は行われていなかった。新しい試作機では DC モータを使用しており、2つの DC モータの出力するトルクの比（力の比）で、力の提示を行う事が可能である。本項では、逆運動学を用いて、提示される力の算出を行い、計測システムを構築して、実際に提示される力を計測した。

新しい試作機では、第3章で用いていた試作機と同様に、M 字型の5節のリンク機構を搭載している。5節リンク機構は5節のリンクが平面の閉ループを成しており、そのうちの2節を駆動することで平面2自由度を実現する。本デバイスは回転型の5節リンク機構を採用しており、2節のモータを同じ方向に駆動する事で皮膚に対して横ずれ感を、反対方向に駆動する事で皮膚に圧覚を提示可能である。それぞれのリンクに作用している力を次の図4-2に示す。（なお、重力や慣性力を無視する。）

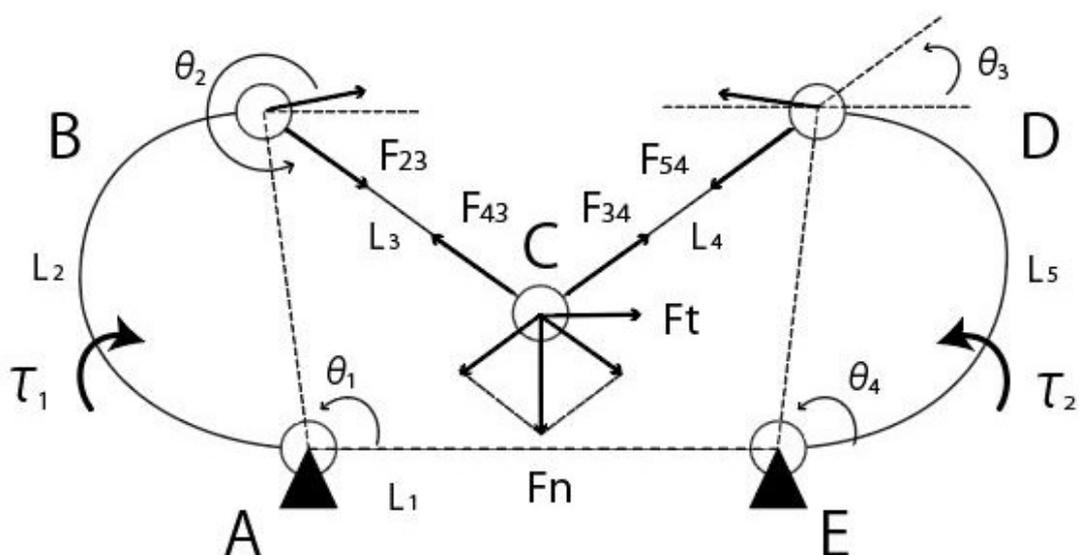


図 4-2：リンクに作用している力

リンク③ (L3) は B と C の接点より 2 つの対象の力 (\$F_{23}\$ と \$F_{43}\$) が加わっており、リンク④ (L4) は C と D の接点に同様に 2 つの対象の力 (\$F_{34}\$, \$F_{54}\$) が加わっている。この事から、\$F_t\$ (垂直方向の力)、\$F_n\$ (水平方向の力) は下記の式から導ける。t はトルクで、l はそれぞれのリンクの長さを表している。

$$\begin{aligned}
 F_{23} = -F_{43} &= F_1 \cos(\alpha) = \frac{t_1}{l_2} \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_2 + \theta_1\right) \\
 &= \frac{t_1}{l_2} \sin(\theta_1 - \theta_2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
F_{54} = -F_{34} = F_2 \cos(\beta) &= \frac{t_2}{l_5} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_3 - \theta_4\right) \\
&= \frac{t_2}{l_5} \sin(\theta_4 - \theta_3)
\end{aligned} \tag{3}$$

$$F_t = F_{23} \cos(\theta_2) - F_{54} \cos(\theta_3) \tag{4}$$

$$F_n = -F_{23} \sin(\theta_2) + F_{54} \sin(\theta_3) \tag{5}$$

次に、44 と 45 の方程式を行列で書き記す。

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_4 - \theta_3) \cos(\theta_3) \\ -\sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_2) & \sin(\theta_4 - \theta_3) \sin(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ l_2 \\ t_2 \\ l_5 \end{bmatrix} \tag{6}$$

以上より、手首に提示される力は下記の式から導く事ができる。

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_n^2} \tag{7}$$

ここで、デバイスが出力する鉛直方向の最大値を求めると、約 6.0N となる。

4.3 提示される力の測定

デバイスが出力する水平方向と垂直方向の力の計測を行った。計測には、2つの3軸力センサ (DSA-03A, テック技版) を用いた。力センサの上にアクリル板が取り付けられており、X 軸方向 (水平方向) の力を測定できる様に、力センサの円柱型検知部が穴に挿入されている。デバイスの皮膚への接触部を、アクリル板の上に乗せ、十分な錘をデバイス上に設置した (図 4-3)。まず、上下の垂直方向の力 (圧覚) では、2節のモータを逆方向に駆動し、PWM を 0% から 100% (9V) まで 10% 毎に駆動して記録した。それぞれ 5 秒間観測し、データを記録した。

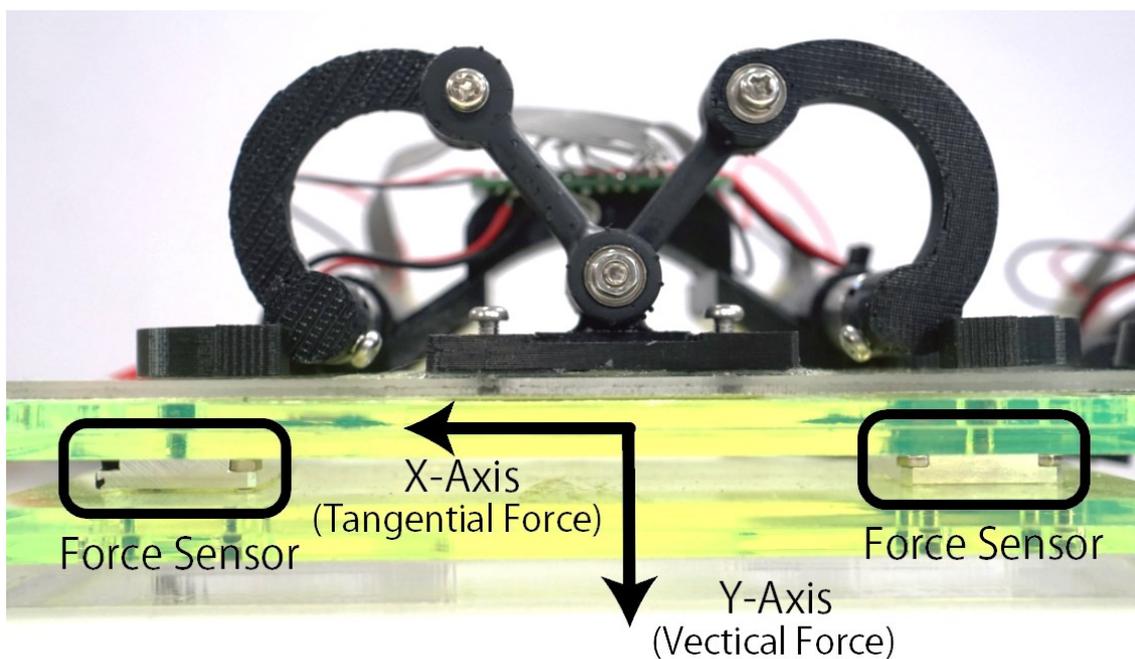


図 4-3 : 力の測定システム

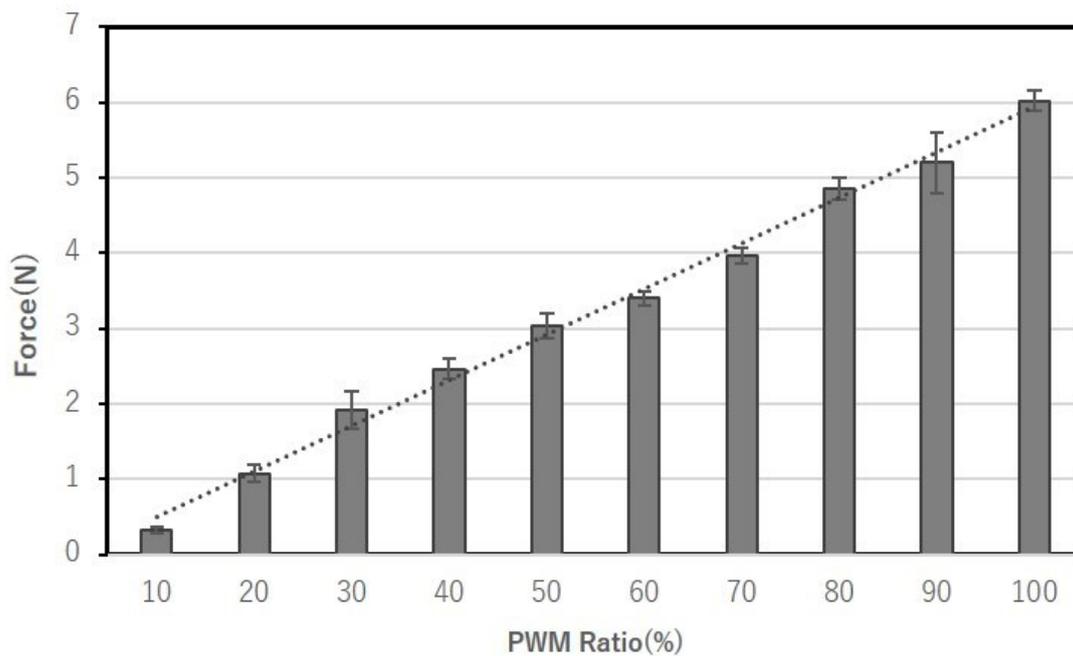


図 4-4 : 垂直方向の出力測定結果

図 4-4 から、垂直方向の出力は電圧値の増加に合わせてほぼ線形に変化している事が分かり、最大で約 6.1N 出力され、方程式から導いた値とほぼ一致した。

M 字型の 5 節リンク機構を用いた提案装置では、力触覚提示位置（図 4-2、リンク節

C) の初期位置によって出力可能な最大の力が変化する。本実験で計測した力触覚提示部位の初期位置は、2 節のモータの直線上にあり、本章で行う実験でも、同様の条件である。左右のモータを同じ方向と、異なる方向にそれぞれ回転させた時に出力される力の測定したところ、デバイスが出力できるせん断方向（横ずれ）の力は最大約 3.2N である事が分かり、垂直方向およびせん断方向の力を最大出力で提示した時は、垂直方向が約 2.6N、せん断方向が約 1.8N である事が分かった。

本実験では、2 節のモータの直線上に力触覚提示部位が位置する様に設定した。本デバイスを前腕に装着する時も、力触覚提示部位が同様に 2 節のモータの直線状に位置する様に設定した。この時、リンクの角度 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) は常に一定になる。これで、水平方向および垂直方向の力は、(6)の式より τ_1 と τ_2 を求める事で提示する力を算出できる。

本実験では、リンク機構が剛体と接続されている状態であり、モータの軸がほぼ回転していない。モータの軸が回転していない場合、電流と電圧が比例する。電流とトルクは比例関係にあるため、モータの軸が回転していない場合はトルクと電圧も比例関係にある。本実験で使用した DC モータは、9V の入力電圧に対し最大負荷時（モータの軸が回転していない）の電流値は 0.44A となり、出力トルクは 0.11Nm になる。(6)で算出したトルク τ [Nm] は、入力電圧 v [V] と比例関係にあるため、下記の式(8)を用いてトルクに対応する入力電圧を算出可能である。ただし、前腕への力触覚提示の場合では、リンク機構が上下左右に駆動するため、モータの軸は皮膚のせん断移動量分回転する。また、ユーザによる皮膚のインピーダンスも異なるため、提示される力は算出した値と完全に一致しない場合がある。

$$v = \frac{1}{0.0122} \times \tau \quad (8)$$

4.4 左右の前腕および足首における検討

これまでの実験では、感覚義手の研究結果をベースに指先の力触覚を前腕にマッピングしてきた。前腕への提示を前提に実験を設定したが、本提案では VR 物体と相互作用する指と、力触覚が提示する部位を分離する事に独自性があり、前腕への力触覚の転移には限定していない。そのため、本実験では、高品質化した力触覚デバイスを用いて、VR 物体を把持している手の前腕のみならず、左右の前腕と足首のそれぞれ合計 4 カ所に力触覚を提示した。左右の前腕および左右の足首を選定した理由として、試作機はサイズの調節が可能なプレスレット型をした物であり、腕や足首への装着が容易だからである。VR 物体と相互作用する部位（指）と、力触覚を提示する部位が異なる場合で、提示部位による違和感の結果に差異があるか調べた。

4.4.1 実験の条件および環境

力触覚提示部位は、左右の前腕と左右の足首の 4 部位である (図 4-5)。第 3 章の結果に基づき、左右の前腕には人差し指に対応する部位として前腕の背側部に提示し、親指に対応する部位として前腕の腹側部に提示した。足首には、デバイスから提示される力の向きを前腕の条件と一致させ、人差し指に対応する部位は足首の背側部に提示し、親指に対応する部位は足首の腹側部に提示した。それぞれランダムで力触覚を提示する部位を定め実験を行った。

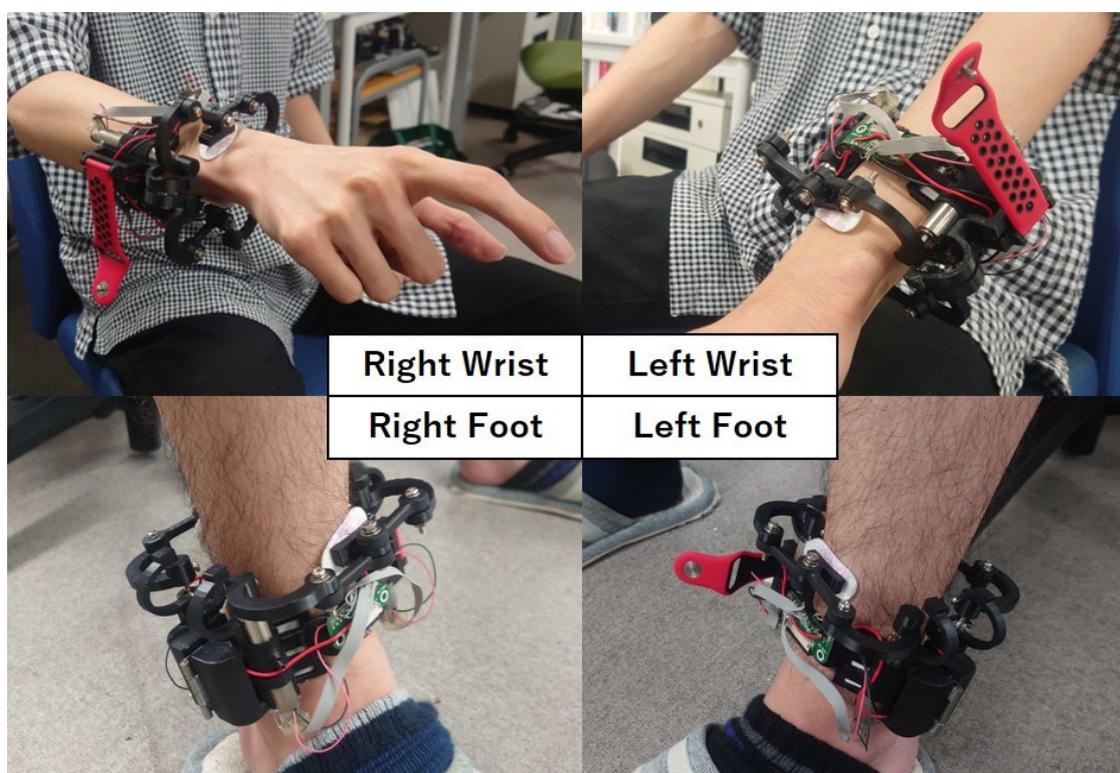


図 4-5 : デバイスの装着図

VR 環境内の視覚映像には、被験者の親指と人差し指、机と四角の VR 物体が表示されている。被験者は右手で VR 物体を把持し、15cm 持ち上げ、元の場所に戻し離す、という作業を各部位において 5 回行ってもらった。それぞれの提示部位毎に、提示された力触覚情報に対して違和感の無さを 1 (違和感がある) から 7 (違和感が無い) の 7 段階のリッカートスケールで回答させた。全ての試行を終えた後、最も違和感があった部位と、最も違和感が無かった部位を回答してもらった。被験者は研究室内の右利きのメンバー 18 名 (男性 17 名、女性 1 名、21~28 歳) であった。

視覚提示は、HMD として WindowsMR (Lenovo) を使用した。また、Opti Track

Trio を用いて、被験者の親指と人差し指をトラッキングし、Unity を用いて提示映像を描画した。Opti Track Trio によって取得した指の位置は、映像内の VR 指とデバイスの両方と連動している。試作したデバイスはマイクロコントローラ(ESP32)を通して PC に接続されている。VR 物体に触れた際の押し込み量（圧覚）は、5cm を最大の押し込み量としてモータの電圧値をリニアに変化させた。また、把持して持ち上げた際は、重力方向（せん断方向）に、1.8N の力を加えた。

被験者は実験環境に慣れるため、デバイスを装着する前に、物体を把持する練習を 5 回おこなった。実験中は HMD とヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータの駆動音をマスクした（図 4-6）。

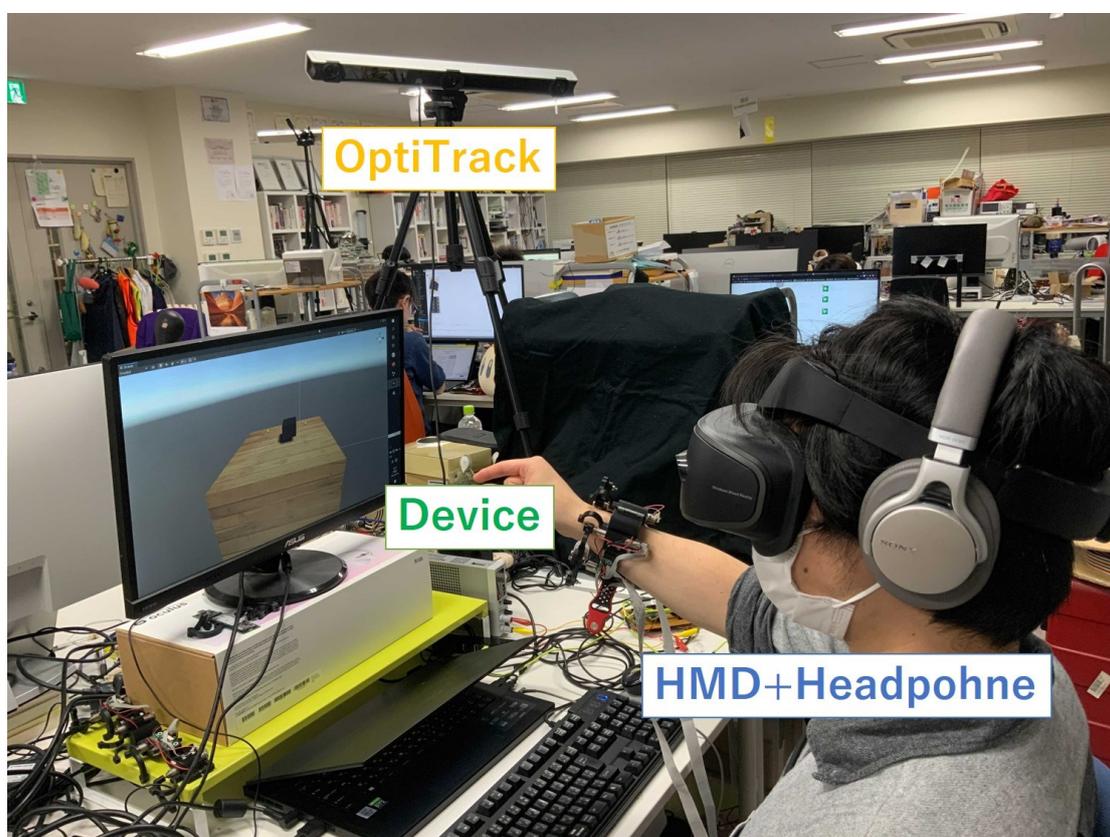


図 4-6：実験の様子

4.4.2 実験結果および考察

力触覚提示部位毎に、触覚を提示した際の違和感に対する回答結果を図 4-7 に示す。また、最も違和感を強く感じた部位と、違和感の無かった部位についての回答を表 4-2 に示す。

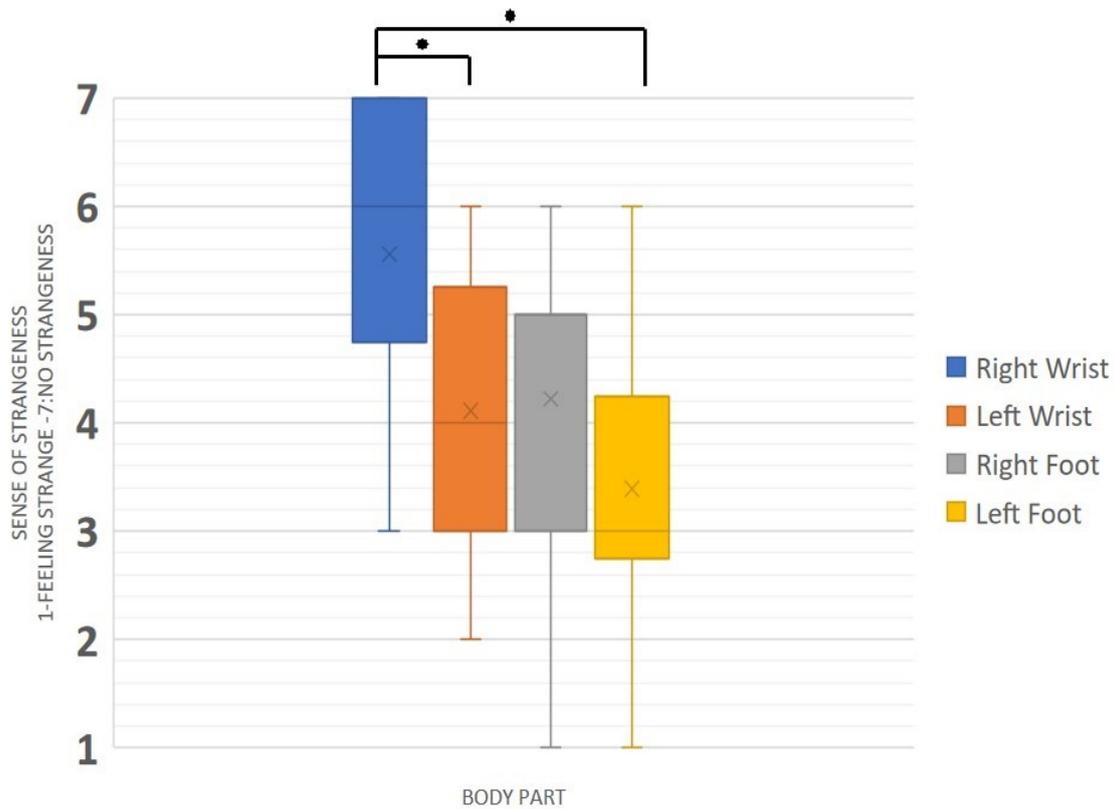


図 4-7：異なる部位に力触覚デバイスを装着した時の違和感の結果

表 4-2：それぞれの部位での違和感のアンケート調査結果

					
身体部位		右前腕	左前腕	右足首	左足首
違和感の回答	最も違和感無し	89%	0%	0%	11%
	最も違和感あり	6%	22%	17%	55%

図 4-7 の結果から、右前腕は左前腕と左足首と比較し有意に高い。(ノンパラメトリック分析・フリードマン検定, $p < 0.05$) また、表 4-2 から、左足首が最も違和感があると回答した人の割合が 55%と最も高く、右前腕が最も違和感が無かったと回答した人の割合が 89%と最も高い。

右手で VR 物体を把持して持ち上げる作業において、指先の力触覚を提示する部位

は、右前腕が左前腕および左足首と比較して最も違和感が無いという結果になった。また、右足首はどの部位と比較しても有意な差が無かった。理由として、まず、身体の空間的な配置の視点から考える事ができる。つまり、対象物と相互作用している部位と、力触覚を提示している部位の身体的な対称性が結果に影響した可能性が考えられる。このため、右手で VR 物体に触れた際に、左前腕と左足首の両方に対して右前腕が優位に高いのは、空間的配置が反転して対称となり、この変化に対して違和感を強く感じたとは推測する。右足首が右前腕に対して優位な差が無かったのは、動的に姿勢を変化させていた右腕と、身体の空間的配置が右半身で一致していたためだと考える。

一方で、左前腕と左足首で比較した時、最も違和感を強く感じた人の割合は、半数以上が左足首という結果になった。左足首は把持動作を行っている腕から最も物理的に遠いため、記号的な力触覚としての解釈が困難であった事が推測される。左前腕が最も違和感が強いと答えた人は 22%であり、条件では 2 番目に多い。左前腕は把持動作における腕の力触覚対側となり、この事が違和感の結果に影響を及ぼしたと推測する。反対に、右前腕への力触覚提示が最も違和感が無いと答えた人の割合が約 90%であった。これは、指と前腕の空間的な物理的配置も近く、力触覚情報と操作に伴う運動の感覚が統合して解釈しやすい部位であるからだと推測する。

以上より、把持動作を行う腕への力触覚提示が、最も違和感が少ない結果となった。本章で行う実験は、全て把持動作を行う腕に力触覚を提示する事とする。

4.5 VR 空間内での作業効率の評価

試作したデバイスを装着した状態で、VR 空間内の幅 8cm の VR 物体を把持し、目標位置に設置するタスクを行った。VR 空間内の力触覚提示手法の 1 つとして、VR 物体と相互作用する指に直接振動触覚を提示する事が、作業の一助となる報告が存在する [62]。そこで、本実験では提案装置を用いた力触覚提示の条件の他に、力触覚提示が行われない条件、VR 物体と相互作用する部位（指先）に直接振動触覚を提示する条件、前腕に振動触覚を提示する条件を用意し、それぞれの条件におけるタスクの完遂時間と、作業における体験の納得感を調べ比較した。

4.5.1 実験の条件および環境

視覚提示は、HMD として WindowsMR (Lenovo)を使用した。光学式モーションキャプチャ (OptiTrackTrio, Acuity inc.) を用いて、被験者の親指と人差し指をトラッキングし、Unity を用いて提示映像を描画した。試作したデバイスはマイクロコント

ローラ (ESP32, Espressif Systems) を通じて PC に接続されている。本実験では提案装置を用いた力触覚提示条件の他に、以下の3つの条件を用意した。

1. 視覚情報のみ
2. 指先への振動触覚提示
3. 前腕への振動触覚提示
4. 前腕への提案装置を用いた力触覚提示

条件 1 では身体への力触覚提示は行わず、HMD で描画される映像のみの条件で作業を行う。条件 2 の指先への振動触覚提示では、ボイスコイル型振動子 (Haptic Reactor, Alps Alpine) を指腹に設置した。また、条件 3 の前腕への振動触覚提示では、条件 4 の提案装置を用いた前腕への力触覚提示と同じ部位にボイスコイル型振動子を設置した。使用したボイスコイル型振動子は、条件 2、条件 3 共に共振周波数である 160Hz で駆動した。この振動にはパチニ小体が応答すると考えられる。パチニ小体は有毛部・無毛部両方に存在するため、指腹と前腕のそれぞれの部位に、十分な振動を知覚する事ができると考えられる[8]。振動振幅は、8cm 幅の VR 物体に触れた際の押し込み量に応じてリニアに変化させた。VR 物体への押し込み量が 1cm の時、振動子の振動量は約 0.3G であり、4cm の時は約 6.9G であった。また、振幅はほぼ線形に増加している事を確認している。

条件 4 では、提案装置を用いて前腕に力触覚を提示する。前章での結果を基に、親指に対応する部位として手首の腹側部に力触覚を提示し、人差し指に対応する部位として手首の背側部に力触覚を提示する。VR 物体に触れた際の押し込み量 (圧覚) は 4cm を最大の押し込み量として、モータの電圧値をリニアに変化させた。また、把持して持ち上げた際は、圧覚に加え重力方向 (せん断方向) に力を加えた (図 4-8)。提案装置から提示される力は、下記の方程式を用いた。この時、 F_t は垂直方向の力、 F_n はせん断方向の力を示しており、 m は物体の重量、 g は重力加速度、 k は係数である。なお、本実験では VR 物体を傾けないため、 F_n に生じる mg の一部を無視した。

$$F_n = kx \quad (9)$$

$$F_t = mg \cos \theta \quad (10)$$

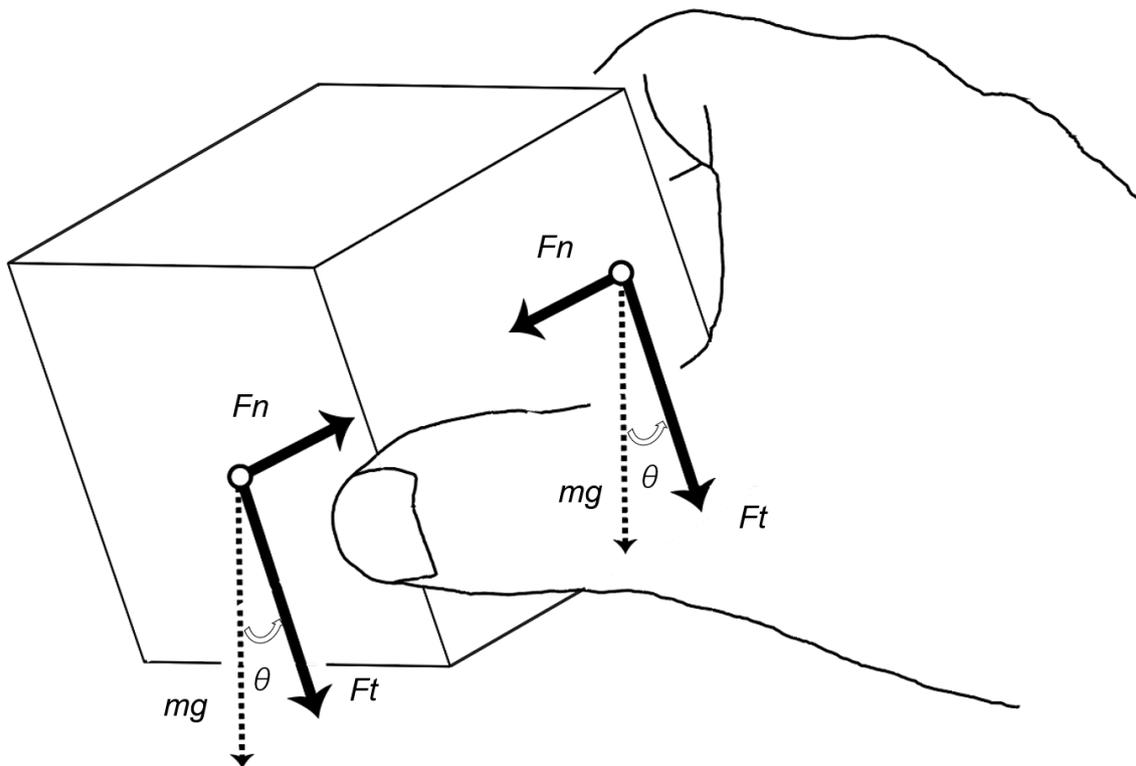


図 4-8 : 試作機から出力される力の算出方法

本実験では、8cm 幅の VR 物体を 30cm 移動させ、所定の位置に設置するタスクを 5 回×4 条件（合計 20 試行）行った。VR 物体に触れてから設置するまでの時間を記録した。また、提示された力触覚情報に対して納得感を 1（納得感が無い）、7（納得感がある）の 7 段階のリッカートスケールで回答させた。全ての試行を終えた後、最も納得度の高い条件を回答してもらった。被験者は研究室のメンバー 11 名（21~27 歳）であり、被験者ごとに力触覚を提示する条件の順番をランダム化し実験を行った。

OptiTrackTrio によって取得した指の位置は、映像内の VR 指と、振動子および提案装置の両方と連動している。VR 空間には VR 物体と机、VR 物体を設置する目標位置が描画されている。実験中は HMD とヘッドホンを着用させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータと振動子の駆動音をマスクした。

4.5.2 実験の結果および考察

図 4-9 は、提示条件ごとに、VR オブジェクトを指定された位置に移動させるのに必要な平均時間を示したもので、WH は力触覚提示が行われない条件、VI は指先への振動提示の条件、VF は前腕への振動提示の条件、HF は提案デバイスを用いた力触覚提

示を示している。図 4-10 は、各提示条件における体験の納得感に対する被験者の回答を示したものである。

独立変数と従属変数をそれぞれ力触覚条件と実行時間とし、一要因分散分析を行った。その結果、有意な差はみられなかった。ただし、提案装置を用いた条件では最も早く VR 物体を所定の位置まで移動できている事が分かる。一方で、感覚提示が行われない場合では最も時間を要している事が分かる。力触覚デバイスを用いて垂直および水平方向の力を提示した条件では、最も短い時間で VR オブジェクトを指定した位置に移動させることができる傾向がみられる。

さらに、感覚の提示条件の違いが生じるかどうかを調べるために フリードマン法によるノンパラメトリック分散分析を行った。提案装置を用いた条件は、力触覚が提示されない条件と、前腕への振動触覚提示条件と比較し有意に高く、最も納得感が高い ($p < 0.005$)。さらに、同様の検定を用いて指への振動触覚提示の条件と、視覚情報のみの条件および腕への振動触覚提示の条件を比較すると、指への振動触覚提示の条件が有意に高い事が分かる。また、全ての試行を終えた後のアンケート調査では、納得感を最も強く感じた部位は 11 人中全員が提案装置を用いた条件と答えた。

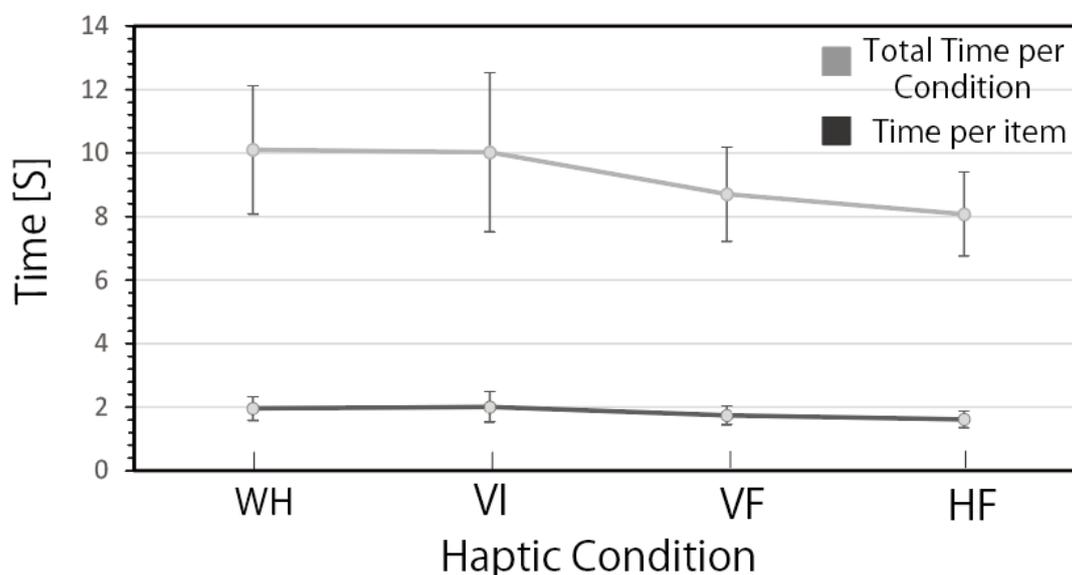


図 4-9：タスク遂行時間

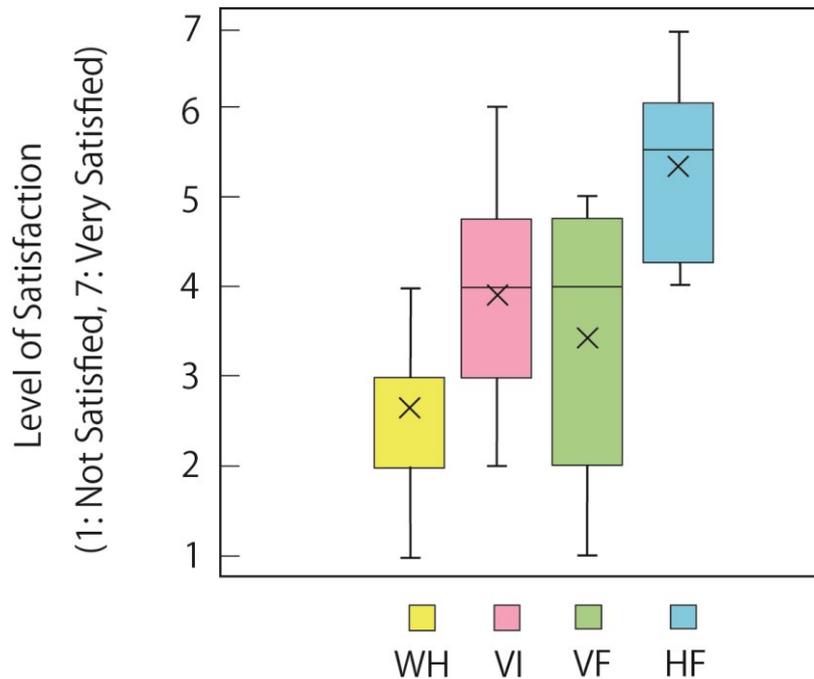


図 4-10：各条件での納得感の評価

条件間で、VR 物体を所定の位置まで操作する際にかかる時間に、有意な差は無かった。しかしながら、視覚情報のみの条件ではVR 物体の1つあたりの操作時間は約1.96秒であるのに対して、5往復にかかった時間は約22.21秒である。提案装置を用いた条件では、1つあたりの操作時間は1.62秒で、5往復にかかる時間は18.65秒であった事から、単純な作業を繰り返し複数回行うタスクにおいては、提案装置を用いた場合の方が、作業時間を短縮できる可能性が考えられる。

一方で作業における納得感の回答結果には大きな差が見られた。提案装置を用いた力触覚提示は、視覚情報の条件と比較すると有意に高い。VR 物体を操作する時間に有意な差は無いもの、作業を行う上では提案装置を用いた場合の方が、体験の質を担保できる事を示唆している。同様に、前腕への振動触覚提示と比較しても、提案装置を用いた力触覚提示条件が有意に高い。振動および力触覚転移手法を用いた前腕への刺激提示では、振動触覚と比較すると、力覚（力の大きさおよび方向）を提示した方が納得感を強く生起させる事が分かった。多くの被験者が、「両方の条件とも記号的ではあるが、物体の姿勢の変化に合わせて力の大きさと向きが変化する事に違和感は無く、納得感のある触覚提示であった」というコメントをした。振動刺激では、VR 物体に加わる垂直方向の力によってボイスコイル型振動子の振幅を変化させており、把持している物体の姿勢が変化しても、提示刺激が一定である事が、納得感の結果に影響を及ぼしたと推測する。一方で提案装置を用いた力触覚提示では、VR 物体の姿勢の変化に合わせて、前腕に加わる力の大きさと向きが変化する。VR 物体の操作に伴

う力覚情報が、指の運動の感覚と統合して、被験者が振動触覚提示と比較して解釈しやすくなった事が、納得感を強く生起させたのではないかと推測する。

指への振動触覚提示の条件では、視覚情報のみの条件と、腕への振動触覚提示の条件の間に有意な差がみられた。これは、振動触覚提示の場合では、転移手法よりも直接 VR 物体と相互作用する部位に振動触覚を提示した方が納得感を強く生起させる事を示唆している。一方で、指先への振動触覚提示と、提案装置を用いた力触覚の提示では、有意な差がみられなかった。ただし、アンケートの調査結果では被験者全員が提案装置を用いた条件が最も納得感を強く感じると回答している。これは、提案装置を用いた異部位力触覚転移手法での力感覚提示では、VR 空間内の力触覚提示手法として一般的に用いられる振動触覚提示と比較しても、同等の納得感を付与できる事を示唆している。つまり、実際に VR 物体と相互作用する部位（指）と、力触覚を提示する部位を分離させても、力の提示を行う事で、体験の質を担保できる事を示唆している。

4.6 異なるレンダリング手法による違和感の評価：

垂直方向のみの力提示

第3章で試作したデバイスは、RC サーボモータを用いて ON/OFF の制御のみを行った。また、第3章では、出力される垂直方向のみの力提示と、垂直および水平方向の力提示との間に有意な差が観察されなかった。原因の一つとして、ON/OFF 制御による力のレンダリング手法によるものだと考察した。本章で新たに試作したデバイスの特徴は、DC モータを用いて力の向きと大きさを連続的に提示できる点である。本実験では DC モータを用いて力をアナログに提示する事で、垂直方向および水平方向の力提示が、垂直方向の力提示のみの場合と比較してリアリズムの点で高い評価を得るかどうか確認した。

まずは垂直方向の力提示のみに着目する。本章で試作したデバイスは、垂直方向に 6N までの力を連続的に提示可能である。4.5 節の式 9 と同様のアルゴリズムを用いて、VR 物体を把持した際に加わる垂直方向の力の大きさを、VR 物体に対する押し込み量を基に算出する。力を連続的に前腕に提示する手法と、6N を最大の出力値とする ON/OFF 制御による手法の 2 つの条件を用意し、体験のリアリズムについて調べ比較した。

4.6.1 実験の条件および環境

視覚提示は、HMD として WindowsMR (Lenovo)を使用した。光学式モーション

キャプチャ (OptiTrackTrio, Acuity inc.) を用いて、被験者の親指と人差し指をトラッキングし、Unity を用いて提示映像を描画した。試作したデバイスはマイクロコントローラ (ESP32, Espressif Systems) を通じて PC に接続されている。実験では 2 つの条件を用意した。

1. VR物体に触れた際に6Nの一定の力を加える
2. VR物体の押し込み量に応じて力を連続的に変化する

本実験では、試作したDCモータを搭載したデバイスを用いて実験を行った。条件2は、実験 4.5節の式9と同様のアルゴリズムを用いて、VR物体を把持した際に加わる垂直方向の力の大きさを、VR物体に対する押し込み量を基に算出した。条件1は第3章で試作したON/OFF制御で6Nの力提示のみが可能なデバイスを、本試作機で模擬した。

本実験では、8cm幅のVR物体を把持し、約10cm持ち上げた後に初期位置に戻すタスクを5回×2条件(合計10試行)行った。実験開始前にVR環境に慣れるため、触覚提示が行われない条件でVR物体を5回操作した。実験では提示された力触覚情報に対してリアリズムを1(リアリズムが低い)、7(リアリズムが高い)の7段階のリッカートスケールで回答させた。被験者は研究室内のメンバー10名(21~26歳)であり、被験者ごとに力触覚を提示する条件の順番をランダム化し実験を行った。

OptiTrackTrioによって取得した指の位置は、映像内のVR指と連動している。VR空間にはVR物体と机が描画されている。実験中はHMDとヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータと振動子の駆動音をマスクした。

4.6.2 実験の結果および考察

次の図 4-11 に実験の結果を示す。ノンパラメトリック分析のフリードマン検定を行ったところ、条件の間に有意差が見られた($p < 0.05$)。VR物体を把持した際に、押し込み量に応じて力を連続的に変化させた場合では、前腕に対し一定の力を提示する条件と比較してリアリズムが高く評価される事が分かる。被験者の中には、「物体を把持する、という目的のみであれば、ON/OFFで一定の力を提示する条件も問題ないが、力提示が指の動きに合わせて連動して変化する条件では、表現される力触覚情報が豊かで非常に理解のしやすい刺激であった」というコメントをした人がいた。加えた力を把握するために、指を随意的に動かすという触運動が伴う様態では、指の運動に合わせて出力される力の提示を変化させる事でリアルな触認知を得る事ができると考察する。以上より、垂直方向の力提示の身の場合では、連続的に力が変化する力のレンダリング手法が、リアリズムの高い体験を創出可能だと結論づける。

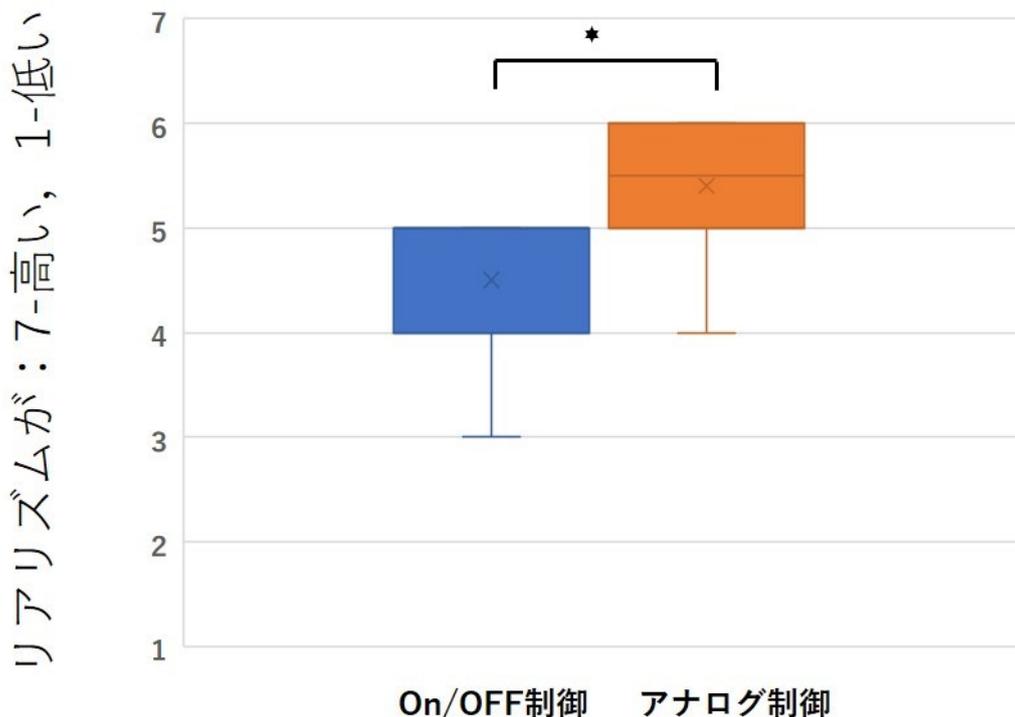


図 4-11：各条件でのリアリズムの評価

4.7 異なるレンダリング手法による違和感の評価：

把持動作における垂直および水平方向の力提示

本節では、連続的に力提示を行うアルゴリズムを用いて、垂直および水平方向の力提示を行った際のリアリズムの変化について評価する。第 3 章の実験では、出力される垂直方向のみの力提示と、垂直および水平方向の力提示との間に有意な差が観察されなかった。原因の一つとして、ON/OFF 制御による力のレンダリング手法によるものだと考察した。そこで、本実験では新しく試作した DC モータを用いてデバイスを用いて力をアナログに提示する事で、垂直方向および水平方向の力提示が、垂直方向の力提示のみの場合と比較して有意かどうか確認した。

4.7.1 実験の条件および環境

実験の環境は 4.6.1 と同じである。実験の条件は 2 つを用意した。

1. 垂直方向のみの力提示の条件
2. 垂直および水平方向の力提示の条件

条件 1 は前腕に対し垂直方向の力提示のみを行い、条件 2 では垂直と水平方向の

力提示を加えた。親指に対応する部位として手首の腹側部に力触覚を提示し、人差し指に対応する部位として手首の背側部に力触覚を提示した。VR 物体に触れた際の押し込み量（圧覚）は 4cm を最大の押し込み量として、モータの電圧値をリニアに変化させた。また、把持して持ち上げた際は、圧覚に加え重力方向（せん断方向）に力を加えた。

本実験では、8cm 幅の VR 物体を把持し、約 10cm 持ち上げた後に初期位置に戻すタスクを 5 回×2 条件（合計 10 試行）行った。実験開始前に VR 環境に慣れるため、触覚提示が行われない条件で VR 物体を 5 回操作した。実験では提示された力触覚情報に対してリアリズムを 1（リアリズムが低い）、7（リアリズムが高い）の 7 段階のリッカートスケールで回答させた。被験者は研究室内のメンバー 8 名（21~26 歳）であり、被験者ごとに力触覚を提示する条件の順番をランダム化し実験を行った。

OptiTrackTrio によって取得した指の位置は、映像内の VR 指と連動している。VR 空間には VR 物体と机が描画されている。実験中は HMD とヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータの駆動音をマスクした。

4.7.2 実験の結果および考察

次の図 4-12 に実験の結果を示す。ノンパラメトリック分析のフリードマン検定を行ったところ、条件の間に有意な差は見られなかった。これは、実験 3.7 の結果と同じである。VR 物体を把持して単純な動作を行う場合には、鉛直方向に加わる力（せん断力）は重要では無く、VR 物体に加える垂直方向の力提示だけでも、リアリズムの高い体験を創出できる。

指皮膚と比較して前腕は空間的な解像度が低く、第 3 章の実験 3.3.1 結果の様に、水平方向の力は向きの認知はリアリズムに寄与しない事が分かっている。考察として、手指を随時的に動かす触運動が伴う能動的触知の状態である垂直方向の力がリアリズムに強く関与するため、垂直方向の力のみの条件と比較して有意な差が観察されなかったのではないかと考える。

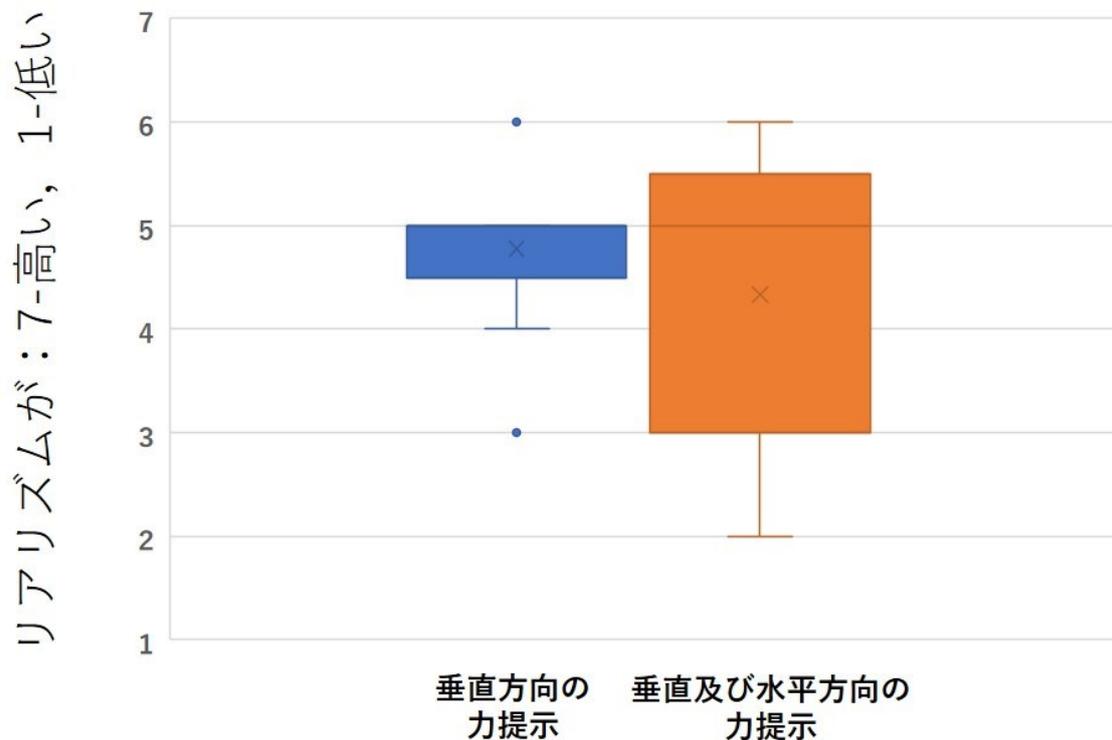


図 4-12：各条件間のリアリズムの変化

4.8 異なるレンダリング手法による違和感の評価：

なぞり動作における垂直および水平方向の力提示

4.7 節の実験では、単純な物体の把持と動作においては、垂直および水平方向の力提示との間に有意な差が観察されなかった。これは、物体を把持した際の水平方向の力提示は、手指を随意的に動かす触運動が伴わない受動的触知の様態であるからだと推測した。そこで、本実験では人差し指一本で VR 物体を「なぞる」際に生じる力触覚情報を前腕に転移した時のリアリズムを評価する。「なぞる」という動作では、手指を随意的に左右に動かし、皮膚に対し垂直と水平方向（せん断力）の力が加わる能動的触知である。物体を把持する動作と比較して、「なぞる」動作は水平方向の力提示がより重要ではないかと考え、人差し指の力触覚を前腕に転移する実験を行った。

4.8.1 実験の条件および環境

実験の環境は前節と同じである。実験の条件は 3 つを用意した。

1. 垂直方向のみの力提示の条件

2. 水平方向のみの力提示の条件

3. 垂直および水平方向の力提示の条件

条件 1 は前腕に対し垂直方向の力提示のみを行い、条件 2 では水平方向のみの力提示を行った。条件 3 では垂直と水平方向の力提示を加える。人差し指に対応する部位として手首の背側部に力触覚を提示する。VR 物体に触れた際の押し込み量（圧覚）は 4cm を最大の押し込み量として、モータの電圧値をリニアに変化させた。VR に表示されている指と VR 物体との接触角度に応じて、2.5N を最大のせん断方向の力提示として、水平方向の力提示を行った。

本実験では、長さ約 20cm の凸凹な VR 物体を指でなぞるタスクを、往復で 3 回×3 条件行った。被験者毎に、それぞれの条件の順番はランダム化した。実験開始前に VR 環境に慣れるため、触覚提示が行われない条件で VR 物体を 3 往復なぞってもらった。提示された力触覚情報に対してリアリズムを 1（リアリズムが低い）、7（リアリズムが高い）の 7 段階のリッカートスケールで回答させた。被験者は研究室内のメンバー 8 名（21~26 歳）であった。

OptiTrackTrio によって取得した指の位置は、映像内の VR 指と連動している。VR 空間には VR 物体と机が描画されている。実験中は HMD とヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせる事でモータの駆動音をマスクした。

4.8.2 実験の結果および考察

次の図 4-13 に実験の結果を示す。ノンパラメトリック分析のフリードマン検定を行ったところ、垂直および水平方向の力提示の条件が、垂直のみの力提示と、水平方向のみの力提示の間と比較して有意に高い事が分かる。垂直方向のみの力提示と水平方向のみの力提示の間では有意な差は観察されなかった。

まず、垂直方向と水平方向をそれぞれ独立して提示した場合にはリアリズムの評価が低かった。垂直方向のみの力提示では、VR 物体の押し込み量に応じて加わる力が変化するが、「なぞる動作に対して圧覚がただ変化する様に感じられ不快だ」というコメントを得た。力触覚動作に伴う指の「なぞる」という運動では、VR 物体を能動的にユーザが指で押し込むという動作を含んでいないため、単純な水平方向のみの力提示では、リアリズムが担保できないのではないかと考察する。同様に、水平方向のみの力提示では、「皮膚のせん断だけでは VR 物体の凹凸感を感じられない」というユーザのコメントを多数得られた。デバイスの触覚提示部位に設置している粘着ゲルを通じて皮膚を引っ張られている感覚が生起されてしまい、水平方向のみの力提示では凹凸感の表現が困難であったと考察する。

一方で垂直および水平方向の 2 自由度の力の提示を行った条件では、リアリズムのスコアが 4.1 と高い数値ではない物の、垂直・水平それぞれ独立して提示した場合と

比較してリアリズムが高く評価された。被験者からは「条件間で比較すると、どちらもそこまでリアリズムが高いというわけではないが、垂直と水平の2自由度の力提示が納得できる感覚」というコメントを得た。垂直と水平の一方のみを提示した場合には、「なぞる」という動作に対しては自由度が少なすぎて単調な力触覚しか表現できなかったため、低く評価がされたと考察した。2自由度の力提示では、実際の物体を「なぞる」という操作に伴う運動の感覚と力触覚情報が統合して高い評価をされたのではないかと推測する。ただし、単に「水平+垂直」がより強い刺激になり、それがリアルだと感じられた可能性がある。

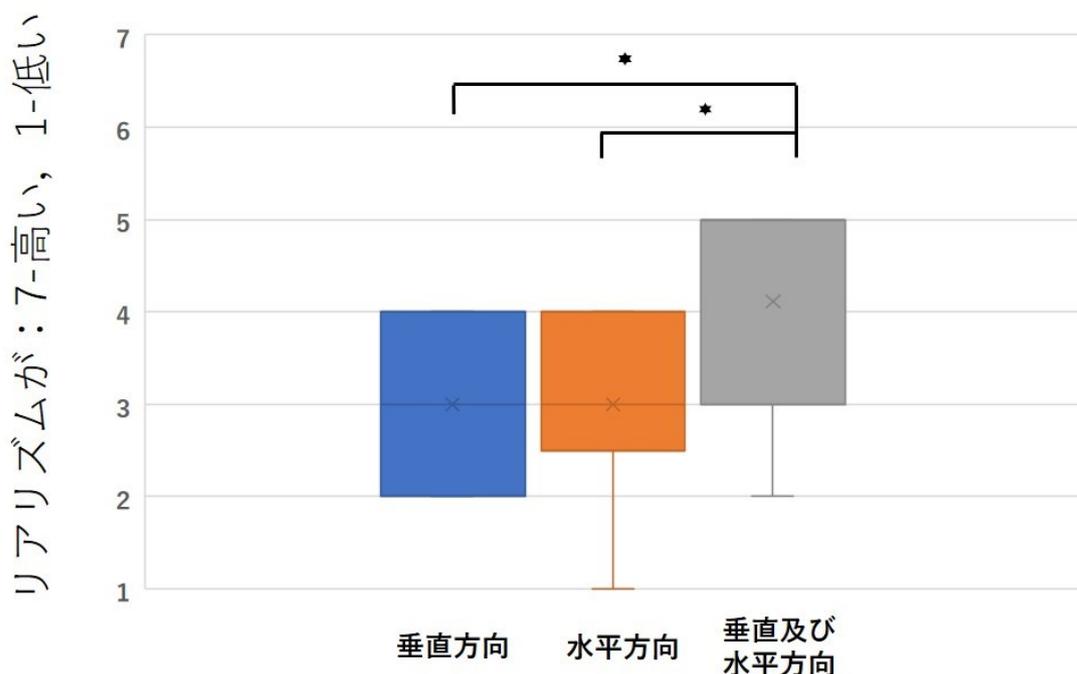


図 4-13 : 各条件間のリアリズムの変化

4.9 試作したアプリケーションおよびデモ展示の内容

2018年12月4日～12月7日の4日間、東京でSIGGRAPH ASIA2018が開催され、SIGGRAPH ASIA Emerging Technologiesにて展示を行った(図4-16)。来場者および体験者が投票するBest Demo Voted by Attendeesとして受賞した。展示コンテンツでは、下記のものを用意した。ユーザはHMDを装着した後、自由にVR空間内を歩き回る事が可能である。VR空間内ではまず、暖かい球と冷えた球が描画されている(図4-15)。ユーザは球を持ち上げる事で力覚を感じる事が可能である。また、冷感も提示できるため、触れたボールに応じた温度の提示が前腕に行われる。次に、段ボールや様々な形をした物体にVR空間内で触れてもらう。物体に触れる力や形状によって、

異なる力覚が提示される。

展示には、温冷感の提示が可能なペルチェ素子を用いた機構を内蔵した（図 4-14）、接触対象物の材質感を提示するためには温度感覚の提示が重要である。ここではデバイスの側面に左右 2 つずつ、長さ 15mm×30mm のペルチェ素子を用いた。予備的な検討の結果、この大きさは冷感や温感を提示するには十分な大きさであった。

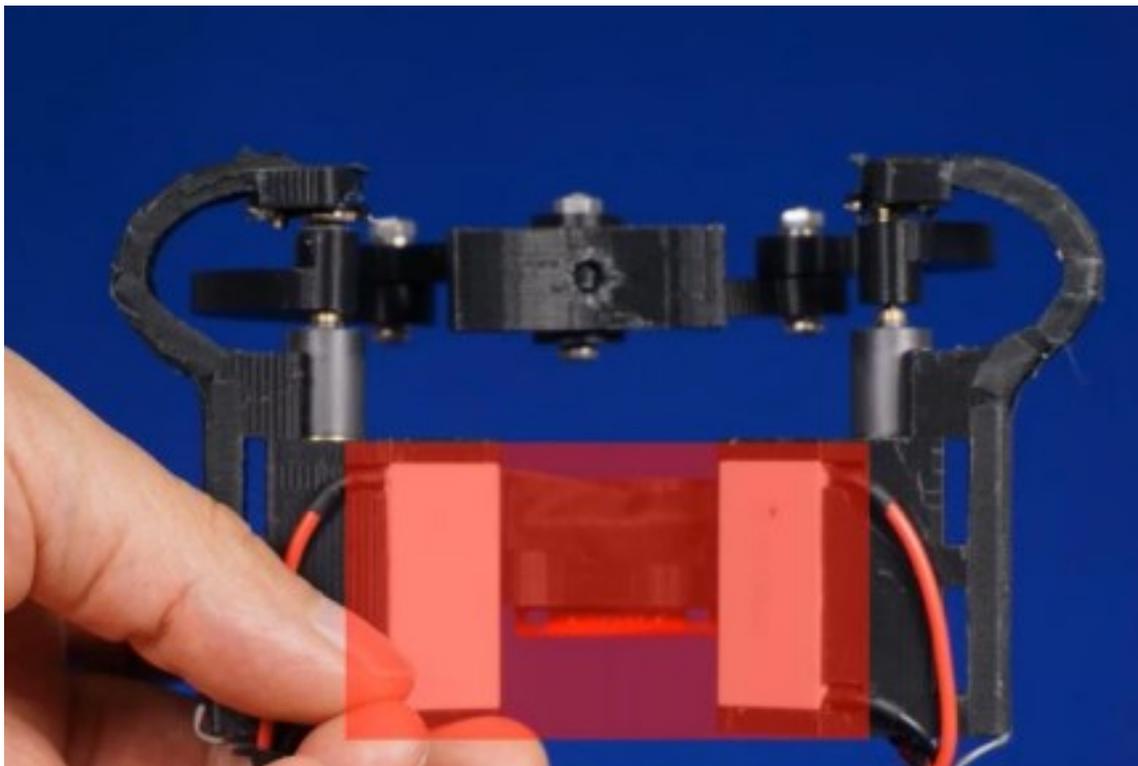


図 4-14：温冷感提示のためにペルチェ素子を用いたデバイスを試作



図 4-15：開発したアプリケーション



図 4-16：デモ展示の様子

4.10 4章のまとめ

本章では、試作機の駆動系を DC モータに変更し、正確な力を提示可能にした。試作機を用いたハードウェアの評価を行い、逆運動学を用いて提示可能な力を算出した。計測系を構築し、実際に提示される力を計測した結果、算出した値と一致する事を確認した。

本研究では、VR 物体と相互作用する指と、力触覚を提示する部位を分離する事を目的に行われた。これに対し、特に指に加わる「分布的触覚を含まない力触覚」に着目した力触覚転移システムの構築に着目し、力の大きさおよび方向を提示可能な試作機を設計した。実際に VR 物体を把持した際の作業効率と、体験の納得感の変化について調査した。振動触覚提示の条件と比較すると、タスク遂行時間に有意な差は観察されなかった。しかしながら、1 個辺りの VR 物体を把持して作業を行う際のタスク遂行時間は、振動触覚提示の条件より少なく、単純な作業を複数回行う際には、条件の間で有意な差がみられる可能性がある。

タスク遂行時間に、条件間で有意な差が見られなかった理由として、実験前にトレーニングを設けなかった事があげられる。30 秒のトレーニング時間を各実験前に設けたものの、十分ではなかった。そのため試作機と振動触覚とのタスク遂行時間の評価では、有意な差は観察されず、また、垂直方向のみの力提示と、垂直および水平方向の力提示との間に有意な差が観察されなかったのではないかと推測する。つまり、トレーニングを行う事によって違和感が軽減でき、力触覚提示デバイスとして納得感や、体験のリアリズムがより向上するのではないかと考える。

本論文では、指先で生じる力触覚情報を身体の異部位に提示するため、ある程度の違和感は生じる事が予測される。しかしながら、人間は新しい道具を手にしたとき、何度も使用して（訓練して）慣れはじめ、最終的には簡単に使用できる様になる。この様に、トレーニングを行う事で違和感を軽減でき、VR 空間内における力触覚提示デバイスとして使用できるのではないかと考える。

本章で設計した試作機は、第 3 章の RC サーボモータを用いたデバイスと比較して、正確な力を提示できる点が異なる。第 3 章で用いた試作機では、ON/OFF の力制御で最大トルクの力提示を行っていたが、本章で試作したデバイスは連続的な力の提示が可能である。リニアに力提示が可能である事から、消費電力を削減できる可能性がある。また、垂直方向のみの力提示では、本章で試作したデバイスで提示される力触覚が、第 3 章で試作したデバイスと比較してリアリズムが高いという結果になった。この結果は、Peerdeman らが調査でまとめた感覚義手の 5 つの機能要件のうち、触覚提

示はリニアである事が好まれる点と一致している。また、感覚義手のデバイスとして「把持力を伝達する」研究は少なく、本研究で行った試作機は感覚義手や福祉工学の研究に新たに提案できるシステムでは無いかと考える。

さらに、物体を「なぞる」動作においては、水平方向の力提示が有意である事を示した。提示される力をリニアに出力する事で、VR物体との間に発生している力と把持した際の力を正確に再現する事が可能になった事で力触覚が高く評価されたと推測する。同時に、1自由度の力提示を可能とする福祉に用いられる機器や、VRに応用したデバイスと比較すると、本試作機は2つの自由度を持ちユニークである。垂直方向と水平方向の2自由度の力提示は、1自由度の力提示と比べて有益である事も証明し、リアリズムの高い体験が提供できる事を確認した。

以上より、本研究は「分布的触覚を含まない力触覚」に着目した力触覚転移システムの構築およびインタラクションの設計・開発であったと言える。指に加わる「力の大きさおよび方向」を異部位で再現し、指に対応して異部位に提示された力触覚が誤解無く伝わるか調べ、違和感が無い提示部位を調べた。最後に、VR物体を把持して操作する文脈で体験のリアリズムを評価し、高いリアリズムを提供できたと結論付けられる。

第5章

背部への力触覚転移：

これまで特に指に加わる「分布的触覚を含まない力触覚」に着目した力触覚転移システムのアプローチについて議論し、指先に加わる力の大きさと方向の情報を、指先以外の部位に提示することを提案した。従来の提案では人差し指に対応する部位として前腕前方部の背側を、親指に対応する部位として前腕前方部の腹部が適切であることを見出し、VR空間中での体験が向上した事を見出した。しかしながら、前腕に提示する力触覚情報は、各指に対応する力の大きさおよび力の向きに焦点を当てていたため、形状やエッジなどの分散された力触覚情報の提示は困難であった。この1つの理由は指先に比べて身体他の部位は2点弁別閾が大きく、手掌部と同程度の面積では極めて低い空間解像度しか実現できないためである。

本章では、「分布的触覚」に着目した力触覚転移手法について議論する。特に、指皮膚と接触物体との分布情報の転移に着目する。本章では、次のような新たな考えに基づく力触覚転移を行う。力触覚提示素子を背中の大面積に大量に配置し、手掌部の力触覚情報を十分に高い解像度で提示する(図5-1)。1本指の場合には提示される解像度は人間の指先が本来持つ力触覚能力を超えることを目指す。これにより、単に手先がフリーになるというこれまでの力触覚転移の利点以上に、手先の力触覚能力を「本来よりも引き上げる」という、人間能力の拡張も目指す。

本章では、ボイスコイル型振動子を80個設置した触覚ベストを開発し、指先の圧力分布を2mmの間隔で100点まで検知できるセンシンググローブを用意した。そして、指先で触れた図形を背部にマッピングした時、正しく背部で図形が識別できるか調べた。ボイスコイル型振動子では、適切な交流信号を独立に与える必要があるが、シフトレジスタを用いた駆動方法を提案、実装し、全ての振動子を異なる振幅と周波数で独立して駆動する。本章ではまず、開発したデバイスとシステムのハードウェア評価を行い、最後に2種類の知覚実験を行った。グローブを装着した状態で、触覚ベストを装着せず、背部に振動感覚が転移されていない場合と比べ、図形が正しく識別できるか調査した。



図 5-1：背部へのマッピングのイメージ

5.1 研究背景

皮膚の空間解像度が最も高い身体の部位は指であり、物体に触れた時の質感や形状、重さといった、作業の際に必要な情報を取得する事ができる[63]。一方で力触知覚能力は加齢とともに劇的に低下していく事が知られており、特に、指先の力触知覚能力の鈍化は顕著に表れる[64]。これは高齢になると、器用な作業が難しくなる 1 つの原因だと考えられる。また、手指にグローブを装着し作業を行う職業では、指肌で直接物体に触れることが出来ないため、物体の質感や形状といった情報が劇的に低下する。結果として作業の支障をきたす原因となり得る。

上記の問題に対する 1 つの解決手法は、力触知覚低下が比較的穏やかな身体部位に指先の感覚を転移させる事だと考えられる。指先を対象としない理由としては、指の動きを阻害しない小型なアクチュエータが存在せず、装置が大掛かりで複雑になってしまうからである。指先を提示対象としなければ、例えば加齢とともに能力が低下する比率の低い背部等に大面積な提示装置を配置でき、アクチュエータの大きさによる装置の制約は軽減される。また、指先の動きを阻害する事なく作業が可能になる。

そこで、本章では、これらの課題に対する解決手法として、指先の力触覚を背部に転移する高解像度な触覚ベストを開発した。触覚ベストには、独立して駆動可能な 80 個のボイスコイル型振動子が内蔵されており、背部の 2 点弁別閾毎に設置されている。開発した触覚ベストと、指皮膚に生じる圧力分布を 100 点まで検知可能なセンシンググローブを組み合わせ使用することで、指先の分布的触覚を背部に転移する。背部に

着目した理由として、背部の面積を弁別可能な知覚点数で割ると、指先と同等の弁別点数を実現できる点や、腕や他の部位と異なり装置が多少大掛かりで重くても、装着が困難ではないためである。

5.2 関連研究

体験の没入感を高める目的で、身体に力触覚を提示する研究やデバイスは数多く存在している。着衣型デバイスから、いすやソファに振動子を埋め込み、振動触覚をフィードバックするものがある(図 5-2) [65][65][66]。また、VR/AR での触覚フィードバックなどを備えた触覚提示装置も多数存在している [33][90]。しかしながら、これらの多くは力触覚転移を題材としたものでは無かった。



図 5-2 : a) 空気圧迫モジュールを内蔵したベストが圧覚デバイス[65], b) 振動子を大量に椅子に埋め込んだ振動提示デバイス[66]

一方で身体の手触覚情報を身体の手部位に提示する力触覚転移は、感覚義手の研究では一般的な方法であり、腕や肩に振動子を配置する試みは存在する [41]。すなわち、本研究は福祉機器で知られた手法を用いて、人間の力触覚能力の拡張を目指すものであるといえる。しかしながら、義手の接触や義手に発生する力の大きさを、振動や圧迫、電気刺激を用いて記号的に伝えるものにすぎず、触れた物体の形状の認知や、人の技能をサポートするレベルでは無かった。

同様に、力触覚転移の技術を VR 技術として応用した例はいくつか存在する。岡野らは足裏に大面積の力触覚提示を行っている [42]。手掌部の力触覚を足裏にマッピングするもので、手と足の形の類似性から直感的に優れていると考えられる。さらに、空気駆動型吸引デバイスを用いて、指先の力触覚を顔に提示するもの [47]、ブレスレット型のデバイスを腕に装着し、指先で触れた感覚を圧覚と振動感覚で腕に提示するもの [49] などが挙げられる。一方で、これまで提示案されてきた力触覚転移の研

究は、指先の優れた力触覚能力を十分に維持して転移されているとは言えない。この1つの理由は指先に比べて身体の他の部位は2点弁別閾が大きく、手掌部と同程度の面積では極めて低い空間解像度しか実現できないためである。

人間の身体の力触覚能力を拡張する観点では、触れた箇所を拡大する事のできる指先搭載型顕微鏡で、ミクロな世界とマクロな世界を直感的な指先の動きによって結びつける事が可能である[68]。同様に、指先の圧力分布を、電気刺激を用いて指皮膚にフィードバックする研究も存在する[69]。指先のセンシング能力の拡張は達成しているものの、センシングした力触覚情報の提示は指腹への振動感覚と限定的であり、力触覚提示装置自体が指の動きを阻害してしまう問題が存在する。

背部に振動子を配置し、振動刺激を出力として応用した研究としては、視覚障害者と健常者の歩行のナビゲーションを実現した研究や[70][71][85]、椅子に400個の振動アクチュエータを搭載し、背部に画像を振動感覚として変換・投影して画像の認知を実現した研究が存在する。また、VR環境中の全身への力触覚提示方法として、ベスト型の力触覚スーツを装着するタイプのものも存在する[86][87][88][91]。しかし、人間の力触覚能力の代替を題材するものでは無かった。このアプローチで、力触覚のより残存している部位に代替させることができれば、高齢者の指先の感覚機能を力触覚転移によって引き上げる事が可能になると考える。また、グローブを装着する作業環境化においても、作業に必要な情報を背部で代替可能となり、人の技能をサポートする事が可能になる。

5.3 HARVEST：ベスト型のマルチチャンネル振動触覚提示デバイス

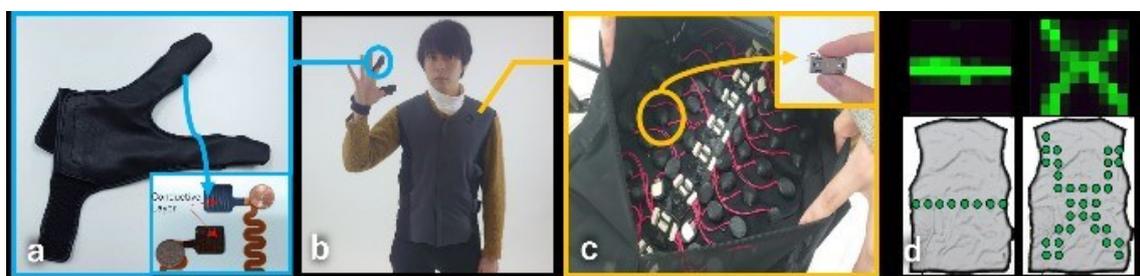


図 5-3： a) センシンググローブ， b) ベスト型触覚提示デバイス， c) ベスト型触覚提示デバイス内の振動子の配置， d) “—”や“×”を背部に提示した時のイメージ図

図 5-3 に試作した触覚ベストの外観とハードウェアを示す。応答性の高いボイスコイル型振動子である Haptic Reactor (AplsApline) を 88 個用いている。背部を刺激す

るアクチュエータにボイスコイル型振動子を選択した理由として、複数のアクチュエータを多チャンネルで駆動する際にボイスコイル型振動子が簡易的に実装可能なためである。その他にも電気刺激で背部を刺激する手法もあるが、発汗や皮膚の接触が安定しない理由等から、振動刺激が最も適当だと考えた。ボイスコイル型振動子を駆動する回路はベストの中央に配置している（図 5-4）。ボイスコイル型振動子は 50mm の等間隔に設置している。背部の 2 点弁別閾は 50mm とされており [8]，振動刺激を提示する部位をこの 2 点弁別閾と同等の間隔にした（図 5-5）。なお，研究室のメンバー男性 5 人の背部の面積の平均を 2 点の弁別閾で割ると，おおよそ 80 点になり，1 列を予備に更に加えた 88 個の振動子を設置した。

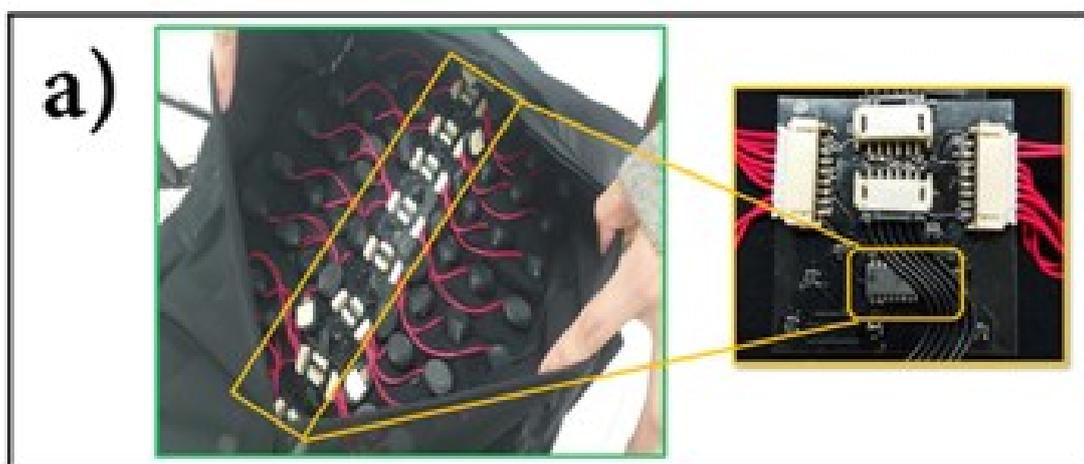


図 5-4：ベスト型触覚提示デバイスと回路の配置

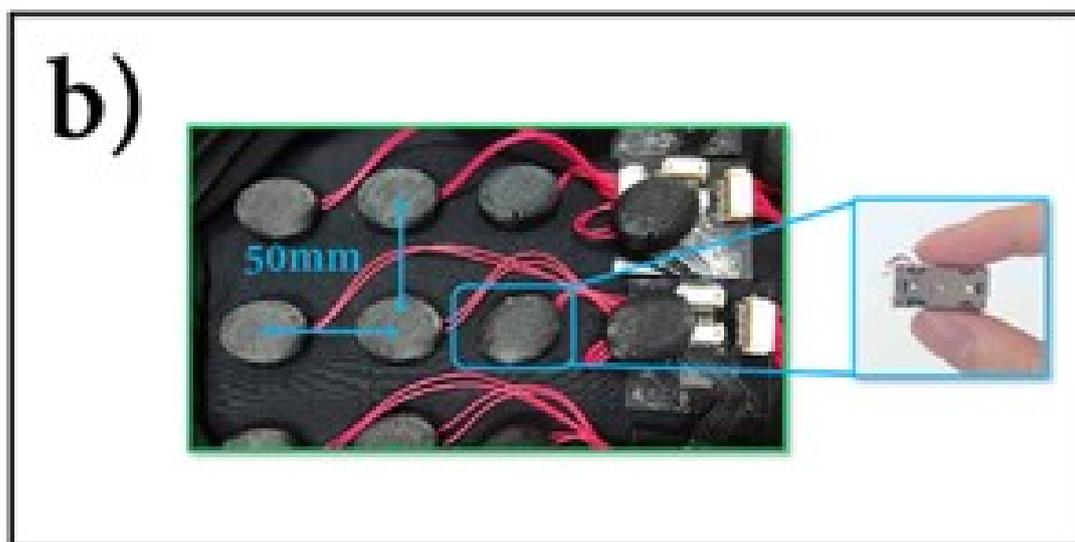


図 5-5：ベスト型触覚提示デバイスの中身と振動子の配置

振動子はマイクロコントローラ（ESP32）を通じて 10 個の 8bit-シフトレジスタ（TPIC6B595）にカスケードで接続されており、88 個の振動子を独立して駆動する事が可能である（図 5-6）。PC からマイクロコントローラへのデータには、88 段分のシフトレジスタの出力と振動の強さパラメータが含まれている。マイクロコントローラ内で受信したデータは、触覚ベスト内に組み込まれた振動子の空間的な配置に射影され、10byte 分の全てのシフトレジスタへの出力が完了すると、全てのシフトレジスタの出力が更新される。

今回は直動型振動子を用いているため、適切な交流信号をパルスとして生成する必要がある。例えば 400Hz の刺激を行う際には、400Hz の矩形波を生成する必要がある。最低でも秒間 800 回、1.25ms 以内でシフトレジスタの出力を切り替える必要がある。今回 80 段のシフトレジスタの切り替えを行うためには、64kHz のクロックが最低必要である。さらに振動の強さを矩形波のパルス幅によって表現するためには、パルス幅を例えば 32 階調で微調整するためにこの 32 倍程度、すなわち 2MHz 程度のデータ送信が必要と考えられる。今回用いたシフトレジスタおよびマイクロコントローラの SPI 通信出力は十分にこれより早い信号の送受信が可能である。なお、本システムではボイスコイル型振動子は 32 階調の表現が可能であり、応答速度は 1msec のものを使用している。複数人で試したところ、88 個の振動子を独立して駆動した時、全ての振動子を区別して知覚できる事を確認できた。

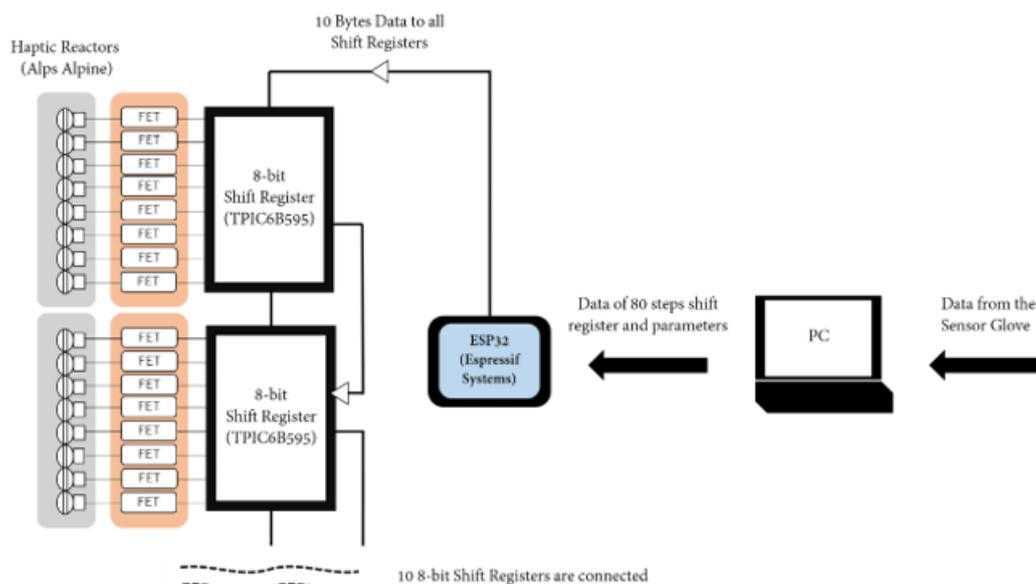


図 5-6：ベスト型触覚提示デバイスのシステム構成

5.3.1 ベスト型触覚提示デバイスのハードウェア評価

ここで、ボイスコイル型振動子の周波数特性と振動強度を計測した。今回は「背部への振動提示」という状況に限定し、ボイスコイル型振動子を背部衣類の上に取り付け、加速度センサをボイスコイル型振動子の側面に取り付けた。加速度の測定には加速度センサ（BMX055, InvenSense）を用い、サンプリング周波数 1KHz で計測した。

今回は著者 1 名が椅子に座り、加速度センサをボイスコイル型振動子の側面に両面テープで取り付け、ボイスコイル型振動子を背部に衣類の上部からベルクロを用いて設置した。周波数は 50Hz から 400Hz まで、50Hz おきに測定した。ボイスコイル型振動子へは、シフトレジスタの出力を高速に切り替える事で、設定した周波数の矩形波を入力する。PWM 信号のデューティ比は 10% 間隔で測定した。各周波数において 5 秒間の 3 軸加速度を測定し、PWM 各軸の振幅の平均値の自乗根を求めた（図 5-7）。

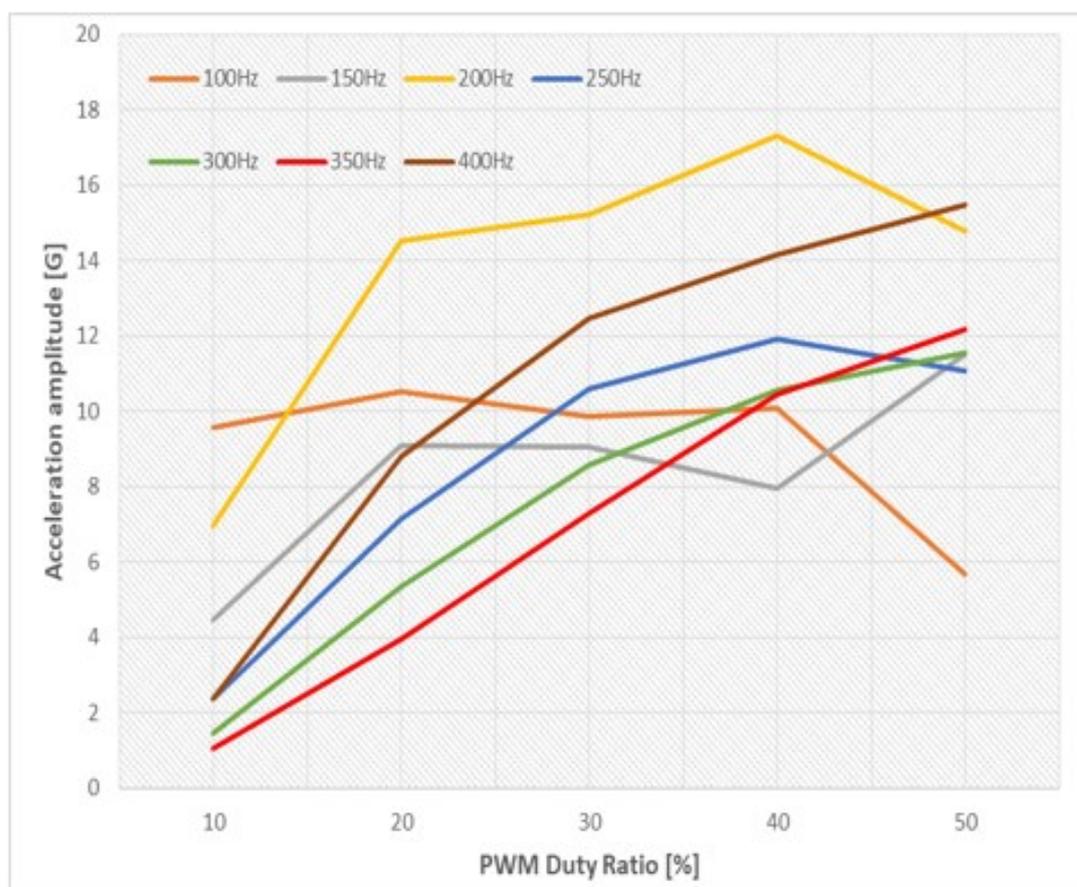


図 5-7：ボイスコイル型振動子の加速度測定

図 5-7 の加速度測定から、ボイスコイル型振動子は 50% デューティ比の 150Hz およ

び 300Hz で最も加速振幅が大きくなる事が分かる (16G)。実験の結果より、50Hz から 400Hz までおおよそ線形に振動強度が変化していく 350Hz を用いて知覚実験を行う事にした。

5.3.2 触覚センシンググローブ

図 5-8 に試作使用したセンシンググローブの外観を示す。Yem らによって試作が行われた圧力センサ内蔵のセンシンググローブと同じ感圧抵抗方式が採用されているが [72]、今回の試作では圧力検知点の間隔は 2mm、点数は Yem らの $5 \times 10 = 50$ 点から指 1 本あたり $10 \times 10 = 100$ 点に拡大した。親指、人差し指、中指の 3 本指に対応し、8bit 分解能で送信する場合約 300Hz での計測が可能であり、1 本指のみ送信する場合は約 900Hz での計測が可能である。

指の第一関節の 2 点弁別閾は先端部で 1.5mm 程度、腹部で 2 ないし 3mm 程度であるので [63]、圧力センサの解像度は指先が弁別できる圧点数と同等程度になる。グローブの厚みは 1.2mm 程度である。この厚みによってセンサ自体を保護し、適切な空間的なローパスフィルタをかける。また本グローブの厚みは一般的な革製グローブと同程度であるが、後の実験 2 で明らかになるように、触覚は相当阻害され、触っている対象の形状がわからなくなる。これは研究背景で述べたように、高齢化による触覚の減退を模擬していると考えられる。

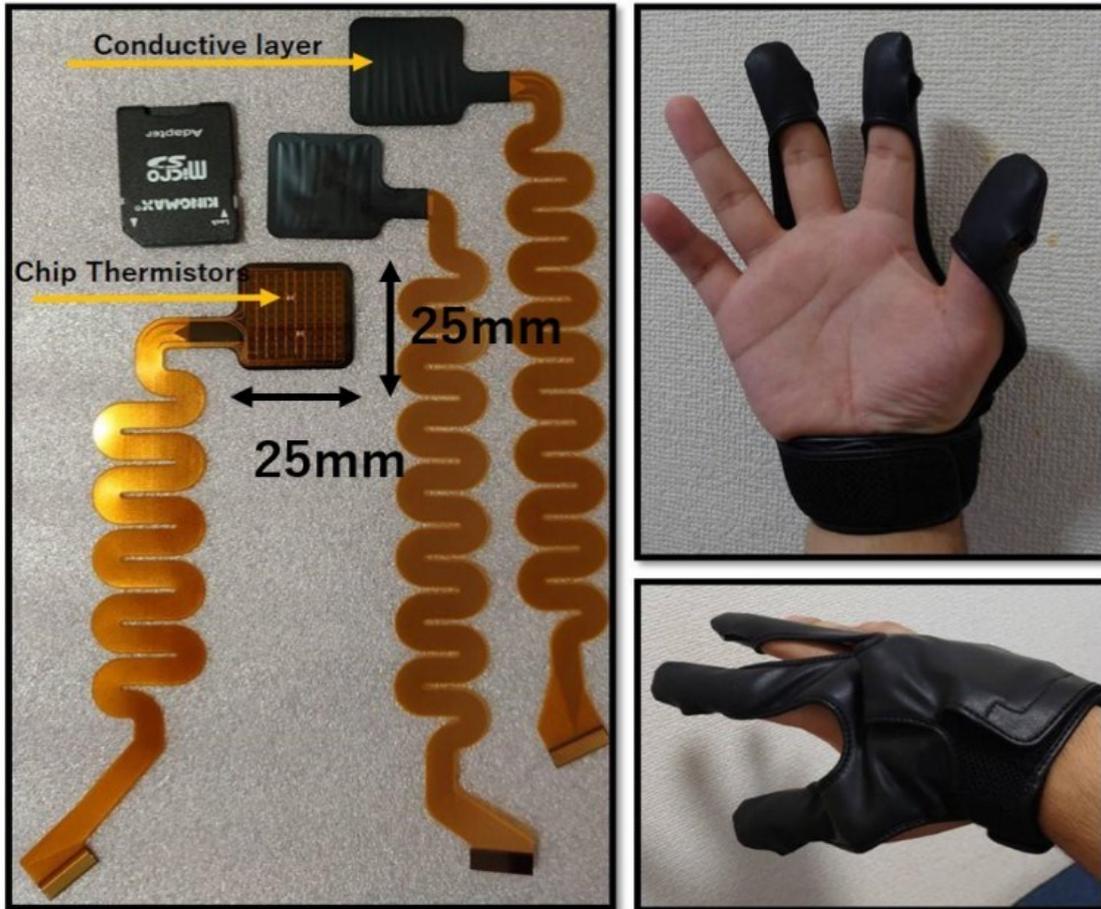


図 5-8：センシンググローブ

ここで、圧力センサを用いて出力値の計測を行った。圧力センサはスポンジ 2 枚の間に挟み、既知の重みを上部に載せた。センサの出力結果を下記図 5-9 に記す。25hPa は指先の大きさで約 10g の力に相当し、250hPa は 500g の力に相当する。この結果より、微小な圧力ではセンサの出力が大きく変化し、圧力が大きくなるにつれ出力が飽和していく事が確認された。

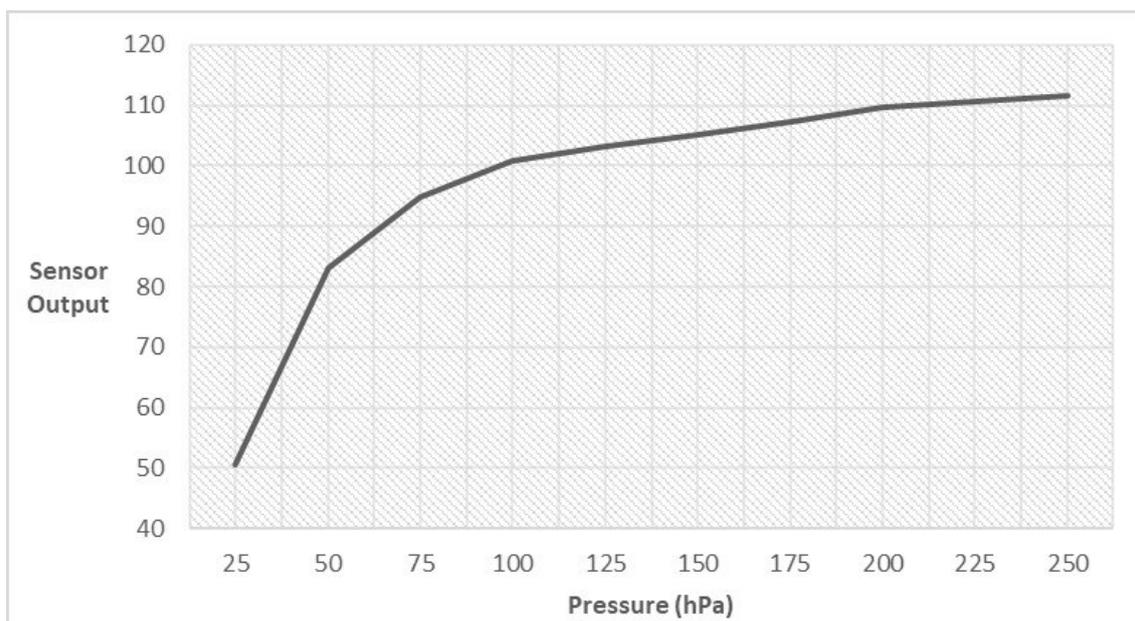


図 5-9：センシンググローブの出力値

5.4 実験 1：背部における直線角度の認知評価

本システムを用いて背部へ提示されている力触覚情報が正しく知覚できているかどうか調べるため、本章では 2 種類の知覚実験を行った。

実験 1 では、背部に提示された角度の異なる 4 つの直線を被験者が正しく識別できるか調べ、4 つの異なる条件で行った。それぞれの条件は、下記のとおりである。

1. グローブや触覚ベストを装着せず素手で直線に触れる
2. グローブは装着し、触覚ベストを装着せず直線に触れる
3. グローブと触覚ベストを装着し直線に触れる
4. 触覚ベストだけを装着し、背部に直線を提示する

実験 2 では、背部に提示された異なる 4 つの図形を被験者が正しく認知可能か調べ、4 つの異なる条件で行った。それぞれの条件は下記の通りである。

1. グローブや触覚ベストを装着せず素手で図形に触れる
2. グローブは装着し、触覚ベストを装着せず図形に触れる
3. グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形をリアルタイムに背部に提示する
4. グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形を左から 1 列ずつ振動子を駆動して背部に提示する

全ての実験において人差し指の第一関節を刺激対象とし、背部へのマッピングを試

みた。圧力センサは $10 \times 10 = 100$ 点まで計測が可能であるが、本実験では背部への刺激可能最大数（ボイスコイル型振動子 80 個）に 1 対 1 で対応させるため、 $10 \times 8 = 80$ 点の圧力検知点を使用している（図 5-10）。また、指 1 本では約 900Hz で計測が可能であるため、親指、中指は検知せず実験を行った。センシンググローブと触覚ベストはそれぞれ USB ポートを介して PC と接続しており、PC 側から受信した情報に基づき触刺激を提示した。

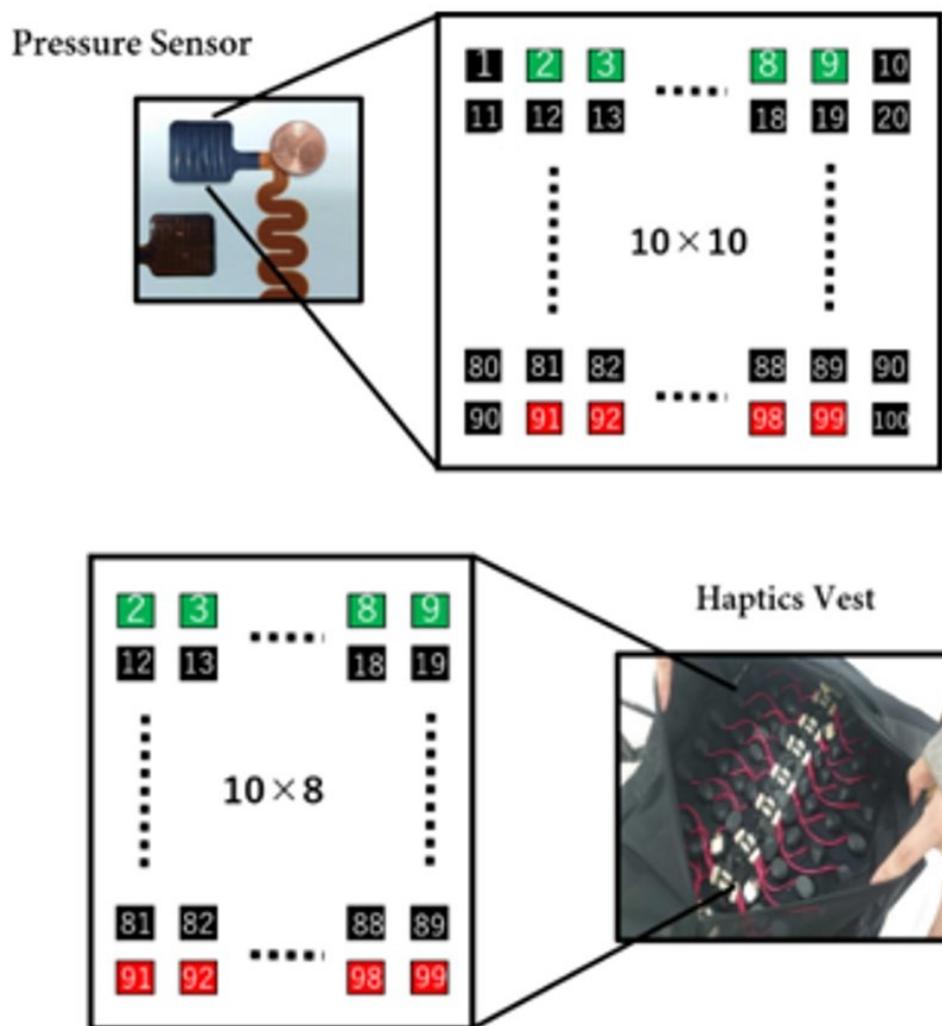


図 5-10：圧力センサと触覚ベストのボイスコイル型振動子の対応関係（圧力センサとボイスコイル型振動子は空間的に 1 対 1 で対応している。また、圧力センサは 10×10 の行列に対し、触覚ベストが 10×8 であるため、圧力センサの両端 1 行のデータは無視している）

5.4.1 実験の条件および環境

実験1では、センサグローブおよび触覚ベストの組み合わせを用いて背部に提示された角度の異なる直線を、被験者が正しく認知可能か調べた。提示される直線の傾きは、水平、垂直、右に45度、左に45度の4種類であり、(ここではそれぞれ“-”, “|”, “\”, “/”の記号で表す)4つの異なる条件で提示した。

- 1.グローブや触覚ベストを装着せず素手で直線に触れる
- 2.グローブは装着し、触覚ベストを装着せず直線に触れる
- 3.グローブと触覚ベストを装着し直線に触れる
- 4.触覚ベストだけを装着し、背部に直線を提示する

条件2は高齢者を模した条件であり、条件3はシステムを利用した時の条件である。条件4はベスト単体のスペック評価するために設けた。直線の太さは直径1mmであり、本実験で使用している圧力センサの圧力検知間隔より小さいものを使用している。本実験で使用した直線と、圧力センサの出力を下記図5-11に示す。

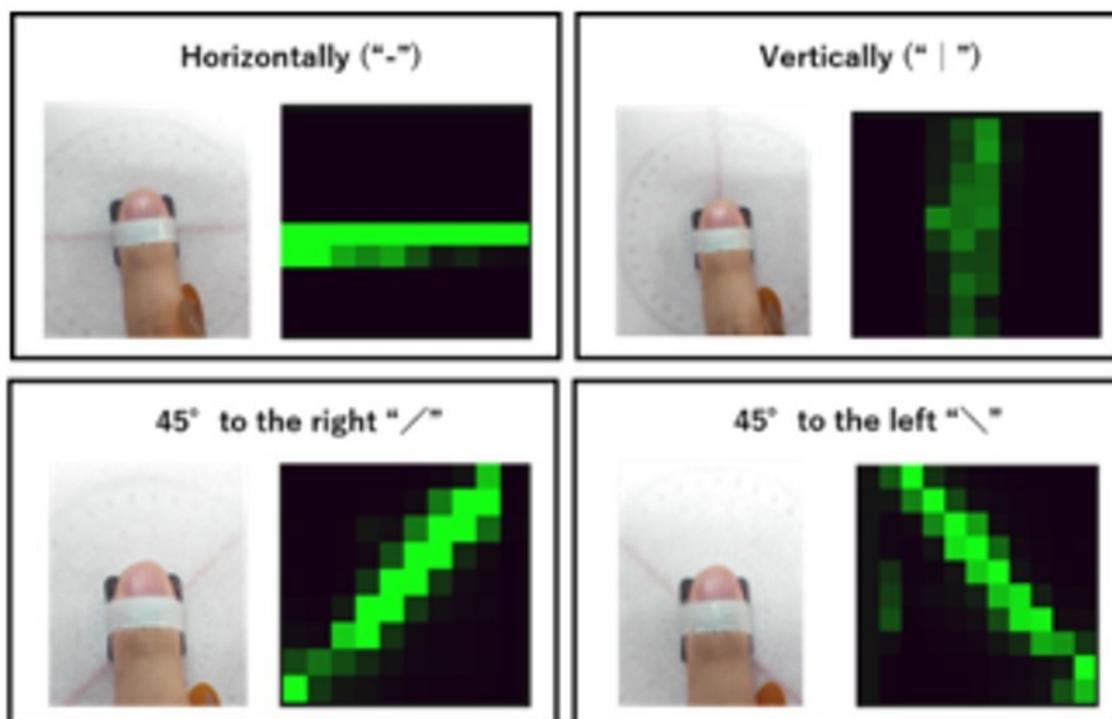


図 5-11：各直線における圧力センサの出力

本実験の被験者は9人(18歳~42歳, 女性3人, 男性6人)であり、全員が右利きである。被験者は、1.グローブや触覚ベストを装着せず素手で直線に触れた場合、2.グローブは装着し、触覚ベストを装着せず直線に触れた場合、3.グローブと触覚ベスト

を装着し直線に触れた場合、4.触覚ベストだけを装着し、背部に直線を提示した場合で実験を行った。今回はすべての被験者でこの順で行った。まず素手での実行はほぼ100%正答することは事前実験でわかっており、どのようなパターンが用意されているかを学習させるために最初に行うと都合が良かったためである。また4条件の体験の感覚はそれぞれ大きく異なるため学習効果は少ないと想定した。

4種類の直線の傾きをそれぞれ5回ずつランダムに合計20回提示した（総試行回数は、4種類の触覚条件と20回の試行回数で合計80回）。各試行では1つの直線を机の上に設置し、被験者が対象に触れた後、知覚した直線の傾きを答える。被験者は直線を上部から1度のみ触れ、指を左右上下に動かす事は制限された。5秒以内に直線の傾きを回答し、各直線に対する正答率を記録した。

なお、触覚条件毎に1分間のトレーニングを設け、自由に直線に触れてもらった。実験開始前に被験者にヘッドホンを被ってもらい、ホワイトノイズを聞かせた。また、各条件が終了するまで閉眼させた（図5-12）。

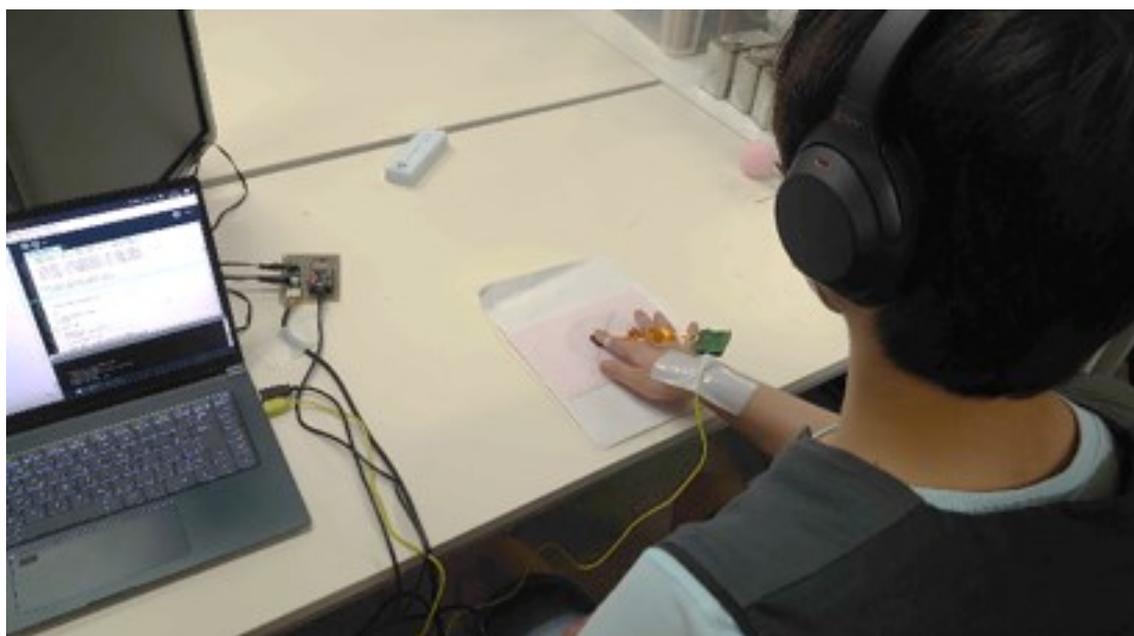


図 5-12：被験者の様子

5.4.2 実験結果

実験の結果を表5-1および図5-13に示す。全ての力触覚条件と図形の組み合わせにおいて、平均90%以上の高い正答率を記録した。また、触覚ベストだけを装着し、背部に直線を提示した場合でも平均94%の高い正答率を記録している。ただし、本実験

においてはグローブを装着したのみの条件でも正答率は非常に高く、触覚ベストによる効果を見る事は出来なかった。

表 5-1：それぞれの条件における直線の傾きの正答率

		Response			
		\	/		—
Presented Lines	\	97.8%	0.0%	2.2%	0.0%
	/	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
		2.2%	0.0%	97.8%	0.0%
	—	0.0%	4.4%	0.0%	95.6%

		Response			
		\	/		—
Presented Lines	\	86.7%	0.0%	4.4%	8.9%
	/	0.0%	88.9%	2.2%	8.9%
		0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
	—	2.2%	8.9%	0.0%	88.9%

		Response			
		\	/		—
Presented Lines	\	95.6%	2.2%	0.0%	2.2%
	/	0.0%	93.3%	2.2%	4.4%
		0.0%	0.0%	100.0%	0.0%
	—	2.2%	0.0%	0.0%	97.8%

		Response			
		\	/		—
Presented Lines	\	97.8%	0.0%	0.0%	2.2%
	/	2.2%	97.8%	0.0%	0.0%
		4.4%	2.3%	93.3%	0.0%
	—	4.4%	2.2%	0.0%	93.3%

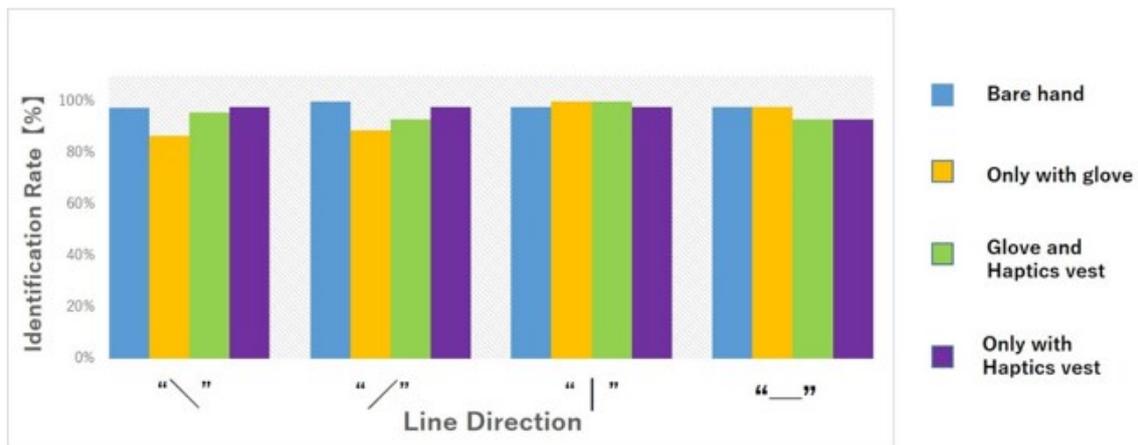


図 5-13：それぞれの条件における直線の傾きの正答率

5.5 実験 2：背部における図形の認知評価

5.5.1 振動周波数を 350Hz に設定した条件

実験 2 ではまず、実験 1 で使用した振動子の振動周波数（350Hz）を用いて振動刺激を行った。センサグローブおよび触覚ベストを用いて背部に提示された異なる図形

を、被験者が正しく認知可能か調べた。提示される図形はバツ、丸、三角、四角の 4 種類である（ここではそれぞれ“×”、“○”、“△”、“□”の記号で示す）であり、4つの異なる条件で提示した。

- 1.グローブや触覚ベストを装着せず素手で図形に触れる
- 2.グローブは装着し、触覚ベストを装着せず図形に触れる
- 3.グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形をリアルタイムに触覚転移する
- 4.グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形を左から 1 列ずつ振動子を駆動して背部に提示する

図形の枠線の太さは 1mm であり、図形の大きさは 1.5cm × 1.5cm である。実験 1 と同様に、被験者は図形を上部から 1 度のみ触れ、指を左右上下に動かす事は制限された。5 秒以内に回答し、各図形に対する正答率を記録した。本実験で使用した直線と、圧力センサの出力を下記図 5-14 に示す。

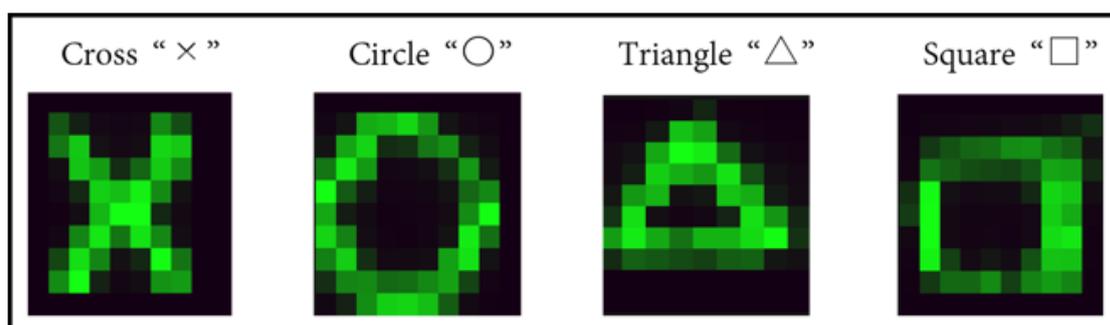


図 5-14：各図形における圧力センサの出力

5.5.2 実験の条件および環境

実験手順は実験 1 と同じである。被験者は 1.グローブや触覚ベストを装着せず素手で図形に触れた場合、2.グローブは装着し、触覚ベストを装着せず図形に触れた場合、3.グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形をリアルタイムに力触覚転移した場合、4.グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形を左から 1 列ずつ振動子を駆動して背部に提示した場合の順に実験を行った。それぞれの条件の順序をランダム化して行った。

なお、人間の背部は複数の点数で同時に刺激されても、刺激点数を答えられないほど空間解像度が低い[63]。予備的な実験として、背部の中心に収まる大きさの図形の模型を押し当てた時、半分の被験者は図形を正しく識別できなかった。そのため、1 列ずつ振動子を駆動する事で同時に刺激される刺激点数を減らし、100msec 毎に 1 列

ずつ駆動させる条件を加えた (図 5-15). 視聴覚者衝撃者向けのデバイスとして, マトリクス状に並べた振動子の 1 列毎の駆動間隔は長いほど腕等に提示されている図形の識別率が高くなる報告があり [74], 本システムにおける図形の正答率を引き上げられると考え, 本条件を実装した. ただし, 本システムでは作業等での指先の力触知覚能力向上を目的としているため, リアルタイム性が求められる. 今回は著者が最も 1 列の駆動間隔が短く, なおかつ提示された図形の正答率が高い 100msec を振動間隔と定めた. 本実験の被験者は 11 人 (18 歳~70 歳, 女性 3 人, 男性 8 人) であり, 全員が右利きである. また, 9 人は実験 1 に参加した被験者である.

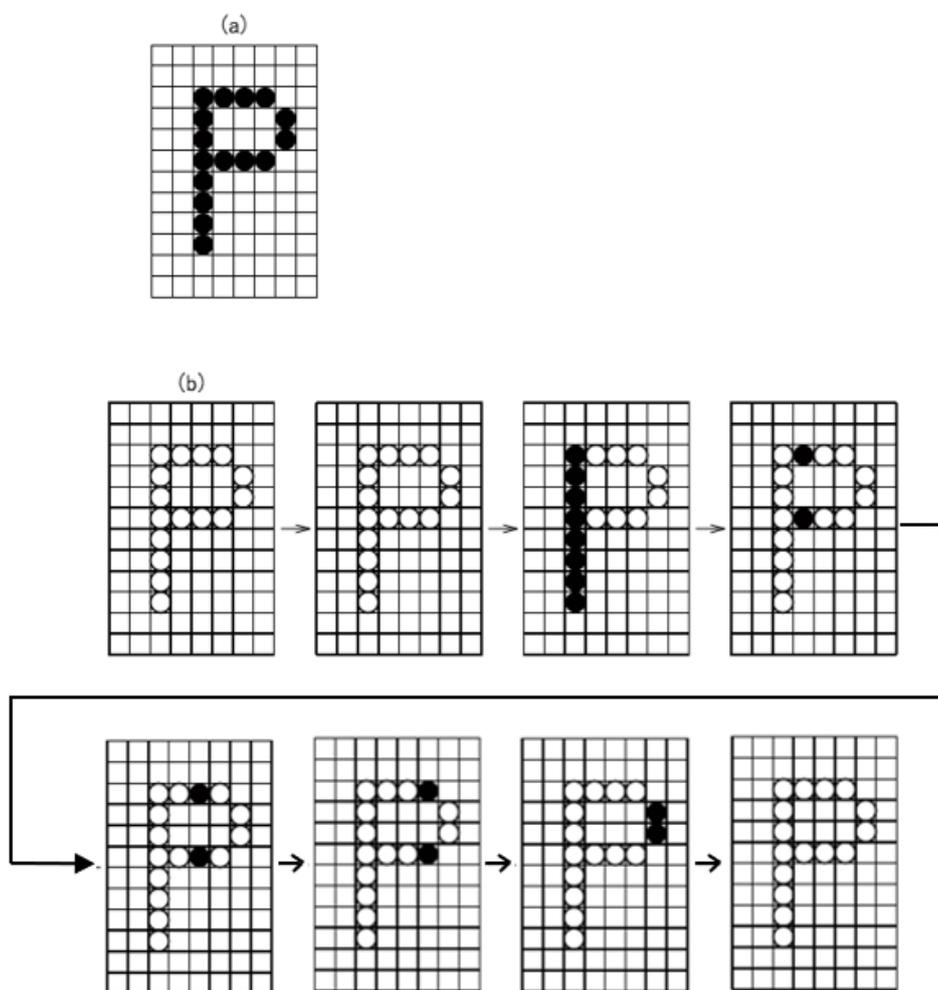


図 5-15 : 100msec 間隔で 1 列ずつ駆動する方法図【特許(1)図より】(例として, a)P の文字を b)左から 1 列ずつ 100msec 間隔で駆動する)

5.5.3 実験結果

まず、力触覚の提示条件の識別率の平均を比較すると、素手：95.6%、グローブのみ：41.8%、グローブと触覚ベストでリアルタイムに転移：50.5%、グローブと触覚ベストで1列毎に転移：60.0%であった。グローブのみの条件より、触覚ベストを使用する条件では高い識別率を記録した。また、グローブを装着した状態での図形識別率が平均41.8%であり、素手で触れる条件と比べ(95.8%)、識別率が著しく低下する事が分かる。今回用いたグローブは前述のように日常的に利用される革製のグローブと同等のものであるが、それでも力触覚は著しく阻害されることがわかる。またこれにより、本章の目的の一つである「加齢や作業環境による力触覚の低下」を模擬できるといえる。特に“○”と“□”を、“△”と答えた人が20%以上おり、どの図形も中央に空白がある事が、識別率を低下する要因に繋がったと考えられる。反対に“△”を“×”と答えた人が43.6%、“×”を“△”と答えた人は27.2%いた。他の図形と比べ斜めに傾く直線を含む事が、判別を困難にさせたと推測できる。また、すべての条件において図形の形が近い“□”と“○”の混同が多い(図5-16)。

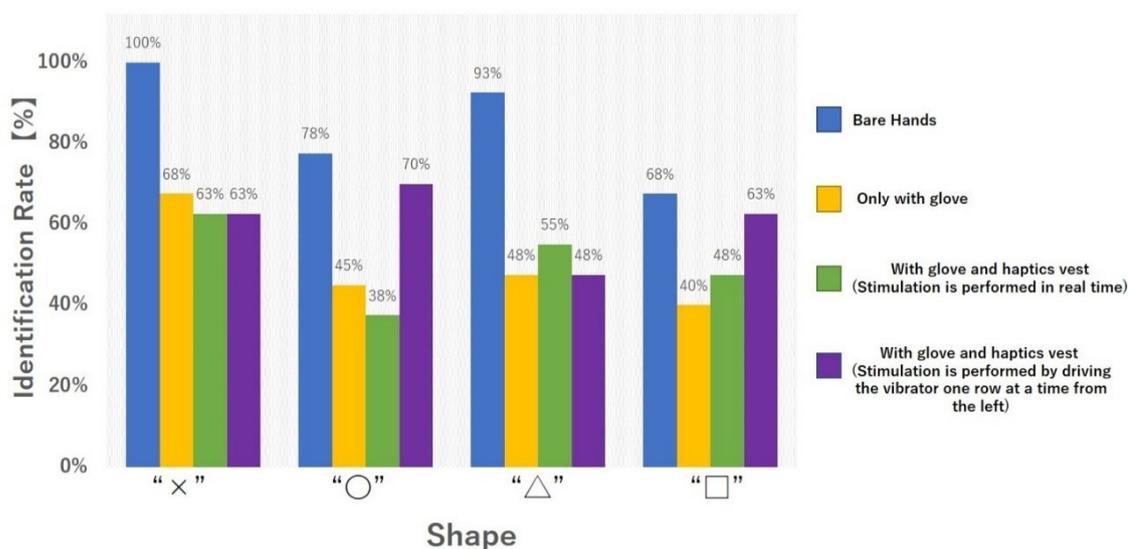


図 5-16：それぞれの条件における図形の正答率

力触覚提示の4条件と、図形の違いによって、正答率に差がみられるかどうかを検証するため、独立変数を力触覚提示の種類と図形の種類、従属変数を正答率とする対応のある2要因の分散分析と多重比較を行った(図5-16)。その結果、触覚提示の条件の主効果は優位であり($p < .05$)、素手で図形に触れる条件がその他の触覚提示条件と比較して有意に評価が高い。

5.5.4 考察

実験 1 と比較すると、実験 2 では全ての力触覚条件での識別率が低い。触覚ベストを使用した 2 つの条件では、グローブのみを使用した場合と比較すると有意な差が無い。これは連続的で 1 本の線で構成されている直線と比べ、図形は頂点や直線の組み合わせが多く、背中の力触覚の空間解像度は低いことから簡単な図形でも正しく識別できなかったと推測する。また、本実験では高い周波数(350Hz)で背部を刺激した事が正答率の低下に繋がった可能性がある。背部は有毛部のためパチニ小体とルフィニ終末、マイスナー小体が分布するが、振動に応答する受容器はパチニ小体とマイスナー小体である。350Hz に特に強く応答する受容器はパチニ小体であり、振動検出閾値は周波数の増加とともに急激に減少し、100~300Hz で極小値となる。受容野が広く刺激に応答する境界が不鮮明なタイプである事から、350Hz の振動周波数は空間解像度をさらに落としてしまった事が推測される[93]。

5.5.5 振動周波数を 50Hz に設定した条件

実験 5.5.1 では、振動周波数を 350Hz に設定した事で、背部の空間解像度が低下し、正答率が低下したと考察した。本節では振動周波数を 50Hz に設定し、再度実験 5.5.1 と同様の実験を行う。50Hz の振動周波数に応答する受容器はマイスナー小体であり、特に低い周波数に応答する。受容野境界がはっきりしているため、図形の頂点の数や角の位置を正しく知覚できると推測する。(ただし、矩形波でボイスコイル型振動子を駆動しているため、高調波成分は Pacini が応答すると考えられる)

本実験は、実験 5.5.1 と同様の条件と環境の中で行った。センサグローブおよび触覚ベストを用いて背部に提示された異なる図形を、被験者が正しく認知可能か調べた。提示される図形はバツ、丸、三角、四角の 4 種類である(ここではそれぞれ"×"、"○"、"△"、"□"の記号で示す)であり、4 つの異なる条件をランダム化した順に提示した。

1. グローブや触覚ベストを装着せず素手で図形に触れる
2. グローブは装着し、触覚ベストを装着せず図形に触れる
3. グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形をリアルタイムに触覚転移する
4. グローブと触覚ベストを装着し、触れた図形を左から 1 列ずつ振動子を駆動して背部に提示する

5.5.6 実験の結果および考察

図 5-17 に実験の結果を示す。力触覚の提示条件の識別率の平均を比較すると、素手：85.8%、グローブのみ：38.0%、グローブと触覚ベストでリアルタイムに転移：

53.8%，グローブと触覚ベストで1列毎に転移：55.8%であった。グローブのみの条件より、触覚ベストを使用する条件では高い識別率を記録した。また、グローブを装着した状態での図形識別率は、素手で触れる条件と比べ、識別率が著しく低下した。この結果は、実験 5.5.1 で行った結果と変らなかった。

力触覚提示の 4 条件と図形の違いによって、正答率に差がみられるかどうかを検証するため、独立変数を力触覚提示の種類と図形の種類、従属変数を正答率とする対応のある 2 要因の分散分析と多重比較を行った。その結果、触覚の種類の主効果は優位であった ($p<.05$)。素手で図形に触れる条件がその他の触覚提示条件と比較して有意に評価が高い。

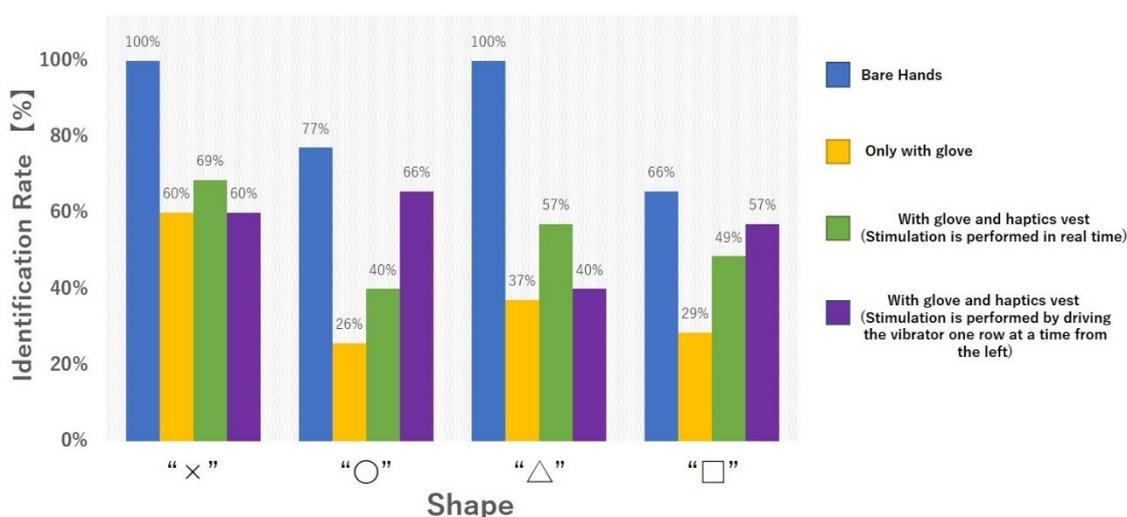


図 5-17：それぞれの条件における図形の正答率

結果として、素手以外の条件で比べてみると、背部を刺激する振動周波数を 50Hz に変更しても結果に差異は観察されなかった。原因としては、主に 2 つの要因が考えられる。1 つはデバイスにおけるリミテーションである。ベスト型デバイスに搭載されている振動子は全て確実に肌に密着させる必要がある。しかしながら、幅広い年齢層の被験者の身体幅に合わせられるようにユニバーサルなデザインを設計していることから、背部表面と提示デバイスとの接触が不安定になっていた可能性がある。また、選定した振動子の特徴として、共振周波数の 160Hz を基準として振動振幅が単調に減衰していき、50Hz では最も低くなる事も影響したと考える。2 つ目は人間の背部におけるリミテーションである。背部の空間解像度が身体他の部位と比較しても低いことから、背部への最適な力触覚提示手法としてその他の力触覚提示手法を検討する必要があると考える。例として、刺激の周期を 1Hz から 5Hz の更に遅い周波数に設定し、垂直方向の圧覚を背部に提示する事が考えられる。この刺激に反応する触覚受容器はメ

メルケル触盤である。メルケル触盤は垂直方向の変形や圧力の変化に反応し、受容野境界がはっきりしているため、本実験の結果より高い図形の識別率が期待できると考える。また、本システムは、図形を判別する実験において接触による触覚情報を誤解無く伝えるためには押下力（圧力の分布情報）をリニアする必要があると考え実装を行った。背部が指と比較して空間的、そして時間的な分解能が低い（[63]）事を鑑みると、図形を正しく判別するだけであれば、ボイスコイル型振動子をリニアに出力させる必要性は無く、最大の出力で駆動させた方が刺激が強くなり、図形の識別率が高くなる可能性がある。

以上より、「加齢や作業環境による力触覚の低下」を模擬したグローブを装着した条件と比較して、本システムを使用した場合では1部の図形の識別率が高くなる事は分かったが、全ての図形を誤解無く触覚転移するのは更なるハードルを越える必要がある。図形の識別率を高くするためには、他にも頂点部分のみに力触覚を付与する方法や、複数指を用いた触図手法が挙げられる。頂点の強調により角の位置や数を把握することが可能となり、図形を認識するための特徴を捉えやすくなると考えられる。また、実在する物体の触図では複数指で触れることで認識する事が多い。今回の実験では人差し指に限定しており、今後は複数指の背部への触覚転移を試みる。また、被験者は上下左右に指をなぞる事を制限されていた。人は物体の形や材質を確かめる時、指先のせん断力や加えた力の大きさの情報を頼りに触感を評価する。今後は指の動きを制限せず、指腹部の重力方向へのせん断力を加えた場合、図形の識別率が変化するか調べる。

5.6 試作アプリケーションおよびデモ

HARVEST を用いて、簡単なアプリケーションおよびデモの開発を行った。閉眼時にでも、豆腐を崩さず箸を用いて持ち上げる動作を、HARVEST を着用した状態で行ってもらおう。作成したアプリケーションでは、本実験では、センシンググローブとして一つ前のバージョンである親指と人差し指のみに対応するもの（一本指あたり 5×10 点）を装着した。被験者はベスト型デバイスと、親指と人差し指に対応するセンシンググローブを装着する。箸を持ち、約 5cm 角に切られた絹ごし豆腐が置かれた皿の真上で停止する。被験者は目を閉じ、停止した位置から箸を用いて豆腐を掴み 15cm 持ち上げ、5 秒後に皿に置く。実験条件は、HARVEST を用いていない条件（背部振動触覚提示無し）と、HARVEST を用いた条件（背部振動触覚提示有り）の 2 条件で行った。実験時は閉眼させた。この実験では、振動周波数は 350Hz に一定とした。

被験者は研究室に出入り可能な地域に住んでいるメンバー 5 名（男性 4 名、女性 1

名)であり、右利きが4名、左利きが1名である。なお、グローブを一種類しか用意していなかった関係で、左利きの被験者にも、右手を用いて実験を行ってもらった。



図 5-18 : 閉眼状態で箸を用いて豆腐を持ち上げる被験者の様子

まず、HAVEST を用いていない条件（背部振動触覚提示無し）で、目を閉じた状態で絹ごし豆腐を持ち上げてもらったが、全員が絹ごし豆腐を持ち上げる事ができなかった。絹ごし豆腐はとても柔らかく、視覚情報が無い状態だと持ち上げるのは困難であった。

次に、HARVEST を用いた条件（背部振動触覚提示有り）で行ったところ、利き手で実験を行った被験者では、4人中3人が初回でこのベストを用いて絹ごし豆腐を、目を閉じた状態で持ち上げる事ができた。被験者は、「閉眼時でもほぼ感じ取れない箸越しの豆腐の感覚を、わずかな力の入れ具合で触知覚体験を強力に支援されたと感じた」とコメントしており、トレーニングを行う事なく、触知覚能力を拡大したことに成功したといえる。

同時に、左利きの人も右手を用いて箸で絹ごし豆腐を持ち上げる事に成功した。以上の実験結果から、指先から得ることができる微細な振動刺激を、背中などの別部位に転移する事で、指先の触知覚能力を強力に支援できる事を実証することができたのではないかと考える。

5.7 第5章のまとめ

本章では、「分布的触覚」に着目した力触覚転移手法に着目し、特に、指皮膚と接触物体との分布情報の力触覚転移を試みた。指皮膚の分布情報を、大量のボイスコイル型振動子を用いて背部に提示可能なベストが触覚デバイスを試作した。また、指先の圧力分布を2mmの間隔で100点まで検知できるセンシンググローブを用意し、触覚ベストと組み合わせて、指先の力触覚を背部で再建可能か調べた。開発したデバイスとシステムのハードウェア評価を行い、最後に2種類の知覚実験を行った。グローブと触覚ベストを用いた時は、グローブのみを装着した状態と比べると、図形を正しく認知できるが、触覚提示の条件間には有意な差は観察されなかった。一方で、閉眼時において豆腐を崩さず箸を用いて持ち上げる事ができ、手先の力触覚能力を背部に代行する目的に対し、期待していた一定の効果は得られたと結論付けられる。

本実験では、システムを用いる事で、直線の傾きや図形を正しく識別できる可能性は見出したが、このシステムが目指している高齢者の指先の力触覚の再建や、作業時における指先の力触覚能力の拡張などに適用するには、更なるハードルを越える必要があると考える。具体的には今後の課題として、訓練による脳内再マッピングを前提とした実験を設計し、訓練時間を設ける事でどの程度違和感が軽減し、訓練によって納得感が得られる様になるか調査する。また、複数指に対応した振動刺激のマッピング調査や、指の空間座標に合わせた背部への提示部位調査を行う。こうした評価を通じて、本研究が人間の力触覚能力を本来よりも高く引き上げる事ができるか検証していく。

第6章

結論

本論文の目的は、指先の力触覚情報を身体の異部位に転移する事で、デバイスの実現可能性を担保する事である。設計・開発した異部位力触覚転移デバイスを基に、力触覚インタラクションのリアリズムを向上させるための要件を明らかにする事を目的とした。

本研究では特に、1)「分布的触覚を含まない力触覚」と2)「分布的触覚」にそれぞれ着目した異部位力触覚提示デバイスを構築し、それぞれのデバイスの設計・開発に関する研究について述べた。各着目した感覚の研究の背景を述べ、それに則した目的を設定し、具体的な実装および評価を行い、本論文の目的の達成を目指した。以下では、それぞれの感覚提示で実現した力触覚提示デバイスのデザインと手法についてまとめ、本研究によって導かれる結論を示す。

6.1 分布的触覚を含まない力触覚に着目した前腕への 力触覚転移

指先が知覚する「力の大きさおよび方向」に着目し、腕に力触覚を転移するデバイスのコンセプトを提案し、試作機を開発した。試作機には5節のリンク機構を採用する事で、腕に対し平面2自由度の力覚提示を実現した。指に加わる「力の大きさおよび方向」を異部位で提示し、提示された力触覚を指が知覚するものと同じように、違和感無く解釈可能かどうか調べる事を目的とした。また、指に対応する提示される力触覚が誤解無く伝わるかどうか調べ、VR物体を把持して操作する際の、体験のリアリズムと操作性について評価した。

6.1.1 本研究の成果

被験者実験では、VR物体を把持して操作するタスクを評価した。結果として、試作機を用いた前腕への指先の力触覚提示は、体験の違和感が少なく、力触覚が提示されない場合と比較して、リアリズムが向上する事が分かった。また、VR物体と相互作用

する指に対し、振動触覚を提示した場合と比較しても、同様のリアリズムを生起させられる結果となった。この実験結果から、本研究の目的である異部位への「分布的触覚を含まない力触覚」の力触覚転移で、「自然」と思える力触覚提示が達成されたと結論づけられる。

6.1.2 前腕への力触覚転移デバイスの課題

本実験では「違和感」と「リアリズム」の抽象的な言葉を用いて評価を行ってきた。しかしながら、「違和感」と「リアリズム」だけでは、体験全体の評価として規定する事はできず、デバイスの重量や臨場感、使いやすさ、提示力の解釈のしやすさ等、様々な側面から評価する必要があると考える。また、今回の実験では、指への振動触覚との比較をおこなったため、指への「力」提示との比較を行っていない。今後の展望として、指への「力」を提示する力触覚提示デバイスとの比較を行い、触覚インタラクションの設計がどの様に変化するか観察する。

6.2 分布的触覚に着目した背部への力触覚転移

指先の皮膚刺激および分布刺激に着目し、背部に力触覚を代行可能なデバイスのコンセプトを提案し、試作機を開発した。試作機のベスト型デバイスには、88個のボイスコイル型振動子を設置し、ユーザの背部に振動刺激が提示される。さらに、ユーザの指に圧力分布を合計で100点検知可能なセンシンググローブと組み合わせ、指の皮膚分布を背部に対応させた。

6.2.1 本研究の成果

ベスト型触覚提示デバイスとセンシンググローブを装着し、グローブを装着した状態では知覚が困難な小さな図形の形を、閉眼の状態でも回答させた。結果としてグローブと触覚ベストを用いた時は、グローブのみを装着した状態と比べると、図形を正しく認知できる事が分かった。また、閉眼時において、豆腐を崩さず箸を用いて持ち上げる事ができた。この実験結果から、手先の力触覚能力を、特に、「分布的触覚」を背部に代行する目的に対し、期待していた効果が得られたと結論付けられる。

6.2.2 背部への力触覚転移デバイスの課題

複雑な図形や物体の力触覚情報を背部に転移した場合では、期待していた効果が得

られなかった。これは、50Hz、350Hz の異なる周波数でそれぞれ背部を刺激した条件でも結果は変わらなかった。原因の1つとして、人間の背部におけるリミテーションが支配的であると考え。同様の考察を第5章でも行ったが、背部の空間解像度が身体の他の部位と比較しても低い事から、背部への最適な力触覚提示手法としてその他の力触覚提示手法を検討する必要があると考え。例として、刺激の周期を1Hz から5Hz の更に遅い周波数に設定し、垂直方向の圧覚を背部に提示する事が考えられる。この刺激に反応する触覚受容器はメルケル触盤である。メルケル触盤は垂直方向の変形や圧力の変化に反応し、受容野境界がはっきりしているため、図形の頂点の数や角の位置を正しく知覚できると推測する。

本実験は、対象物を触れる指の向きと、指皮膚の刺激点と対応して刺激される背部の部位の空間的配置が同じであった。そのため、指の向きに応じて、背部の対応する刺激部位を変化させる必要は無かった。本システムを用いてVRやAR等の様々な用途で用いる事を考えると、対象物に触れる指の向きは常に変化する。指の向きが変化する事で、指に対応する背部の刺激部位は空間的に一致しなくなる。そのため、ユーザに誤解無く力触覚情報を伝える事が困難になる事が予想され、分布的触覚を含まない力触覚の転移が持つ大きな課題である。このように、指に拘束条件を与えず自由に物体に触れてもらう際には、指に対応する背部の空間的な配置を指の向きに合わせて変化させる等の、アルゴリズムの工夫が必要であると考え。

6.3 今後の展望

6.3.1 分布的触覚と分布的触覚を含まない力触覚転移デバイスの併用

本研究では分布的触覚と分布的触覚を含まない力触覚の2つの力触覚情報に着目し、それぞれの目的に則したデバイスを試作した。腕への力触覚転移デバイスは多自由度の力提示が可能であり、VR物体を把持した際のリアリズムに大きく寄与する事が分かった。また、背部への力触覚転移デバイスは、圧力の分布情報を転移するものであり、エッジ等の分散された力触覚情報を伝達可能である。両方のデバイスを一つのシステムとしてまとめ、同時に2つの力触覚情報を提示する事で、誤解無く力触覚情報を提示できる可能性がある。或いは状況に応じて使い分ける事で、それぞれのデバイスが表現できない力触覚情報を補い合う事も可能である。

一方で、本研究で試作した2つのデバイスは力触覚提示部位がそれぞれ異なり、前腕と背部の2カ所である。一つの体験に対し、2ヶ所に力触覚情報が提示されるシステムには、ユーザの混乱を招く事も考えられる。今後の展望として、十分なトレーニ

ング時間を与える事で、指の力触覚情報を身体の 2 カ所に分けて転移させても、誤解無く力触覚情報を体験と対応付け可能かどうか調べる。また、分布的触覚と分布的触覚を含まない力触覚を同時に 1 カ所の身体部位に提示可能なシステムの開発を試みる。

6.3.2 他の感覚での感覚代行の検証

本研究では、指先の力触覚を身体の異部位に力触覚で提示する事を手段として行われた。実験の条件では、常に力触覚を力触覚で代行する条件で行われていた。より実用的でシンプルな構成として、指先の力触覚を異部位の力触覚提示として代行するのではなく、他の感覚と組み合わせてマルチモーダルな状況も想定すべきである。つまり、“音”や“光”といった、聴覚、視覚で代行する事である。

視覚障害者が音を聞いて、視覚的な情報を聴覚で代行している事を鑑みると、力触覚情報もモーダルを変えて身体に刺激することは検証に値する。高品位なインタラクション、つまりリアリズムを追求する場合は、目的の達成は困難である事が予測されるが、タスクの遂行時間といった評価の指標では、同等の結果を得られる可能性がある。触覚インタラクションの目的によって、最適な感覚代行手法の議論と検証をする必要があると考える。

6.3.3 異部位への力触覚転移

本研究では指に加わる「分布的触覚を含まない力触覚」と「分布的触覚」の2つに着目し、身体の異部位に転移するデバイスを試作した。2つのデバイスから提示される感覚はユーザにとって全く新しい新鮮なものであり、指の感覚と即座に対応付ける事は困難である事は容易に想像できる。特に、感覚義手の様な記号的な力触覚パタンの提示とは異なり、提示される力触覚情報をインタラクションと対応付ける事も難しい事が考えられる。VR空間内での指への力触覚提示はトレーニングせずとも、その場でリアルに感じられる事を重視してきたが、本研究で提案した力触覚の異部位転移ではトレーニング時間が必要となる事が予想される。

感覚義手と同様に、力触覚転移デバイスを用いる場合では、はじめは不自然で違和感が生じて、トレーニングを行う事によって違和感の低減が期待できる。ヒューマンインタフェースの分野においても、例えばタッチパネルの研究において、キーボードには存在したクリック感がタッチパネルに存在しない事を問題として取り上げ、これを振動等によって再現している。一方で、最初に触れるコンピュータシステムがスマートフォンであるような現代の若者世代にとっては、もはやキーボードのクリック

感は必要なく、スマートフォンでの入力速度がキーボードを凌駕しているという観察さえ存在する。つまり VR においてヒューマンインタフェース全般においても、少なくとも自然さは容易に再学習可能である視点から、VR 物体の操作に必要な重要な情報を十分に伝達する事で、現在の触覚提示デバイスに代わる新たな力触覚提示手法の 1 つになりうると考えている。

謝辞

修士1年から梶本研究室に配属され、当時はまさか博士まで進学するとは思っていませんでした。ここまでこれたのも、ひとえに、梶本先生のご指導があったからこそだと思います。学部の時、勇気をもって先生にコンタクトしたあの瞬間、思えば運命の分かれ道でした。

配属の許可を頂いて、いざ研究を始めると同時に、学生さんのレベルとセンスの高さに圧倒されました。そんな中、当時修士2年の今さんのお手伝いとして、SIGGRAPH2017に参加した事で、研究に対するモチベーションが爆上がりしました。あれがターニングポイントだったと思います。

その後、先輩と後輩のサポートを頂きつつも、Haptics Symposium, SUI, SIGGRAPH等、色んな学会に参加して更なるスキルアップを目指して頑張ってきました。修士のころは採択や受賞は、後輩でありつつ、配属同期の宮上君、小林君、亀岡君のサポート、研究の相談は同期の金子君や塩野入君、そしてチューターの西さんと博士の中村さんにサポート頂きました。皆さん本当にありがとうございました。

博士進学後は、同期になった高橋さんが本当に心の支えとなりました。二人三脚で同じ博士3年間を過ごせて楽しかったです。ドイツ特に楽しかったですね。またいつか、ツーリングを一緒にいきましょう。

そして、事務の松井さんと生田さん。提出がいつもぎりぎりになってしまい大変すみませんでした。温かく見守っていただき本当にありがとうございました。

そして、なんとといっても、博士まで見守り、一番のサポーターであった両親には、本当に感謝の気持ちでいっぱいです。ここまで育てて頂き、(かなりのご迷惑をおかけしましたが)本当にありがとうございました。何かしらの形で恩返しをします。

最後になりますが、初めての海外発表は修士1年のHaptics SymposiumでTechnical Paperでした。そして、最後の海外発表も博士3年のHaptics Symposiumで今度はToHのJournal Track (Best Paper Nominated)でした。ちょっとエモいですね。順当にレベルアップしたでしょうか・・・

実はまだまだ感謝した方々がたくさんいます。博士で採択された未踏のPMである稲見先生には、研究のやり方やそのほかのライフハック等たくさんのアドバイスを頂きました。そして、稲見PMのもと一緒にやってきた未踏の同期の4人も、本当に心の支えになりました。一生ものの友情が築けたと思います。そして、2年半お世話になった勤め先のチームメイトにも、感謝申し上げます。そして、梶本研・温泉部の皆様。研究内容から日々の悩みまで、フランクにお話しできる場でとても大事な部活でした。皆さん本当に有難う。

来年からは希望していた企業で働く事になります。コロナ等で環境が激しく変化していくなかでも、ここまでこれたのは色んな人に支えられ、環境に本当に恵まれていたからだと思います。これからも謙虚に、そして誠実に、研究・仕事、全てにおいてひたむきに頑張っていきたいと思います。皆様大変本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] HTC Vive <https://www.vive.com/jp/>
- [2] Oculus Rift <https://www.oculus.com/>
- [3] PlayStation VR <https://www.jp.playstation.com/psvr/>
- [4] T.H. Massie and J.K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in Proceedings of ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Nov.1994.
- [5] K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami and S. Tachi, "GhostGlove: Haptic Existence of the Virtual World", in Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2008.
- [6] C. Pacchierotti, A. Tirmizi and D. Prattichizzo, "Improving Transparency in Teleoperation by Means of Cutaneous Tactile Force Feedback," ACM Transactions on Applied Perception, vol. 11, no. 1, p. 4, 2014.
- [7] C. Antfolk, C. Balkenius, G. Lundborg, B. Rosen and F. Sebelius, "Design and Technical Construction of a Tactile Display for Sensory Feedback in a Hand Prosthesis System," Biomedical Engineering Online 9, article number : 50, 2010.
- [8] 新編 感覚・知覚ハンドブック, 大山正, 今井省吾, 和気典二 (1994), 誠信書房.
- [9] 講座<感覚・知覚の科学> 3 聴覚・触覚・前庭感覚, 内山, 朝倉書店, pp.102-177, 2008.
- [10] 内山恵二: 感覚・知覚の科学 3 触覚の生理学, 朝倉書店, pp.102-141, 2008.
- [11] J. Iqbal, N.G. Tsagarakis and D.G. Caldwell, "Four-fingered Lightweight Exoskeleton Robotic Device Accommodating Different Hand Sizes," in Proceedings of Electronics Letters, June 2015, Vol. 51, No.12, pp. 888-890, 2015.
- [12] H. Uchiyama, M. A. Covington, and W. D. Potter, "Vibrotactile Glove Guidance for Semi-Autonomous Wheelchair Operations," in Proceedings of Annual Southeast Regional Conference, pp. 336-339, 2008.
- [13] Y. Kim, J. Cha, I. Oakley, and J. Ryu, "Exploring Tactile Movies: An Initial Tactile Glove Design and Concept Evaluation," IEEE MultiMedia, 2009.
- [14] G. Sziebig, B. Solvang, C. Kiss, and P. Korondi, "Vibro-Tactile Feedback for VR Systems," in Proceedings of Human System Interactions, pp. 406-410, 2009.
- [15] M. Bergamasco, "Design of Hand Force Feedback Systems for Glovelike Advanced Interfaces," in Proceedings of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp. 286-293, 1992.

- [16] M. Bergamasco, "Haptic Interfaces: the Study of Force and Tactile Feedback Systems," in Proceedings of IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp. 15–20, 1995.
- [17] S. L. Springer and N. J. Ferrier, "Design and Control of a Force-Reflecting Haptic Interface for Teleoperational Grasping," *Journal of Mechanical Design*, vol. 124, no. 2, pp. 277–283, 2002.
- [18] Y. Tanaka, H. Yamauchi, and K. Amemiya, "Wearable Haptic Display for Immersive Virtual Environment," in Proceedings of JFPS International Symposium on Fluid Power, vol. 2002, no. 5-2, pp. 309–314, 2002.
- [19] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian, "The Rutgers Master II -New Design Force-Feedback Glove," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, pp. 256–263, 2002.
- [20] R. M. Pierce, E. A. Fedalei, and K. J. Kuchenbecker, "A Wearable Device for Controlling a Robot Gripper with Fingertip Contact, Pressure, Vibrotactile, and Grip Force Feedback," in Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 19–25, 2014.
- [21] R. M. Khurshid, N. Fitter, E. Fedalei, and K. Kuchenbecker, "Effects of Grip-Force, Contact, and Acceleration Feedback on a Teleoperated Pick-and-Place Task," *IEEE Transactions on Haptics*, May 2016.
- [22] D. Prattichizzo, F. Chinello, C. Pacchierotti, and M. Malvezzi, "Towards Wearability in Fingertip Haptics: a 3-DoF Wearable Device for Cutaneous Force Feedback," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 4, pp. 506–516, 2013
- [23] S.B.Schorr A.M,Okamura, "Three-Dimensional Skin Deformation as Force Substitution: Wearable Device Design and Performance During Haptic Exploration of Virtual Environments " *IEEE Transactions on Haptics*, Volume:10, Issue:3, pp418-430, 2017.
- [24] Y. Shimizu, S. Saida, and H. Shimura, "Tactile Pattern Recognition by Graphic Display: Importance of 3-D Information for Haptic Perception of Familiar Objects," *Perception & Psychophysics*, vol. 53, no. 1, pp. 43–48, 1993.
- [25] R. D. Howe, W. J. Peine, D. A. Kantarinis, and J. S. Son, "Remote Palpation Technology," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 318–323, 1995.
- [26] S.-C. Kim, C.-H. Kim, G.-H. Yang, T.-H. Yang, B.-K. Han, S.-C. Kang, and D.-S. Kwon, "Small and lightweight tactile display (SALT) and its application," in Proceedings of WorldHaptics, pp. 69–74, 2009.
- [27] I. Sarakoglou, N. Tsarakakis, and D. G. Caldwell, "A Portable Fingertip Tactile

- Feedback Array-Transmission System Reliability and Modelling,” in Proceedings of First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference, pp. 547-548, 2005.
- [28] J. C. Bliss, J. W. Hill, and B. Wilber, “Characteristics of the Tactile Information Channel”, National Aeronautics and Space Administration, vol. 1389, 1969.
- [29] “Human factors applications in teleoperator design and operation “, E. G. Johnsen and W. R. Corliss, Wiley-Interscience New York, 1971.
- [30] K. B. Shimoga, “A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation. II. Finger Touch Feedback,” in Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp. 271– 279, 1993.
- [31] Y. Kim, S. Kim, T. Ha, I. Oakley, W. Woo, and J. Ryu, “Air-Jet Button Effects in AR,” in Proceedings of Advances in Artificial Reality and Tele-Existence, pp. 384–391, 2006.
- [32] G. Moy, C. Wagner, and R. S. Fearing, “A Compliant Tactile Display for Teletaction,” in Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 4, pp. 3409–3415, 2000.
- [33] M. Gabardi, M. Solazzi, D. Leonardis, and A. Frisoli, “A New Wearable Fingertip Haptic Interface for the Rendering of Virtual Shapes and Surface Features,” in Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 140–146, 2016.
- [34] B. Gleeson, S. Horschel, and W. R. Provancher, “Design of a Fingertip Mounted Tactile Display with Tangential Skin Displacement Feedback,” IEEE Transactions on Haptics, vol. 3, no. 4, pp. 297–301, 2010.
- [35] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, “Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to Present Virtual Mass Sensation,” in Proceedings of ACM SIGGRAPH emerging technologies, p. 8, 2007.
- [36] A. Girard, M. Marchal, F. Gosselin, A. Chabrier, F. Louveau, and A. Lecuyer, “Haptip: Displaying Haptic Shear Forces at the Fingertips for Multi-Finger Interaction in Virtual Environments,” Frontiers in ICT, vol. 3, p. 6, 2016.
- [37] M. Cempini, M. Cortese, and N. Vitiello, “A Powered Finger– Thumb Wearable Hand Exoskeleton with Self-Aligning Joint Axes,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 2, pp. 705–716, 2014.
- [38] D. Leonardis, M. Solazzi, I. Bortone, and A. Frisoli, “A Wearable Fingertip Haptic Device with 3 DoF Asymmetric 3-RSR Kinematics,” in Proceedings of World Haptics Conference, pp. 388–393, 2015.

- [39] D. Tsetserukou, S. Hosokawa, and K. Terashima, "LinkTouch: A Wearable Haptic Device with Five-Bar Linkage Mechanism for Presentation of Two-DOF Force Feedback at the Fingerpad," in Proceedings of IEEE Haptics Symposium, pp. 307–312, 2014.
- [40] C. Pacchierotti, M. Solazzi and V. Hayward, " Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives " IEEE Transactions on Haptics, vol. 10, no. 4, pp. 580-600, 2017.
- [41] C. Antfolk, M. D'Alonzo, M. Controzzi, G. Lundborg, B. Rosen, F. Sebelius, and C. Cipriani, "Artificial Redirection of Sensation from Prosthetic Fingers to the Phantom Hand Map on Transradial Amputees: Vibrotactile Versus Mechanotactile sensory feedback," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 21, pp. 112–120, 2012.
- [42] T. Okano, K. Hirota, T. Nojima, M. Kitazaki, and Y. Ikei, "Haptic Feedback for Foot Sole Using Pneumatic Pressure Device," in Proceedings of ASIAGRAPH, 2016.
- [43] Y. L. Freng, C. L. Fernando, J. Rod, and K. Minamizawa, "Submerged Haptics: A 3-DOF Fingertip Haptic Display Using Miniature 3D Printed Airbags," in Proceedings of the ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, 2017.
- [44] A. Tobergte, P. Helmer, U. Hagn, P. Rouiller, S. Thielmann, S. Grange, A. Schaffer, F. Conti and G. Hirzinger, "The Sigma.7 Haptic Interface for MiroSurge: A New Bi-Manual Surgical Console," in Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011.
- [45] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in Proceeding of ASME Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, vol. 55, no. 1, pp. 295–300, 1994.
- [46] E. Battaglia, J.P. Clark, M. Bianchi, M.G. Catalano, A. Bicchi, M.K. OMalley, "The Rice Haptic Rocker: Skin Stretch Haptic Feedback with the Pisa/IIT SoftHand ," in Proceedings of IEEE World Haptics Conference, 2017.
- [47] T. Kameoka and H. Kajimoto, "Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs," in Proceedings of IEEE World Haptics Conferenc, July 6-9, 2021.
- [48] T. Kameoka, Y. Kon, T. Nakamura and H. Kajimoto, "Haptopus : Transferring the Touch Sense of the Hand to the Face Using Suction Mechanism Embedded in HMD", 6th ACM Symposium on Spatial User Interaction 2018.
- [49] E. Pezent, A. Israr, M. Samad, S. Robinson, P. Agarwal, H. Benko and

- N.Colonnese, “Tasbi: Multisensory Squeeze and Vibrotactile Forearm Haptics for Augmented and Virtual Reality”, in Proceedings of IEEE World Haptics, 2019.
- [50] T. Nakamura, N. Nishimura, M. Sato, and H. Kajimoto, “Development of a Forearm—Twisting Haptic Display using the Hanger Reflex,” in Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, no. 33, 2014.
- [51] A. A. Stanley and K. J. Kuchenbecker, “Evaluation of Haptics Feedback Methods for Forearm Rotation Guidance,” *IEEE Trans Haptics*, vol. 5, no. 3, pp. 240–251, 2012.
- [52] Y. Kuniyasu, M. Sato, S. Fukushima, and H. Kajimoto, “Transmission of forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin,” in Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference, no. 16, 2012.
- [53] F. Chinello, C. Pacchierotti, and N. G. Tsagarakis, “Design of a Wearable Skin Stretch Cutaneous Device for the Upper Limb,” in Proceedings of Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 14–20, 2016.
- [54] V. Yem, H. Kuzuoka, N. Yamashita, R. Shibusawa, H. Yano, and J. Yamashita, “Assisting Hand Skill Transfer of Tracheal Intubation Using Outer-Covering Haptic Display,” in Proceedings of the 30th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3177–3180, 2012.
- [55] S. Casini, M. Morvidoni, M. Bianchi, M. Catalano, G. Grioli, and A. Bicchi, “Design and Realization of the CUFF—Clenching Upper-limb Force Feedback Wearable Device for Distributed Mechano-Haptics Stimulation of Normal and Tangential Skin Forces,” in Proceedings of the IEEE International Conference of Intelligent Robots and Systems, pp. 1186–1193, 2015.
- [56] J. Felip, and A. Morales, “Robust Sensor-Based Grasp Primitive for a Three Finger Robot Hand,” in Proceedings of the IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [57] E. Chinellato, R.B. Fisher, A. Morales, and A.P. del Pobil, “Ranking Planar Grasp Configurations for a Three-Finger Hand”, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003.
- [58] A. D. Deshpande, Z. Xu, M. J. Vande Weghe, B. H. Brown, J. Ko, L. Y. Chang, D. D. Wilkinson, S. M. Bidic, and Y. Matsuoka, “Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed Hand”, in Proceedings of the IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 1, 2013.
- [59] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa, and M. Kaneko, “Development of a Highspeed Multifingered Hand System and its Application to Catching”, Proceedings of the

IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003.

- [60] D. Trinitatova, D. Tsetserukou, "TouchVR: a Wearable Haptic Interface for VR Aimed at Delivering Multi-modal Stimuli at the User's Palm", in Proceeding of SIGGRAPH Asia XR 2019.
- [61] Mai. Shibahara, Yem,Vibol, Katsunari. Sato, Hiroyuki. Kajimoto "Expression of 2DOF Fingertip Traction with 1DOF Lateral Skin Stretch," in Proceedings of AsiaHaptics 2016.
- [62] D. Sadihov, B.Migge, R.Gassert and Y.Kim, "Prototype Of A VR Upper-Limb Rehabilitation System Enhanced With Motion-based Haptics Feedback," in Proceeding of IEEE World Haptics, pp.449-454, 2013.
- [63] S. Weinstein, "Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex, and Laterality," D. R. Kenshalo (Ed.) The Skin Senses, Thomas, Springfield, IL, 1968.
- [64] J.C. Stevens and K.K. Choo, "Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span", Somatosensory & Motor Research, 13, pp.153-166, 2009.
- [65] A. Delazio, K. Nakagaki, R.L. Klatzky, S.E. Hudson, J.F. Lehman, and A.P. Sample, "Force Jacket: Pneumatically-Actuated Jacket for Embodied Haptic Experiences," in Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1–12, 2018.
- [66] U. Konishi, N. Hanamitsu, B. Outram, K. Minamizawa, T.Mizuguchi and A. Sato, "Synesthesia Suit: the Full Body Immersive Experience," in Proceedings of ACM SIGGRAPH VR Village, Article 20, 1, 2016.
- [67] P.E. Paredes, N. A. Hamadan, D. Clark, C. Cai, W. Ju, J.A. Landay, "Evaluating In-Car Movements in the Design of Mindful Commute Interventions: Exploratory Study. Journal of Medical Internet Research, e372, 2017.
- [68] N. Obushi, S. Wakisaka, S. Kasahara, K. Seaborn, A. Hiyama, and M. Inami. MagniFinger: Fingertip Probe Microscope with Direct Micro Movements. In Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 32:1–32:7, 2019.
- [69] H. Kawai, H. Itoh, T. Nakano, H. Kajimoto, and Y. Yanagida; Glove-Through Tactile Information Transmission System, in Proceeding of ACM Augmented Human, Article No. 10, 2019.
- [70] L.A. Johnson and C.M. Higgins, "A Navigation Aid for the Blind Using Tactile-Visual Sensory Substitution," in Proceeding of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference, 2006.

- [71] Y. Li, W.R. Jeon and C.S. Nam, "Navigation by Vibration: Effects of Vibrotactile Feedback on a Navigation Task," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol 46, pp76-84, March 2015.
- [72] C. C. Collins, "Tactile Television - Mechanical and Electrical Image Projection," *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 65-71, March 1970.
- [73] V. Yem, H. Kajimoto, K. Sato and H. Yoshihara, "A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation," *Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems*, pp.101-113, 2019.
- [74] S. Zhao, A. Israr, F. Lau and F. Abnoui, "Coding Tactile Symbols for Phonemic Communication," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, Paper 392, pp.1-13, 2018.
- [75] C. Antfolk, A. Björkman, S. O. Frank, F. Sebelius, G. Lundborg and B. Rosen, "Sensory Feedback from a Prosthetic Hand Based on Air-Mediate Pressure from the Hand to the Forearm Skin," *J. Rehabil. Med.*, vol. 44, no. 8, pp. 702-707, 2012.
- [76] G. Shi, A. Palombi, Z. Lim, A. Astolfi, A. Burani, S. Campagnini, F. G. C. Loizzo, M. Lo Preti, A. M. Vargas, E. Peperoni, C. M. Oddo, M. Li, J. Hardwicke, M. Venus, S. Homer-Vanniasinkam and H. A. Wurdemann, "Fluidic Haptic Interface for MechanoTactile Feedback," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 204-210, 2020.
- [77] K. R. Schoepp, M. R. Dawson, J. S. Schofield, J. P. Carey, and J. S. Hebert, "Design and Integration of an Inexpensive Wearable Mechanotactile Feedback System for Myoelectric Prostheses," *IEEE J. Transl. Eng. Heal. Med.*, Aug. 2018.
- [78] R. L. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan and K. Minamizawa, "ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays," in *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, vol, pp. 5452-5456, 2017.
- [79] Y. Kon, T. Nakamura and H. Kajimoto, "HangerOVER: HMD-Embedded Haptics Display with Hanger Reflex," in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, pp. 1-2, 2017.
- [80] C. Wang, D.-Y. Huang, S. Hsu, C.-E. Hou, Y.-L. Chiu, R.-C. Chang, J.-Y. Lo and B.-Y. Chen, "Masque: Exploring Lateral Skin Stretch Feedback on the Face with Head-Mounted Displays," in *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 439-451, 2019.
- [81] M. Maisto, C. Pacchierotti, F. Chinello, G. Salvietti, A. De Luca and D.

- Prattichizzo, "Evaluation of Wearable Haptic Systems for the Fingers in Augmented Reality Applications," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 1–1, 2017.
- [82] P. D. Marasco, J. S. Hebert, J. W. Sensinger, C. E. Shell, J. S. Schofield, Z. C. Thumser, R. Nataraj, D. T. Beckler, M. R. Dawson, D. H. Blustein, S. Gill, B. D. Mensh, R. Granja-Vazquez, M. D. Newcomb, J. P. Carey and B. M. Orzell, "Illusory Movement Perception Improves Motor Control for Prosthetic Hands," *Sci. Transl. Med.*, vol. 10, no. 432, 2018.
- [83] M. C. Jimenez and J. A. Fishel, "Evaluation of Force, Vibration and Thermal Tactile Feedback in Prosthetic Limbs," in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, pp. 437–441, 2014.
- [84] A. Achberger, F. Aust, D. Pohlandt, K. Vidackovic and M. Sedlmair, "STRIVE: String-Based Force Feedback for Automotive Engineering," in *Proceedings of The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.841–853, 2021.
- [85] G. Garcia, M. Ferre, J. Brenosa, R. Aracil, J.M. Sebastiana and C. Giachritsis, "Design and Development of a Multimodal Vest for Virtual Immersion and Guidance", in *Proceedings of EuroHaptics, Lecture Notes in Computer Science*, vol 9775, 2016.
- [86] A. Israr and I. Poupyrev, "Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display", In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2019–2028, 2011.
- [87] G. Garcia, M. Ferre, J. Brenosa and D. Vargas, "Evaluation of Presence in Virtual Environments: Haptic Vest and User's Haptic Skills", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7224–7233, 2017.
- [88] L. Zhu, Q. Cao and Y. Cai, "Development of augmented reality serious games with a vibrotactile feedback jacket", *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Volume 2, Issue 5, Pages 454-470, 2020.
- [89] E. M. Young, A. H. Memar, P. Agarwal and N. Colonnese, "Bellowband: A Pneumatic Wristband for Delivering Local Pressure and Vibration," in *Processing of IEEE World Haptics Conference*, pp. 55-60, 2019.
- [90] bHapticsInc, product of TACTOT, haptic vest for torso , <https://www.bhaptics.com/tactsuit/>
- [91] Y. Kishishita, S. Das, A. V. Ramirez, C. Thakur, R. Tadayon and Y. Kurita, "Muscleblazer: Force-Feedback Suit for Immersive Experience," in *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1813-1818, 2019.

- [92] P. Wellman, D.R. Howe, "Towards Realistic Display in Virtual Environments," Dynamic Systems and Control Division 57, pp.713-718, 1995.
- [93] A. Iggo, "Sensory Receptors in the Skin of Mammals and their Sensory Functions," Rev, Nevrol, Vol.141, No.10, pp.599-613, 1985.
- [94] "産業教育機器システム便覧", 教育機器編集委員会編, P4, 図 1.2, 日科技連出版社, 1972.
- [95] "The American Heritage Dictionary of the English Language", American Heritage Dictionaries, Houghton Mifflin Harcourt, 2011.
- [96] B. Stephens-Fripp, G. Alici and R. Mutlu, "A Review of Non-Invasive Sensory Feedback Methods for Transradial Prosthetic Hands," IEEE Access, vol. 6, pp. 6878-6899, 2018.
- [97] B. Peerdeman, D.Boere, H,Witteveen, RH Veld, H. Hermens, S, Stramigioli, H, Reitman, P. Veltink and S, Misra, "Myoelectric forearm prostheses: State of the art from a user-centered perspective," J. Rehabil. Res. Develop, vol. 48, no. 6, pp. 719-738, 2011.

業績一覧

査読付きジャーナル論文: (2件.うち筆頭2件)

- [1] **T. Moriyama**, H. Kajimoto, “HARVEST: High-Resolution Haptic Vest and Fingertip Sensing Glove That Transfers Tactile Sensation of Fingers to the Back”, Applied Science, Col.11. No.3, 2021. (第5章)
- [2] **T. Moriyama**, H. Kajimoto, “Wearable Haptic Device Presenting Sensations of Fingertips to the Forearm,” in IEEE Transactions on Haptics, 2022. (第4章)

査読付き国際会議: (9件.うち筆頭7件)

- [1] **T. Moriyama**, H. Kajimoto, “HARVEST: High-Density Tactile Vest that Represents Fingers to Back”, SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, Article No.4, 2020
- [2] E. Tsykunov, R. Agishev, R. Ibrahimov, **T. Moriyama**, L. Labazanova, H. Kajimoto, D. Tsetserukou, “SwarmCloak: Landing of Two Micro-Quadrotors on Human Hands Using Wearable Tactile Interface Driven by Light Intensity”, IEEE Haptics Symposium 2020, Pages. 987-992, 2020
- [3] E. Tsykunov, R. Agishev, R. Ibrahimov, **T. Moriyama**, L. Labazanova, H. Kajimoto, D. Tsetserukou, “SwarmCloak: Landing of a Swarm of Nano-Quadrotors on Human Arms”, SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies, Pages. 46-47, 2019
- [4] **T. Moriyama**, A. Takahashi, H. Asazu, H. Kajimoto, “Simple is Vest: High-Density Tactile Vest that Realizes Tactile Transfer of Fingers”, SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies, Pages. 42-43, 2019
- [5] **T. Moriyama**, N. Ayaka, T. Nakamura, V. Yem, H. Kajimoto, “Hap-link: wearable haptic device on the forearm that presents haptics sensations corresponding to the fingers”, SIGGRAPH ASIA 2018 Emerging Technologies, Article No.5, 2018
- [6] **T. Moriyama**, H. Kajimoto, “Wearable Haptic Device that Presents the Haptics Sensation of the Finger Pad to the Forearm and Fingertip”, Asia Haptics

2018, Springer Vol: 535, 2018

- [7] **T. Moriyama**, T. Nakamura, H. Kajimoto, “Wearable Haptic Device that Presents the Haptics Sensation Corresponding to Three Fingers on the Forearm”, UIST DEMO 2018, Pages. 152-153, 2018
- [8] **T. Moriyama**, T. Nakamura, H. Kajimoto, “Development of a Wearable Haptic Device that Presents the Haptic Sensation Corresponding to Three Fingers on the Forearm”, SUI 2018, Pages. 158-162, 2018
- [9] **T. K. Moriyama**, N. Ayaka, R. Sakuragi, T. Nakamura, H. Kajimoto, “Development of a Wearable Haptics Device that Presents the Haptics Sensation of the Fingerpad to the Forearm”, IEEE Haptics Symposium 2018, Pages. 180-185, 2018

国内会議: (5 件, うち筆頭 5 件)

- [1] **森山**, 梶本: 指先の力触覚を身体の異部位に提示するウェアラブルデバイスの開発 (第 4 報): 左右の前腕および足首における検討, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2021.9
- [2] **森山**, 高橋, 梶本: 指先の触覚を背中に転移する高解像度触覚ベストの開発, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2019.9
- [3] **森山**, 中村, 梶本: 指先の力触覚を前腕に提示するウェアラブルデバイスの開発 (第 3 報): 3 本指に対応したデバイスの開発, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2018.9.
- [4] **森山**, 西, 櫻木, 中村, 梶本: 指先の触覚を前腕に提示するウェアラブルデバイスの開発第 2 報: 温度提示の付与, インタラクション 2018, 2018,3.
- [5] **森山**, 西, 中村, 梶本: 指先の触覚を前腕に提示するウェアラブルデバイスの開発, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2017.9.

受賞: (3 件)

- [1] Best Demo Voted By Attendees Honourable Mentions, E. Tsykunov, R. Agishev, R. Ibrahimov, **T. Moriyama**, L. Labazanova, H. Kajimoto, D. Tsetserukou, “SwarmCloak: Landing of a Swarm of Nano-Quadrotors on Human Arms”, SIGGRAPH ASIA 2019 Emerging Technologies, Pages. 46-47, 2019
- [2] Best Demo Voted By Attendees, **T. Moriyama**, N. Ayaka, T. Nakamura, V. Yem, H. Kajimoto, “Hap-link: wearable haptic device on the forearm that

presents haptics sensations corresponding to the fingers”, SIGGRAPH ASIA 2018 Emerging Technologies, Article No.5, 2018

- [3] Best Live Demo Finalist, **T. Moriyama**, H. Kajimoto, “Wearable Haptic Device that Presents the Haptics Sensation of the Finger Pad to the Forearm and Fingertip”, Asia Haptics 2018, Springer Vol: 535, 2018

特許 : (1 件)

- [1]. 特願 2020-150822, 触覚転移衣服および処理装置, 森山, 高橋, 梶本, 出願日 : 2020/9/8