

修士論文

空気圧バルーンと機械式ピストンを用いた 二層構造型触力覚提示デバイスの提案と評価

佐々木 卓也

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 清川 清 教授

サイバネティクス・リアリティ工学研究室 (情報科学領域)

令和5年3月17日 提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

佐々木 卓也

審査委員：

清川 清 教授	(主指導教員, 情報科学領域)
加藤 博一 教授	(副指導教員, 情報科学領域)
内山 英昭 准教授	(副指導教員, 情報科学領域)
磯山 直也 助教	(副指導教員, 情報科学領域)
Monica Perusquía-Hernández 助教	(副指導教員, 情報科学領域)

空気圧バルーンと機械式ピストンを用いた 二層構造型触力覚提示デバイスの提案と評価*

佐々木 卓也

内容梗概

触力覚提示デバイスはバーチャルな物体とのインタラクションによって生じる触覚や力覚を再現できるため、人工現実 (VR) や拡張現実 (AR) 体験によく用いられている。軟らかさと硬さ (硬軟) は材質感を表現する情報空間の次元として数えられるほど物性の知覚において重要である。硬軟は次元の材質感であるが、人の知覚する軟らかさと硬さには区別があると考えられており、硬軟を両立した触力覚提示デバイスには技術的な工夫が施されている。しかし、従来のデバイスは刺激の提示面積が小さいなど刺激面の自由度が低いという問題点がある。そこで、本研究では刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な触力覚提示デバイスを提案する。提案デバイスは空気圧バルーンと機械式ピストンを用いた二層構造によって硬軟提示を実現する。提案デバイスの有効性を検証するため、試作デバイスを実装し物理特性と知覚特性の測定と評価を行った。物理特性の計測から各モジュールが設計要件を満たすかの評価を行った。その結果、デバイスが提示する軟らかさ、硬さの出力は要件を満たしていることを確認した。知覚特性の計測から、試作デバイスが人に対して何段階の硬軟を提示できるのかを明らかにした。その結果、試作デバイスは3段階の硬さ、5段階の軟らかさを提示可能であった。試作デバイスがVR空間での物体の硬軟知覚において有効か、また、視覚情報から連想される硬軟と同等の触覚フィードバックを提示できているかを明らかにするため、VR体験における実験と評価を行った。その結果、試作デバイスによるVR体験の向上が示唆された。また、視覚情報から連想される硬軟と触覚フィードバックの比較結果にばらつきが生じたことから、デバイスの出力を物性のマッチングではなく知覚のマッチングから決定する必要がある事が示唆された。一方で、視覚から連想された知覚の平均と、

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 先端科学技術専攻 修士論文, 令和5年3月17日。

実物体のヤング率から決定した刺激，つまり試作デバイスによって提示される触覚フィードバックに大きなずれはなかったことから，試作デバイスは実物体の触覚フィードバックにおいて一定の再現性を持つと言える．以上より，提案システムは硬軟提示に関して一定の出力と提示レンジを持ち，VR 体験におけるリアルさ，好み，楽しさの向上に有用であると言える．

キーワード

人工現実，拡張現実，触力覚提示デバイス，軟らかさ，硬さ，空気圧バルーン，機械式ピストン

Proposal and Evaluation of a Two-layer Tactile Force Sensation Presentation Device Using a Pneumatic Balloon and a Mechanical Piston*

Takuya Sasaki

Abstract

Haptic presentation devices are often used in artificial reality (VR) and augmented reality (AR) experiences because they can reproduce the tactile and force sensations produced when interacting with virtual objects. Softness and hardness (hardness-softness) are so important in the perception of physical properties that they are counted as one dimension of the information space that expresses the sense of materiality. Although hardness and softness are one-dimensional material sensations, there is a difference between softness and hardness perception. Therefore, technological innovations has been applied to haptic presentation devices that can combine softness and hardness. However, current devices have small stimulation area. In this study, we propose a tactile force presentation device that can provide a rigid-soft presentation with a high degree of freedom of the stimulus surface. The proposed device realizes a rigid-soft presentation through a two-layered structure using a pneumatic balloon and a mechanical piston. To verify the effectiveness of the proposed device, we implemented a prototype device and measured and evaluated its physical and perceptual characteristics. Based on the measurement of physical properties, we evaluated whether each module satisfied the design requirements. The results suggested that the outputs of softness and hardness presented by the device met the requirements. From the measurement of perceptual character-

*Master's Thesis, Department of Science and Technology, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 17, 2023.

istics, we found how many levels of hardness and softness the prototype device was capable of presenting to people. The results showed that the prototype device was capable of presenting three levels of hardness and five levels of softness. Experiments and evaluations were conducted to determine whether the prototype device is effective in the perception of object hardness and softness in VR space, and whether it provides tactile feedback equivalent to the hardness and softness associated with visual information. The results suggest that the prototype device improves the VR experience. The results of the comparison between the hardness and softness associated with the visual information and the tactile feedback varied, suggesting that the output of the device should be determined from the matching of perception rather than the matching of physical properties. On the other hand, there was no significant discrepancy between the average of perceptions associated with vision and the stimuli determined from the Young's modulus of the real object, i.e., the tactile feedback presented by the prototype device, indicating that the prototype device has a certain reproducibility in tactile feedback of the real object. According to the evaluations, the proposed system has a certain output and presentation range for hard and soft representations, and is useful for improving realism, preference, and enjoyment in VR experiences.

Keywords:

Virtual Reality, Augmented Reality, Haptic Device, Softness, Hardness, Pneumatic Balloons, Mechanical Pistons

目次

第1章	はじめに	1
第2章	関連研究	2
2.1	軟らかさの提示	2
2.2	硬さの提示	4
2.3	軟らかさと硬さの提示	7
2.4	本研究の位置づけ	9
第3章	提案システム	10
第4章	実装	11
4.1	試作デバイス	11
4.2	空気圧バルーン	12
4.3	機械式ピストン	12
第5章	物理特性評価実験	14
5.1	実験目的	14
5.2	空気圧バルーンと機械式ピストンの硬度測定	14
5.2.1	実験条件	14
5.2.2	計測方法	14
5.2.3	実験手順	14
5.2.4	結果と考察	15
5.3	空気圧バルーンの内圧測定	15
5.3.1	実験条件	15
5.3.2	計測方法	16
5.3.3	実験手順	16
5.3.4	結果と考察	17
5.4	空気圧バルーンの変位測定	17
5.4.1	実験条件	17

5.4.2	計測方法	18
5.4.3	結果と考察	18
5.5	空気圧バルーンと機械式ピストンの接触圧力測定	19
5.5.1	実験条件	19
5.5.2	計測方法	19
5.5.3	実験手順	19
5.5.4	結果と考察	20
5.6	まとめ	20
第 6 章	知覚特性評価実験	23
6.1	実験目的	23
6.2	柔らかさの知覚	23
6.2.1	実験条件	23
6.2.2	計測方法	23
6.2.3	実験手順	24
6.2.4	結果と考察	24
6.3	硬さの知覚	26
6.3.1	実験条件	26
6.3.2	計測方法	26
6.3.3	実験手順	26
6.3.4	結果と考察	27
6.4	まとめ	27
第 7 章	VR コンテンツにおける有効性評価実験	37
7.1	実験目的	37
7.2	コンテンツ実装	37
7.3	実験条件	37
7.3.1	計測方法	38
7.4	実験手順	39
7.5	結果と考察	41
7.6	まとめ	42

第 8 章	おわりに	47
8.1	結論	47
8.2	今後の展望	47
8.2.1	ピストンのグリッド化	47
8.2.2	各機構の制御・自動化	48
	謝辞	51
	参考文献	52
	発表リスト	56

第1章 はじめに

触力覚提示デバイスはバーチャルな物体とのインタラクションによって生じる触覚や力覚を再現できるため、人工現実 (VR) や拡張現実 (AR) 体験によく用いられている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. 軟らかさと硬さ (硬軟) は材質感を表現する情報空間の一次元として数えられるほど物性の知覚において重要である [11]. したがって、触力覚提示デバイスによる硬軟提示は VR・AR 体験の臨場感を高めることに貢献する。

硬軟は一次元の材質感であるが、人の知覚する軟らかさと硬さには区別があると考えられている [11]. 硬軟それぞれでその程度を判断する感覚器が異なることは理由の一つである [12]. したがって、硬軟を両立した触力覚提示デバイスには技術的な工夫が施されている。

これまでに、毛先の長さや向きを変化することで硬軟を表現するデバイス [13] や、柔軟性のあるシートに異なる圧力をかけることで硬軟を表現するデバイス [14] が提案されている。しかし、これらには刺激面積が小さいという問題点がある。

刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な触力覚提示デバイスが開発できた場合、二つの利点がある。一つ目に、様々な身体部位への応用ができインタラクションの幅が広がる。二つ目に、面積変化による反力分布の制御ができ硬軟の提示レンジが大きくなる。

本研究では、刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な触力覚提示デバイスを提案する。提案デバイスは空気圧バルーンと機械式ピストンを用いた二層構造によって硬軟提示を実現する。空気圧バルーンによって物体の軟らかさを、機械式ピストンによって物体の硬さを再現する。

本論文では、2章で関連研究の特徴を述べる。3章で提案デバイスの要件・設計・構成を述べる。4章で実装の詳細について述べる。5章-7章で行った実験の詳細を述べる。8章ではまとめを述べる。それぞれの実験では、5章でデバイスの物理特性を、6章でデバイスを用いた硬軟提示における知覚特性を、7章で視覚情報提示と提案デバイスを組み合わせたときの有効性を明らかにする。

第2章 関連研究

2.1 柔らかさの提示

柔らかさを提示するデバイスとして、空気圧バルーンを用いたデバイスが多く開発されてきた。空気圧バルーンは、空気供給量や供給タイミングを制御することで、バルーンの柔らかさを非常に細かく表現できる。

空気圧バルーンを用いた装着型のデバイスとして、Heらが開発した PneuHaptic が挙げられる (図 2.1) [15]。このデバイスは、シリコンで成形した小型空気圧バルーンを輪状に組み合わせ、ユーザ前腕部の皮膚を変形させることで「たたく」「握る」「なぞる」などの感覚を提示できる (図 2.2)。しかし、刺激部位が腕部に限定されていることや、空気供給の量とタイミングがフィードバック制御されていないなどの課題があった。これに対して、より広範囲に感覚を提示するデバイスとして、Delazioらは Force Jacketを開発した (図 2.3) [16]。このデバイスは、ビニール製空気圧バルーンや圧力センサをジャケットの内側に複数配置し、エアコンプレッサから供給した空気圧を細かく制御することで、上半身全体に雪玉が当たる感覚、蛇に締め付けられる感覚、筋肉が盛り上がる感覚などを再現できる。しかし、エアコンプレッサやジャケットに接続されるチューブによるユーザ動作範囲の制約が課題である。

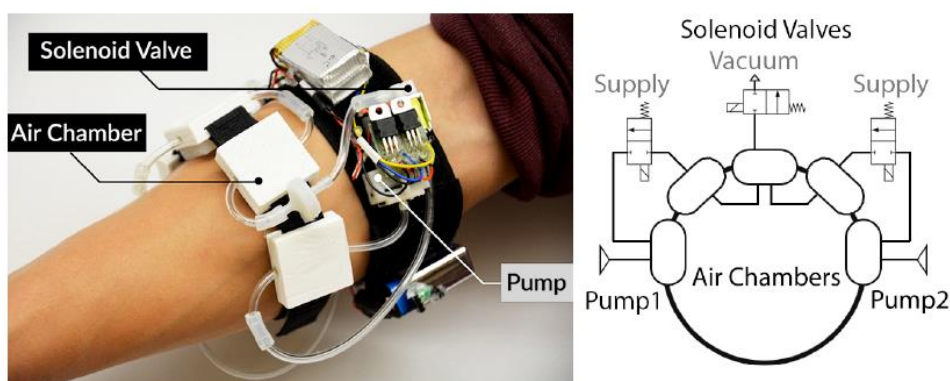


図 2.1: 空気圧バルーンを用いた前腕部への触覚提示デバイス [15].

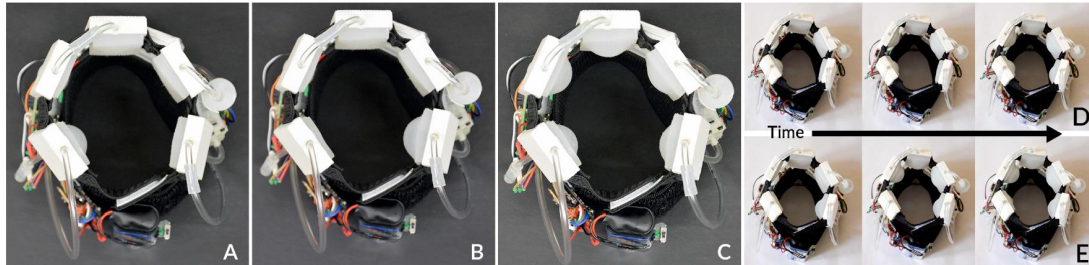


図 2.2: 空気圧バルーンを用いた前腕部への触覚提示デバイスの提示パターン [15].



図 2.3: 空気圧バルーンを用いた上部各部への触覚提示デバイス [16].

2.2 硬さの提示

硬さを提示するデバイスとして、モータや力覚センサを用いたデバイスが多く開発されてきた。硬さを提示する把持型のデバイスとして、Choi らが開発した CLAW が挙げられる (図 2.4) [17]。このデバイスは、コントローラに取り付けた力覚センサとサーボモータを制御することで、ユーザの人差し指に把持、接触、トリガを引く動作時に発生する感覚を再現できる (図 2.5)。しかし、刺激部位は人差し指に限定されている。これに対して、より多くの部位に感覚を提示できるデバイスとして、Lopes らは Impacto を開発した (図 2.6) [18]。このデバイスは、ソレノイドと筋肉への電気刺激を組み合わせることで、ユーザ腕部と脚部に殴打 (図 2.7a) や球を蹴る (図 2.7b)・打つ (図 2.7c) 際の衝撃の感覚を提示できる。しかし、ユーザに取り付けられた電極によって、ユーザの動作が制限される課題がある。

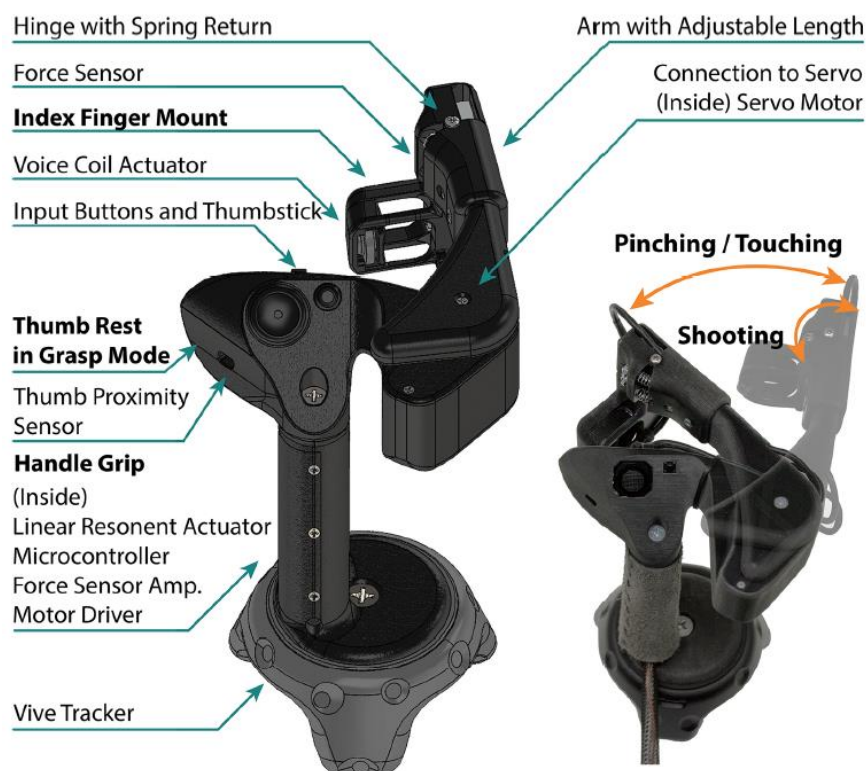


図 2.4: 力覚センサとサーボモータを用いた指先への触覚提示デバイス [17].



図 2.5: 力覚センサとサーボモータを用いた指先への触覚提示デバイスによる提示パターン [17].

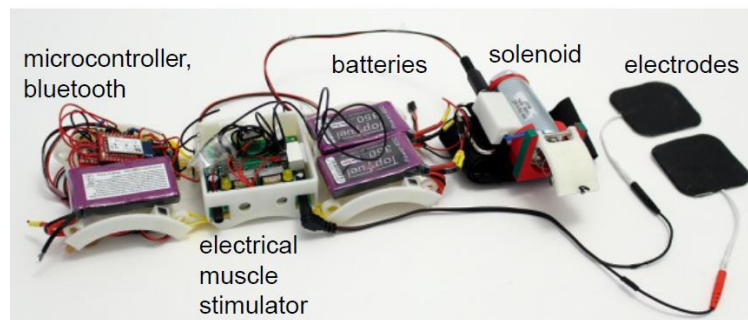


図 2.6: 力覚センサとサーボモータを用いた身体各部への触覚提示デバイス [18].

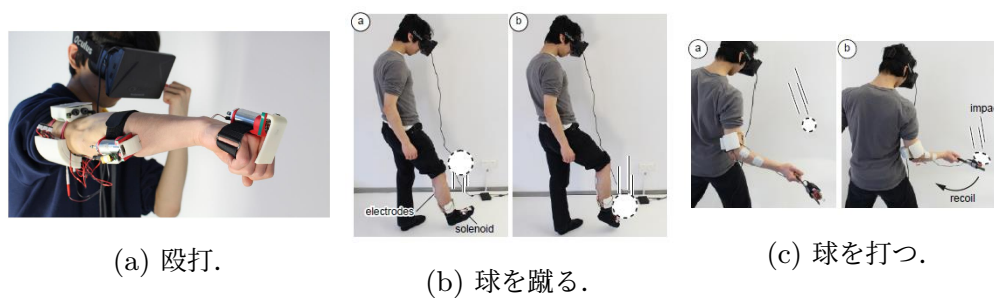


図 2.7: 力覚センサとサーボモータを用いた身体各部への触覚提示デバイスによる提示パターン [18].

一方で、設置型のデバイスとして、皮膚表面の形状変化によってユーザに様々な感覚を提示する形状ディスプレイがある。中垣らは、ピンアレイとポリスチレンを組み合わせた Materiable を作成した [19]。このデバイスは、ピンアレイの制御による皮膚表面形状の変化により、ユーザの手や身体に柔軟性、弾性、粘性を提示できる (図 2.8)。また、Siu らは、Materiable と同様の機構で、より小型で横方向への移動が可能な ShapeShift を作成した (図 2.9) [20]。

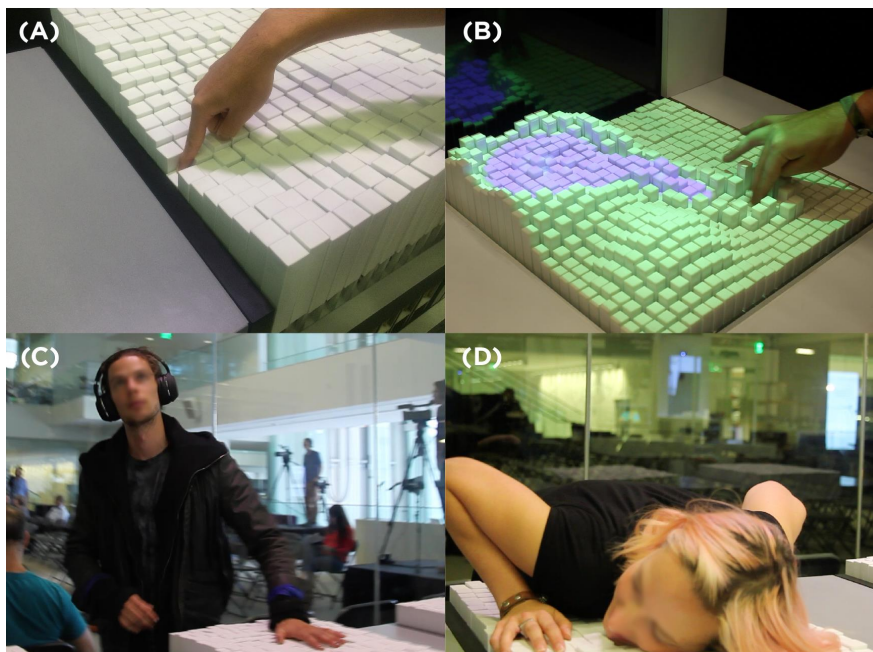


図 2.8: ピンアレイとポリスチレンを組み合わせた大型触覚提示デバイス [19].

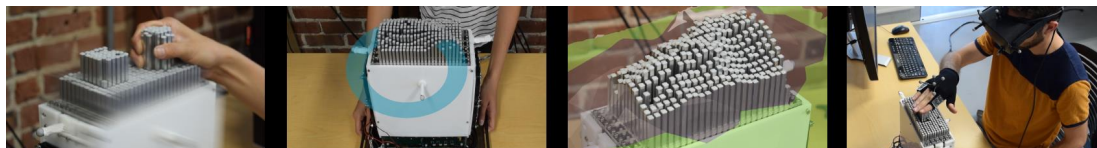


図 2.9: ピンアレイとポリスチレンを組み合わせた小型触覚提示デバイス [20].

2.3 柔らかさと硬さの提示

Lee らは、ブラシ、ピンアレイ、モータなどを用いた触覚デバイスを開発した (図 2.10) [13]. このデバイスはブラシの毛並みの長さをピンアレイで変化させることで、ユーザの指先に柔らかさと硬さを多段階で提示できる (図 2.11).

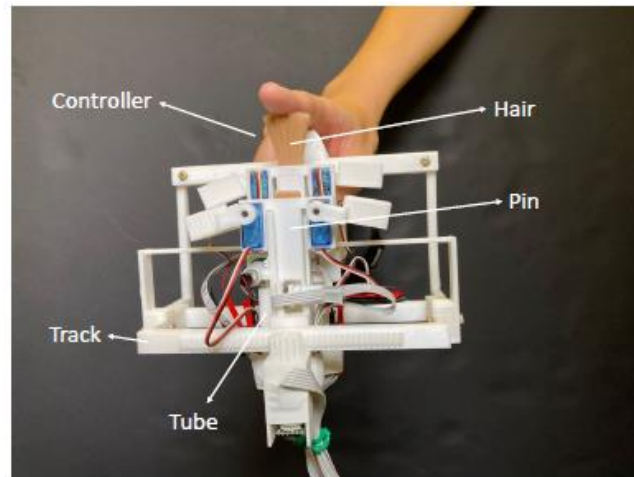


図 2.10: ブラシ、ピンアレイ、モータなどを用いた触覚提示デバイス [13].

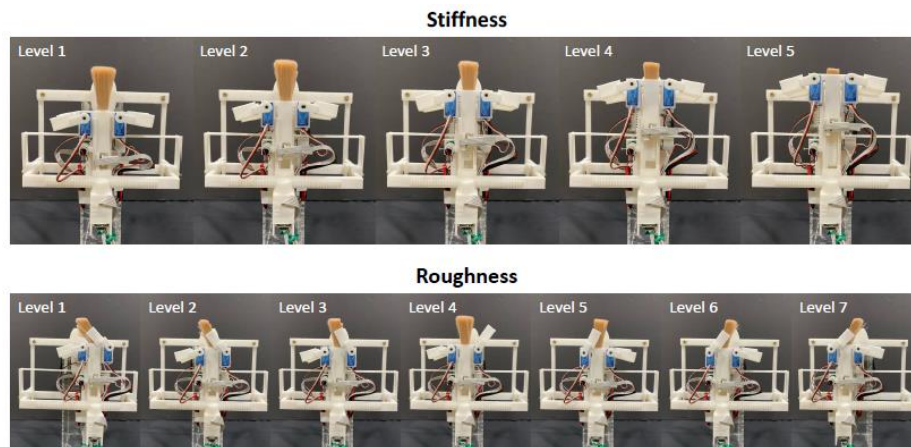


図 2.11: ブラシ、ピンアレイ、モータなどを用いた触覚提示デバイスによる提示パターン [13].

井上らは、柔軟性のあるシートと空気噴射を用いた触覚デバイスを開発した(図 2.12) [14]. このデバイスはユーザの指先に、シートの張力に応じた柔らかさと、高圧の空気噴射による硬さを提示できる. また、空気噴射に用いるノズルとシートの距離を6軸マニピュレータによって制御することで、提示する硬さや提示位置を変化できる(図 2.13).

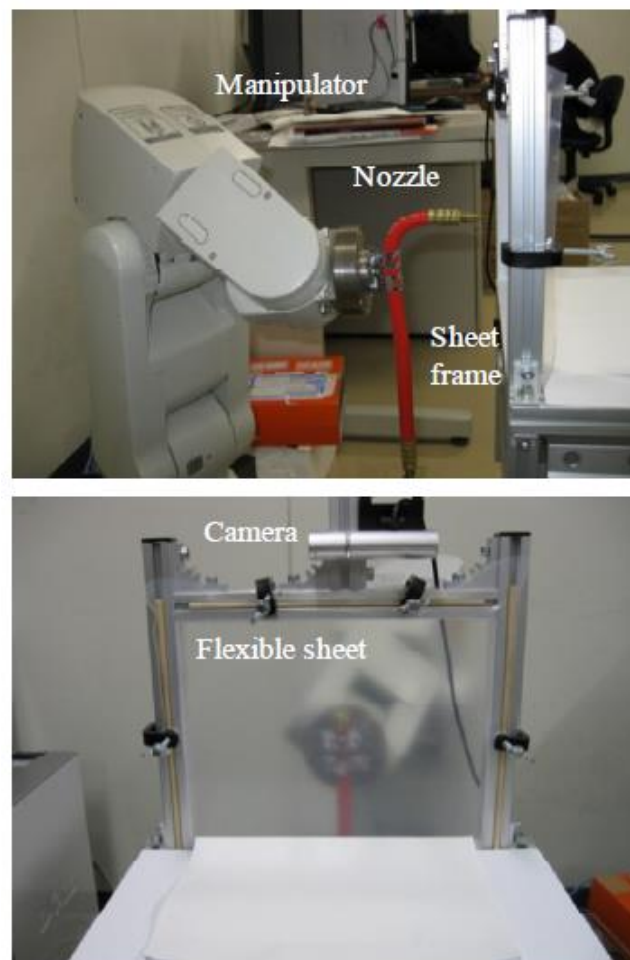


図 2.12: 柔軟性のあるシートと空気噴射を用いた触覚提示デバイス [14].

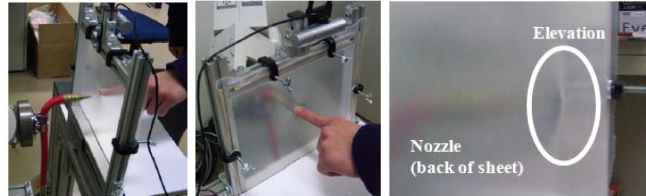


図 2.13: 柔軟性のあるシートと空気噴射を用いた触覚提示デバイスによる提示 [14].

2.4 本研究の位置づけ

身体各部に軟らかさを提示するデバイスとして、空気圧バルーンを用いたデバイスが多く開発されてきた [15, 16]. 同様に、身体各部に硬さを提示するデバイスとして、モータや力覚センサを用いたデバイスが多く開発されてきた [17, 18, 19, 20]. また、軟らかさと硬さを提示するために、複数の素材や機構を組み合わせたデバイスが開発されてきた [13, 14]. 一方で、これらのデバイスは刺激部位が指先に限定されており、刺激面積が小さい. そのため、他の身体部位への応用や、硬軟の提示レンジが小さいという問題点がある.

これらの研究を踏まえ、本研究では刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な触覚提示デバイスを提案し、物理特性や知覚特性の評価と VR 体験における有効性を検証する. また、提案デバイスは、柔らかさを非常に細かく表現できる空気圧バルーンと、押し込む力の変化によって硬さを表現できるグリッド状ピストン機構を採用する. ただし、ユーザの可動性を保つため、提案デバイスは比較的小規模とする.

第3章 提案システム

本研究では刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な、二層構造型触力覚提示デバイスを提案する (図 3.1)。提案デバイスは無段階に軟らかさを提示できる空気圧バルーンに、高いレベルの硬さを提示できる機械式ピストンを重ねた二層構造によって硬軟提示を実現する。

空気圧バルーンと機械式ピストンは自由に成形可能な素材で作成することで、デバイスの小型化やユーザ身体各部への応用を図る。空気圧バルーンの大きさ、機械式ピストンの数の組み合わせによって刺激の面積と強弱を変化させ、幅広い物体の硬軟を提示する。例えば、機械式ピストンを5×5のようなグリッド状に配置することで、ユーザの皮膚表面を滑らかに変形させることができる。このとき刺激の強弱を変化させることで、ボールが転がる感覚や機械が上下運動する感覚を提示できる。また、複数のデバイスを同期させることで、ユーザ身体がクッションに沈む体験、リフティングやバーチャルな生物との触れ合いなど、ユーザ身体の広範囲への感覚提示を実現する。

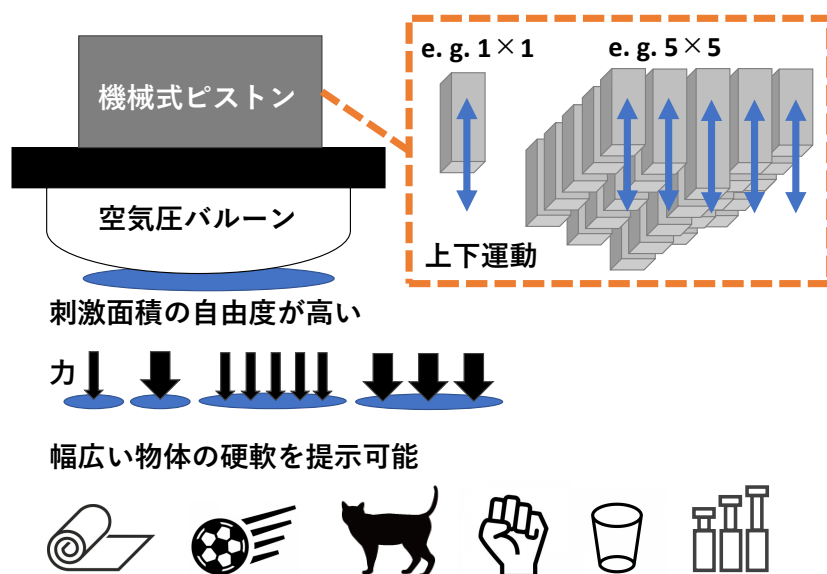


図 3.1: 二層構造型触力覚提示デバイスのイメージ。

第4章 実装

4.1 試作デバイス

提案デバイスの有効性を検証するため、試作デバイスを実装した。試作デバイスは、最小構成である空気圧バルーン一つ、機械式ピストン一本、空気圧バルーンへの空気供給部で構成した。

実装した試作デバイスを図 4.1 に示す。

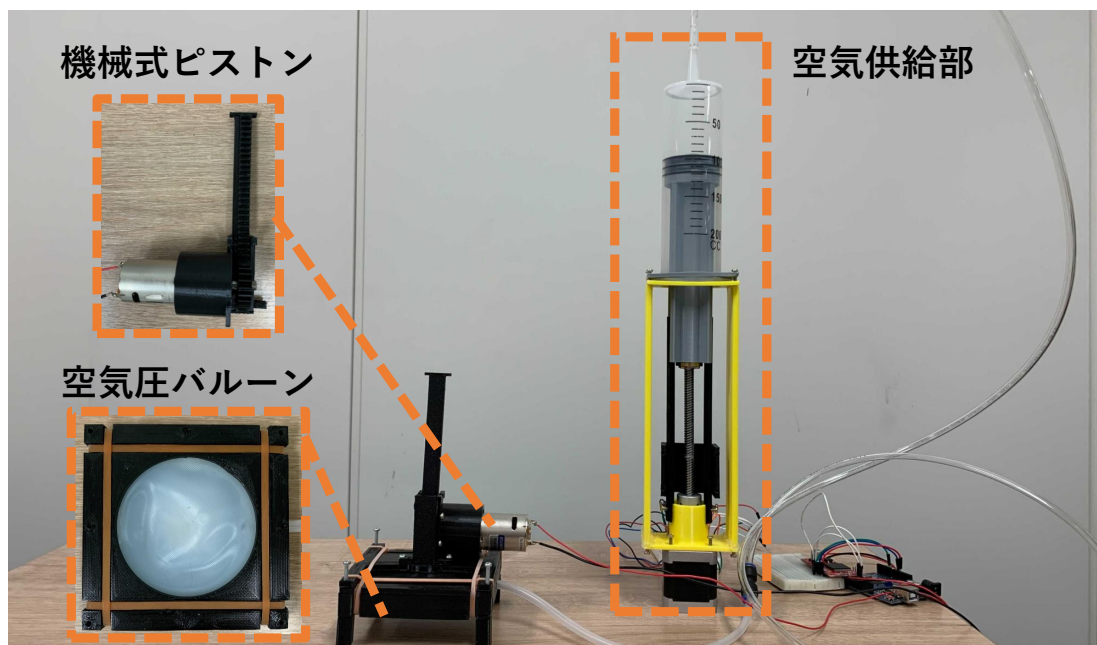


図 4.1: 試作デバイス全体図。

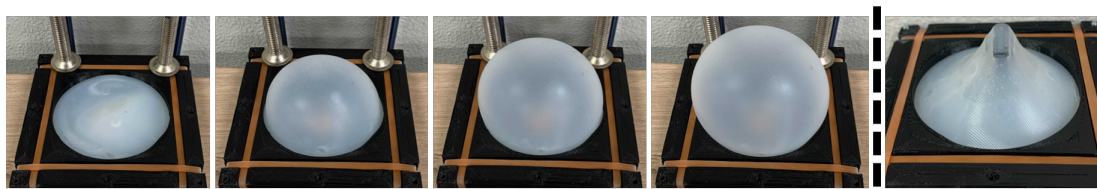


図 4.2: 空気圧バルーン膨張過程と機械式ピストン押し込み状態。

4.2 空気圧バルーン

空気圧バルーン (図 4.1 左下) は、2 液混合型シリコンを 3D プリンタで作成した型に流し込むことで成形した。2 液混合型シリコンには、優れた柔らかさと柔軟性を持ち、室温かつ短時間で硬化する Ecoflex 00-30 を用いた。柔らかさを提示する膨張面の成型には 2 種の原液をそれぞれ 7g ずつ、膨張面以外の成型にはそれぞれ 25g ずつ混ぜ合わせた。空気圧バルーンの構成要素をシリコンのみにすることで、空気供給時の空気漏れを防いだ。空気供給部につながるチューブは、結合部からの空気漏れを防ぐため、シリコンを流し込む段階で型に配置し一緒に硬化させた。膨張面以外の膨張を極力小さくするため、空気圧バルーンの外側は 3D プリンタで作成したケースで覆い、ねじと輪ゴムで補強した。作成した空気圧バルーンの直径は 70 mm である。

空気圧バルーンへの空気供給部 (図 4.1 右) はリニアモータと注射器で構成した。リニアモータはステッピングモータ (ST-42BYH1004) にリードスクリュを取り付けて作成した。また、直径 70 mm のバルーンを、垂直方向に最大 40 mm 程度膨らませるために必要な空気供給量は約 153 mL であり、微量の空気漏れなどを考慮したうえで必要量を満たすため、注射器にはプラスチック製の 200 mL のものを使用した。リニアモータと注射器の押込み部分は 3D プリンタで作成したパーツで結合した。押込み部分にはレールを添え、リニアモータの回転運動を直線運動に変換した。

4.3 機械式ピストン

機械式ピストン (図 4.1 左上) は、ギヤドモータと 3D プリンタで作成した機構で構築した。ギヤドモータには DC モータ (RS-380PH) の中性仕様に、直径 37mm のスパークボックス (RB37B) を取付けたものを使用した。硬さを提示する機構には、VR 体験と連動するための応答性が重要だと想定し、ラックピニオン機構を採用した。ラックの先端は物理的なストッパ形状にすることで、20–40 mm 範囲での上下運動を可能にした。

図 4.2 の左から 4 枚に、空気圧バルーンの膨張過程を示す。また、同図左から 5 枚目に、機械式ピストンの押込み時の状態を示す。

空気圧バルーンと機械式ピストンの結合には 3D プリンタで作成したパーツを使用した。空気供給部と機械式ピストンはマイコンとモータドライバで制御する。現状の実装ではモータの制御をキー入力で行うが、実際のアプリケーションではバーチャルなオブジェクトや生物の動きなどと連動して自動で制御することを想定している。

第 5 章 物理特性評価実験

5.1 実験目的

試作デバイスが軟らかさと硬さを十分に提示できているかを確認するため、空気圧バルーンと機械式ピストンの物理特性に関する実験と評価を行った。

5.2 空気圧バルーンと機械式ピストンの硬度測定

5.2.1 実験条件

空気圧バルーンに関して、空気供給量と表面の軟らかさの関係を明らかにするため、表面の硬度を測定した。

5.2.2 計測方法

硬度測定にはデュロメータを用いた。デュロメータは決められた形の押針を試料の表面に押し付けて試料を変形させたときの押込み深さをもとに、内部のスプリングを用いて試料の硬度を測定する機器である。空気圧バルーンは非常に柔らかいと想定し、ゴムやシリコンなどの軟質素材の硬度測定に広く使用されているタイプ C のデュロメータ (TOPINCNy03w2h7bod) を選定した。このデュロメータの測定可能範囲は 0–100°、精度は 0.1° である。

測定環境を図 5.1 に示す。

5.2.3 実験手順

水平面に上向きに固定した空気圧バルーンに対して、空気供給量を 10 mL ずつ変化させながら、デュロメータの押針を垂直に押し当てたときの値を計測した。



図 5.1: 硬度測定環境.

5.2.4 結果と考察

測定結果を図 5.2 に示す. 硬度測定の最大値は空気供給量 200 mL のときの 2° であった. 弛緩した成人の人肌の硬度はおおよそ 10° 前後であるため, 作成した空気圧バルーンの柔らかさは最大で人間の 5 分の 1 だと言える. また, 空気供給量が 170 mL に達するまで, デュロメータの値は変化しなかった. これは, 硬度変化が今回測定に使用したデュロメータの検出下限よりも小さかったためだと考えられる.

また, 機械式ピストンの硬度も測定した. 機械式ピストン単体の硬度は 85° であり, 機械式ピストンと空気圧バルーンを重ねたときの硬度は 55.5° であった.

5.3 空気圧バルーンの内圧測定

5.3.1 実験条件

空気圧バルーンに関して, 空気供給量と表面の柔軟性の関係性を明らかにするため, デバイスの内圧を測定した.

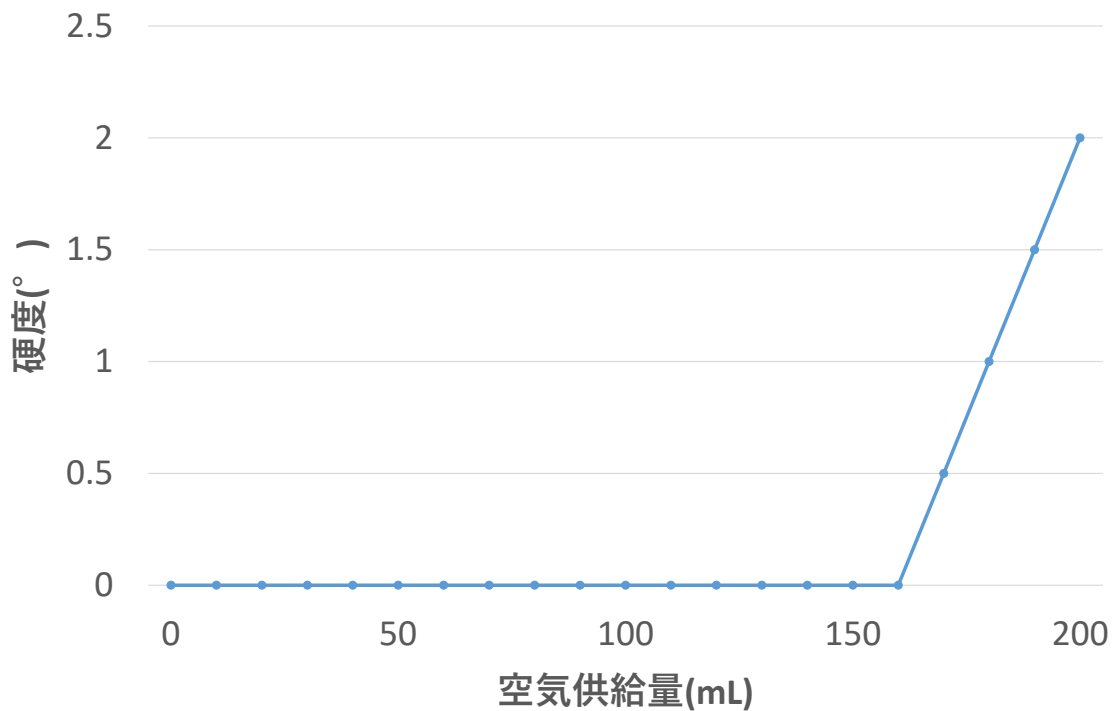


図 5.2: 空気供給量と空気圧バルーン硬度の関係.

5.3.2 計測方法

内圧測定には流体圧センサを用いた。空気圧バルーンの大きさから、内部は低圧であると想定し、低圧用流体圧センサ (PSE532) を使用した。この流体圧センサの圧力感知範囲は 0–101 kPa, 精度は 2 FS である。空気圧バルーンの空気供給部から枝分かれするように流体圧センサを取り付けた。測定環境を図 5.3 に示す。

5.3.3 実験手順

水平面に固定した空気圧バルーンに対して、空気供給量を 10 mL ずつ変化させた。供給後 10 秒待ち、安定した値を 10 秒間記録したものの平均値を計測した。



図 5.3: 内圧測定環境.

5.3.4 結果と考察

測定結果を図 5.4 に示す。空気供給量と内圧は比例関係にあることがわかった。空気供給量が大きくなるほど、空気圧バルーンの内側から外側にかかる力は強くなるため、この結果は妥当であると考えられる。

5.4 空気圧バルーンの変位測定

5.4.1 実験条件

空気圧バルーンに関して、空気供給量と表面変形の間関係を明らかにするため、表面の重力方向への変位を測定した。

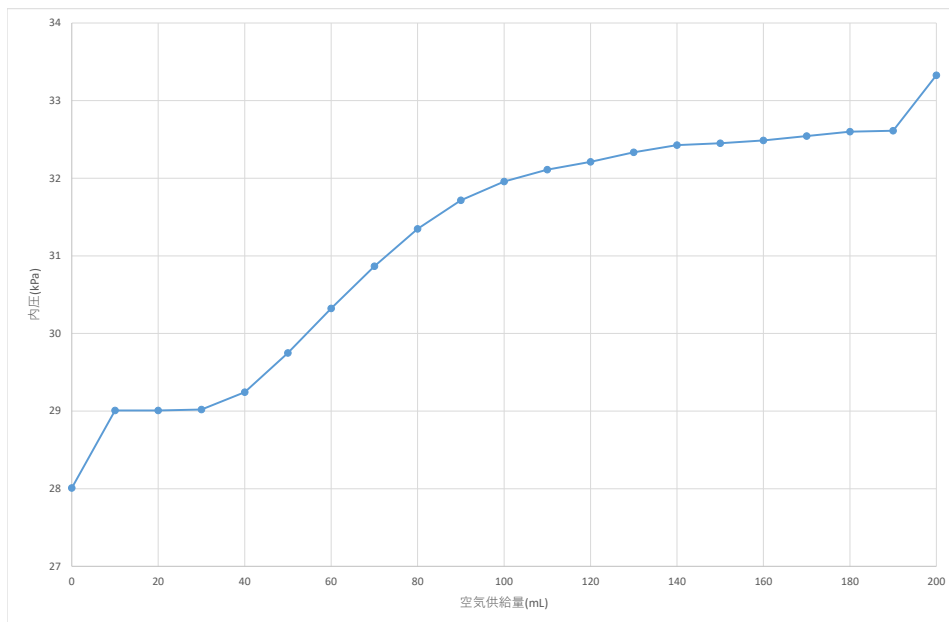


図 5.4: 空気供給量と空気圧バルーン内圧の関係.

5.4.2 計測方法

バルーンの底面が壁と垂直になるように下向きに固定し、壁から 3 m 離してカメラを配置した。空気供給量を 10 mL ずつ変化させながら、空気圧バルーンの表面変形を撮影した。撮影した画像の画素数から、表面の重力方向への変位を算出した。測定環境を図 5.5 に示す。

5.4.3 結果と考察

測定結果を図 5.6 に示す。空気供給量が大きくなるほど、変位も大きくなっており、この結果は妥当だと考えられる。また、空気圧バルーンを最大まで膨らませたときの変位は約 47 mm だった。



図 5.5: 変位測定環境.

5.5 空気圧バルーンと機械式ピストンの接触圧力測定

5.5.1 実験条件

空気圧バルーンと機械式ピストンに関して、物体と接触したときの圧力変化の関係を明らかにするため、接触圧力を測定した。

5.5.2 計測方法

測定環境を図 5.7 に示す。圧力測定には、抵抗式薄膜圧力センサ (FSR402) を用いた。圧力センサの圧力感知範囲は 100 g–10 kg である。

5.5.3 実験手順

それぞれの測定過程を図 5.8, 図 5.9 に示す。水平面に圧力センサを張り付け、提案デバイスは下向きに万力で固定した。圧力センサとデバイスの距離 d は初期値を 20 mm とし、5 mm ずつ変化させた。空気圧バルーンについては、空気供給量を 10 mL ずつ変化させたときの接触圧力の変化を記録した。機械式ピストンについては、PWM の Duty 比をデバイスの物理的な性能限界である 80% まで変化させた

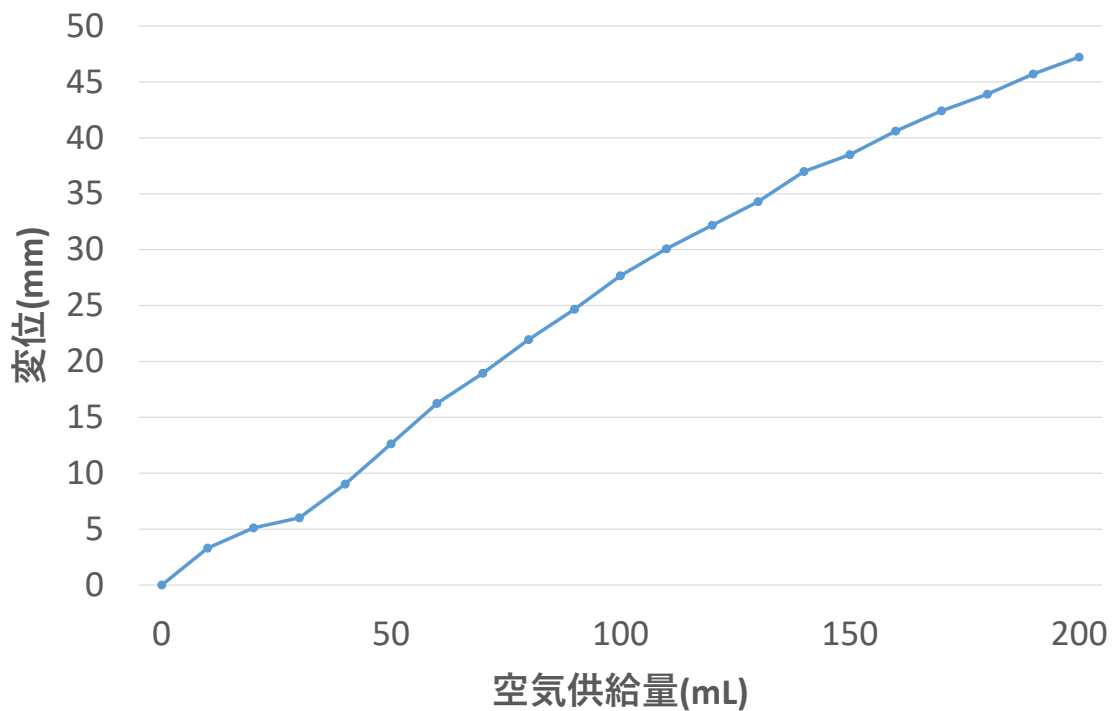


図 5.6: 空気供給量と空気圧バルーン変位の関係.

ときの接触圧力の変化を記録した.

5.5.4 結果と考察

空気供給量と接触圧力についての測定結果を図 5.10 に示す. 空気供給量に比例して接触圧力は大きくなったと言える. Duty 比と接触圧力についての測定結果を図 5.11 に示す. 各 Duty 比における圧力の最大値より, Duty 比の大きさに比例して接触圧力は大きくなったと言える.

5.6 まとめ

空気圧バルーンの表面硬度は最大で人肌の 5 分の 1 程度の柔らかさだとわかった. 空気圧バルーンは重力方向に対して, 最大で 47 mm 変形することがわかった.

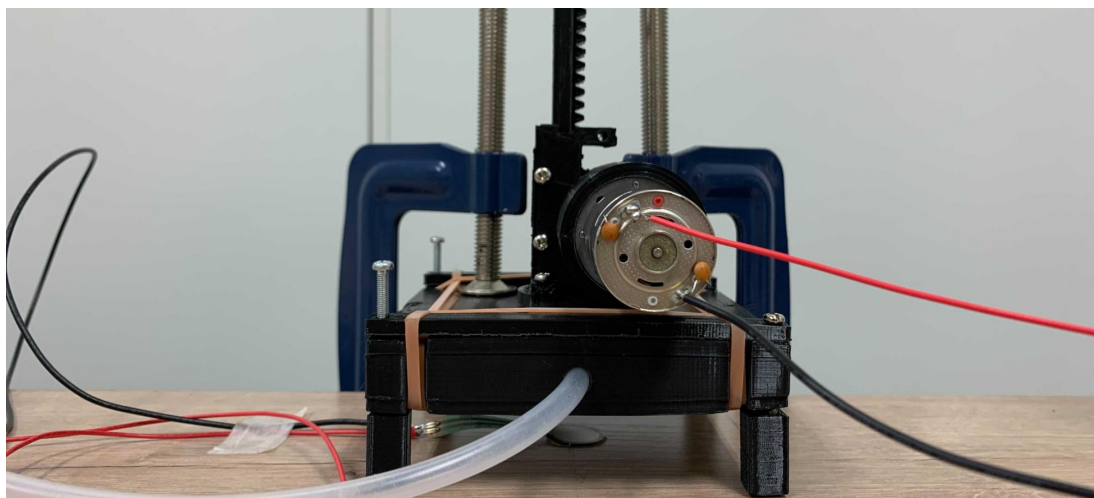


図 5.7: 接触圧力測定環境.

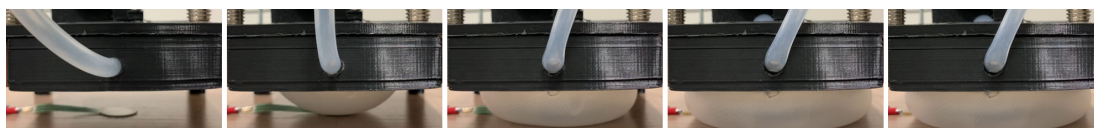


図 5.8: 空気圧バルーン接触圧力測定過程.

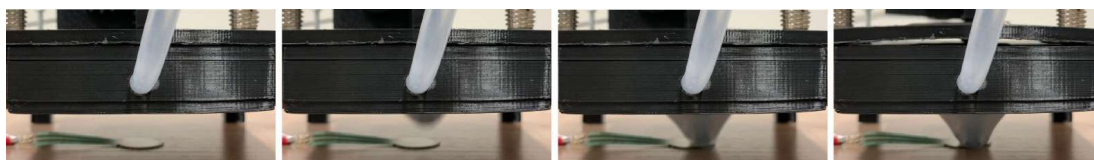


図 5.9: 機械式ピストン接触圧力測定過程.

図 5.8 より、空気圧バルーンを用いることで刺激面積を柔軟に変化させることができるとわかった。図 5.11 より、作成した機械式ピストンの接触圧力について、今回測定した範囲での最小値は 67 kPa、最大値は 725 kPa であった。また図 5.11 より、接触圧力は非常に短い時間で最大値に到達していることがわかった。両機構の最大圧力値には 600 kPa 程度の差があるため、軟らかさと硬さをそれぞれ区別して提示できると考えられる。

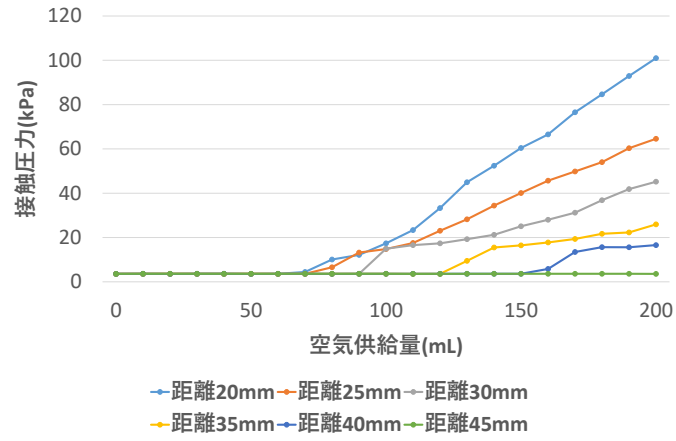


図 5.10: 空気供給量と空気圧バルーン接触圧力の関係.

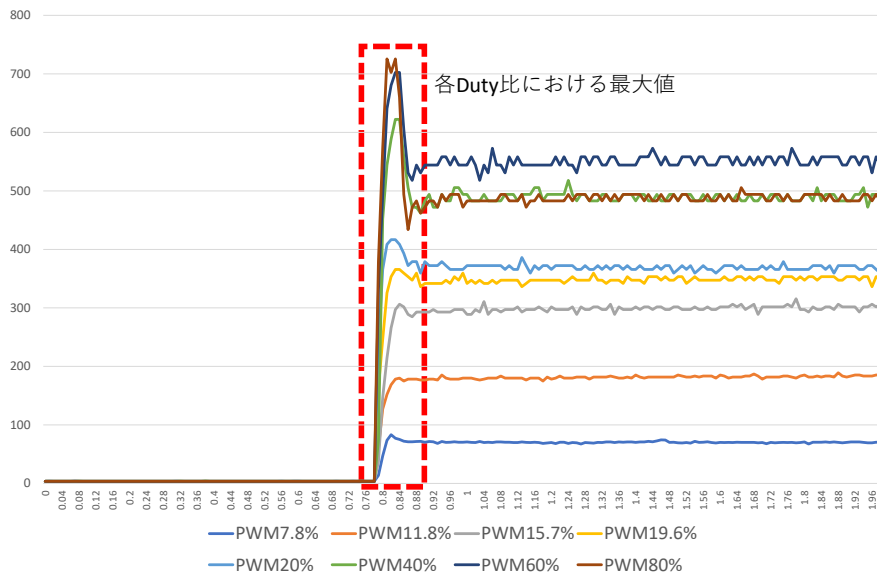


図 5.11: 機械式ピストン接触圧力の変化

第 6 章 知覚特性評価実験

6.1 実験目的

試作デバイスが人に対して何段階の硬軟を提示できるかを明らかにするため、軟らかさ知覚と硬さ知覚についてそれぞれ実験と評価を行なった。

6.2 軟らかさの知覚

6.2.1 実験条件

試作デバイスが人に対して何段階の軟らかさを提示できるのかを明らかにするため、標準刺激に対する弁別閾 (DL) を測定した。

6.2.2 計測方法

DL の測定には極限法 [21] を用いた。極限法は実験者が比較対象となる刺激 (比較刺激) を一定の間隔で変化させ、参加者の標準刺激に対する差異判断の変化により値を求める手法である。極限法を用いることで、最初の代表値以外の標準刺激は、参加者の知覚によって決定されていく。これにより、標準刺激の刻みを実験者が決定することによる、参加者の負担や実験結果への影響を減らすことができる。

参加者に対する軟らかさの提示部位は手のひらとした。手のひらは人が物体の硬軟を知覚する上で一般的に用いられる身体部位である。また、刺激の変化を知覚する上で十分な表面積と感度を備えている [22]。測定時、参加者はデバイスに対して垂直方向に手のひらを動かし、空気圧バルーン表面に触れる。参加者ごとに手の動かし方が異なることは結果に影響を及ぼすと考えられるが、対象を十分に知覚するまでインタラクションを許す制約条件において得られる知覚特性は応用面で有利である。そのため、教示によって手の動きをある程度統制し十分に知覚した段階で評価をさせた。

測定時には、参加者の意識を提示部位に与えられる刺激に集中させることが望ましい。そのため、デバイスと参加者自身の手のひらを視覚障害物で覆い、参加者が

視認できないようにした。参加者が手のひらを動かす際の補助として、デバイスと手のひらの直上である視覚障害物上部には目印をつけた。空気圧バルーンへの空気供給は実験者が手動で行った。測定環境を図 6.1 に示す。

6.2.3 実験手順

実験手順の概要を図 6.2 に示す。最初の標準刺激は、デバイスの物理的な出力の中央値である空気供給量 100 mL の時の軟らかさとした。この標準刺激に対して、極限法に則って比較刺激を提示した。この時、順序効果を考慮して、空気供給量の上限と下限からの二通りの比較を行う。これにより、標準刺激に対して、二通りの DL が測定された。その後、二通りの DL の上限値同士、下限値同士の平均を算出した。上限値と下限値の平均を、それぞれ次の標準刺激として、比較刺激との比較を行なった。上記を、標準刺激がデバイスの出力限界に達するまで行った。実験参加者は成人男性 8 人 (右利き 6 人, 左利き 2 人) である。

6.2.4 結果と考察

各参加者の実験結果を図 6.3 に示す。本実験における軟らかさ知覚段階の最低は 4 段階、最大は 7 段階であった。参加者全体の結果としてまとめたものを図 6.4 に示す。縦軸は標準刺激、横軸は主観的等価点 (PSE) とした。図中の青点は PSE か



図 6.1: 軟らかさ知覚測定環境.

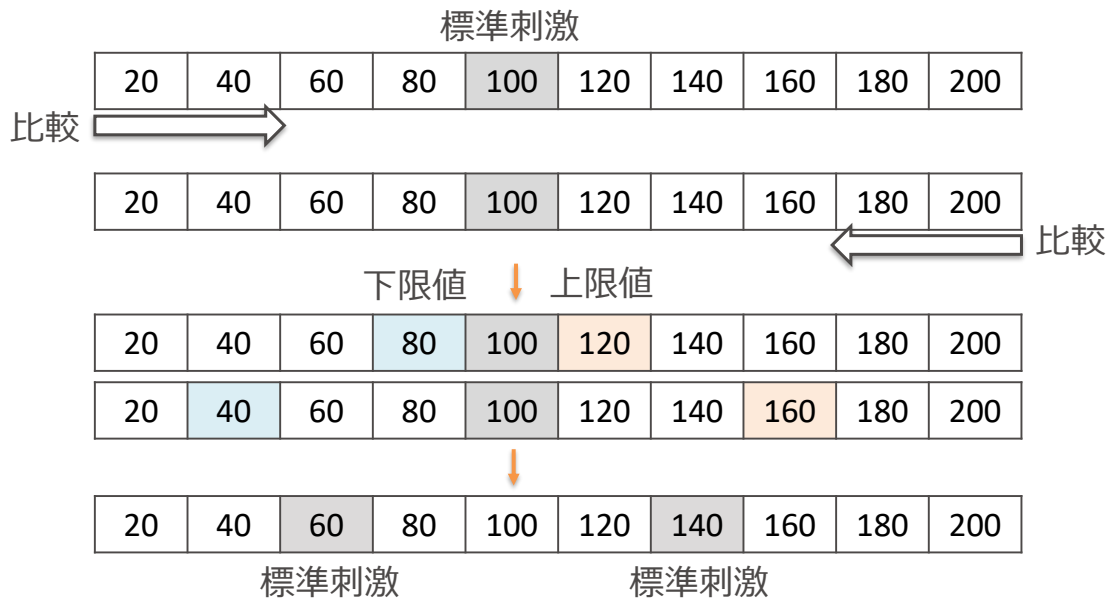


図 6.2: 軟らかさ知覚測定手順.

ら DL の値を引いた値，つまり標準刺激と等価だと感じる範囲の下限，赤点は PSE に DL の値を足した値，つまり標準刺激と等価だと感じる範囲の上限である．また， n は，その標準刺激の段階を知覚できた参加者の人数である．PSE，下限値，上限値それぞれについて一次の近似を行ったものを図 6.5 に示す．PSE の上限値の近似直線と PSE の下限値の近似曲線間の幅は，標準刺激の値が大きくなるほど大きくなっている．加えて，参加者の多くは「空気供給量の上限からの比較が難しかった」，「標準刺激が大きくなるにつれて標準刺激と比較刺激の違いがわかりにくくなった」とコメントしていたことから，ウェーバー・フェヒナーの法則に則っていると考えられる．

近似直線をもとに試作デバイスによる軟らかさ知覚の知覚可能段階を推定したものを図 6.6 に示す．知覚可能段階はデバイスの性能限界の下限から開始する場合と上限から開始する場合の二通りを推定した．性能限界の下限から開始する場合，次の段階の推定には PSE の上限値の近似直線を利用する．ある段階における PSE の最大値を，PSE の上限値の近似直線に代入した値を次の段階の標準刺激とする．性能限界の上限から開始する場合，次の段階の推定には PSE の下限値の近似直線を

利用する。ある段階における PSE の最小値を、PSE の下限値の近似直線に代入した値を次の段階の標準刺激とする。本実験における推定では、両推定から推定された知覚段階はともに 5 段階であった。つまり、試作デバイスは人に対して 5 段階の軟らかさを提示可能だと言える。

6.3 硬さの知覚

6.3.1 実験条件

試作デバイスが人に対して何段階の硬さを提示できるのかを明らかにするため、標準刺激に対する DL を測定した。

6.3.2 計測方法

軟らかさ知覚の実験と同様に、DL の測定には極限法を用いた。また、硬さの提示部位は手のひらとした。測定時には、手のひらを上向きに固定した。ピストンは手のひら中央に対して垂直方向に上下させ、参加者に刺激を提示した。測定環境を図 6.7 に示す。

6.3.3 実験手順

まず、軟らかさ知覚と同様に最初の代表値である標準刺激を決定した。最初の標準刺激は、ピストン機構のギアを回転させるモータの Duty 比 60% の時の硬さとした。この標準刺激に対して、極限法に則って比較刺激を提示した。この時、順序効果を考慮して、空気供給量の上限と下限からの二通りの比較を行う。これにより、標準刺激に対して、二通りの DL が測定された。その後、二通りの DL の上限値同士、下限値同士の平均を算出した。上限値と下限値の平均を、それぞれ次の標準刺激として、比較刺激との比較を行なった。上記を、標準刺激がデバイスの出力限界に達するまで行った。実験参加者は成人男性 8 人 (右利き 7 人, 左利き 1 人) である。

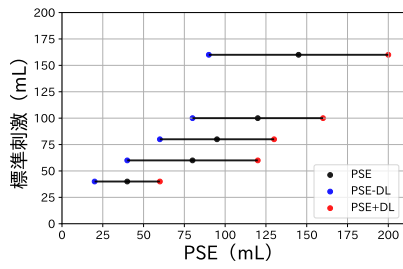
6.3.4 結果と考察

各参加者の実験結果を図 6.8 に示す。本実験における硬さ知覚段階の最低は 1 段階、最大は 3 段階であった。参加者全体の結果としてまとめたものを図 6.9 に示す。縦軸は標準刺激、横軸は主観的等価点 (PSE) とした。図中の青点は PSE から DL の値を引いた値、つまり標準刺激と等価だと感じる範囲の下限、赤点は PSE に DL の値を足した値、つまり標準刺激と等価だと感じる範囲の上限である。また、 n は、その標準刺激の段階を知覚できた参加者の人数である。PSE、下限値、上限値それぞれについて一次の近似を行ったものを図 6.10 に示す。

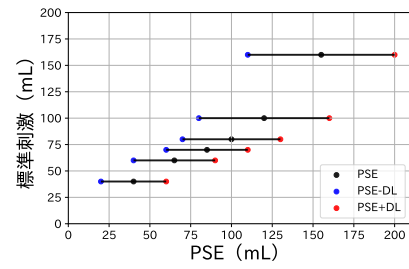
近似直線をもとに試作デバイスによる硬さ知覚の知覚可能段階を推定したものを図 6.11 に示す。知覚可能段階はデバイスの性能限界の下限から開始する場合と上限から開始する場合の二通りを推定した。性能限界の下限から開始する場合、次の段階の推定には PSE の上限値の近似直線を利用する。ある段階における PSE の最大値を、PSE の上限値の近似直線に代入した値を次の段階の標準刺激とする。性能限界の上限から開始する場合、次の段階の推定には PSE の下限値の近似直線を利用する。ある段階における PSE の最小値を、PSE の下限値の近似直線に代入した値を次の段階の標準刺激とする。本実験における推定では、両推定から推定された知覚段階はともに 3 段階であった。つまり、試作デバイスは人に対して 3 段階の硬さを提示可能だと言える。

6.4 まとめ

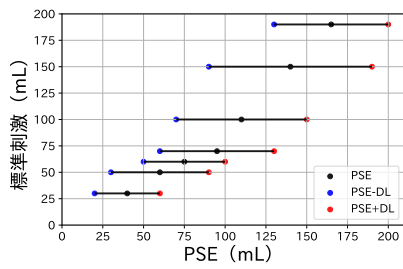
試作デバイスによる軟らかさ知覚段階の最低は 4 段階、最大は 7 段階であった。また、硬さ知覚段階の最低は 1 段階、最大は 3 段階であった。硬軟それぞれに対して、知覚可能段階はデバイスの性能限界の下限から開始する場合と上限から開始する場合の二通りを推定した。両推定から推定された軟らかさ知覚段階はともに 5 段階であった。同様に、両推定から推定された硬さ知覚段階はともに 3 段階であった。



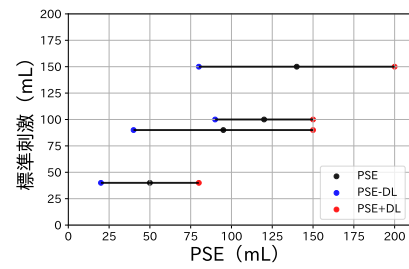
(a) 参加者 A.



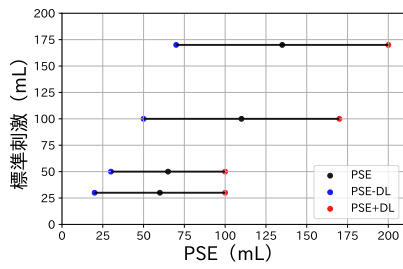
(b) 参加者 B.



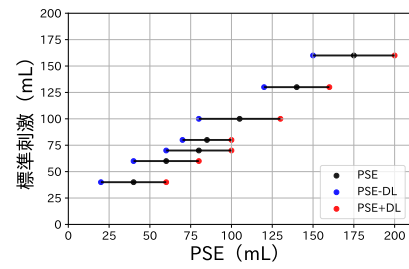
(c) 参加者 C.



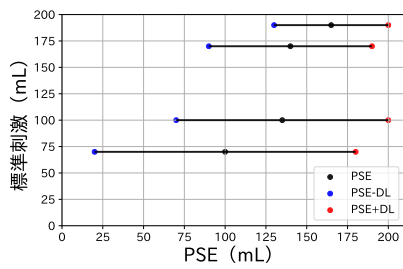
(d) 参加者 D.



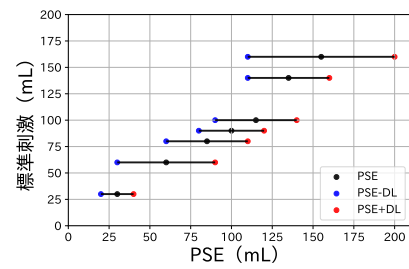
(e) 参加者 E.



(f) 参加者 F.



(g) 参加者 G.



(h) 参加者 H.

図 6.3: 軟らかさ知覚実験結果 (各参加者).

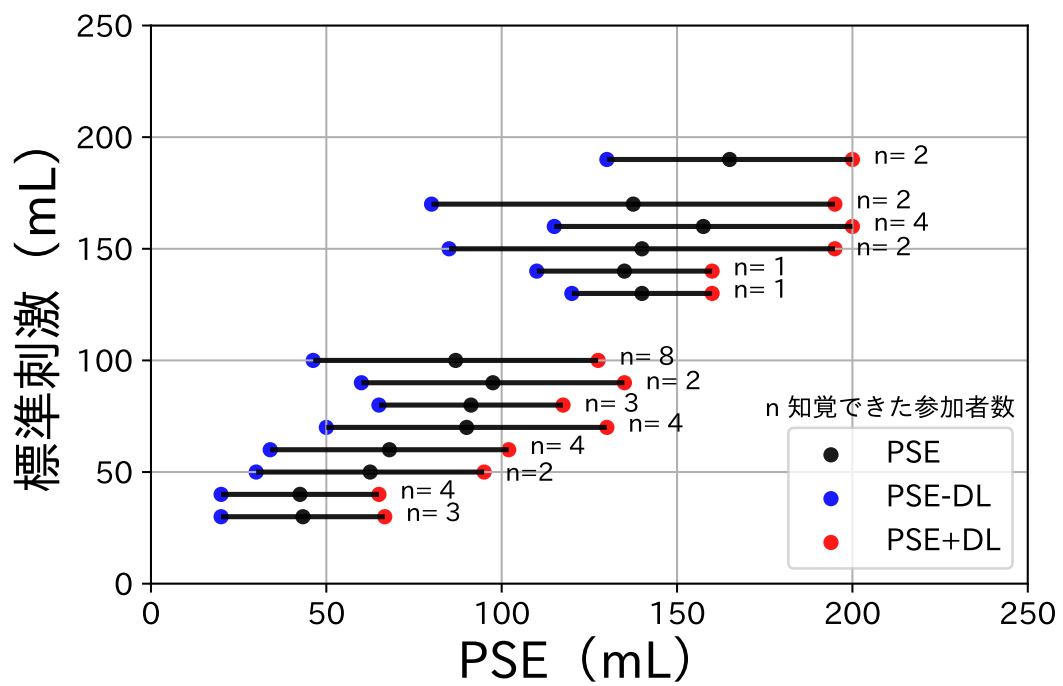


図 6.4: 軟らかさ知覚実験結果 (参加者全体).

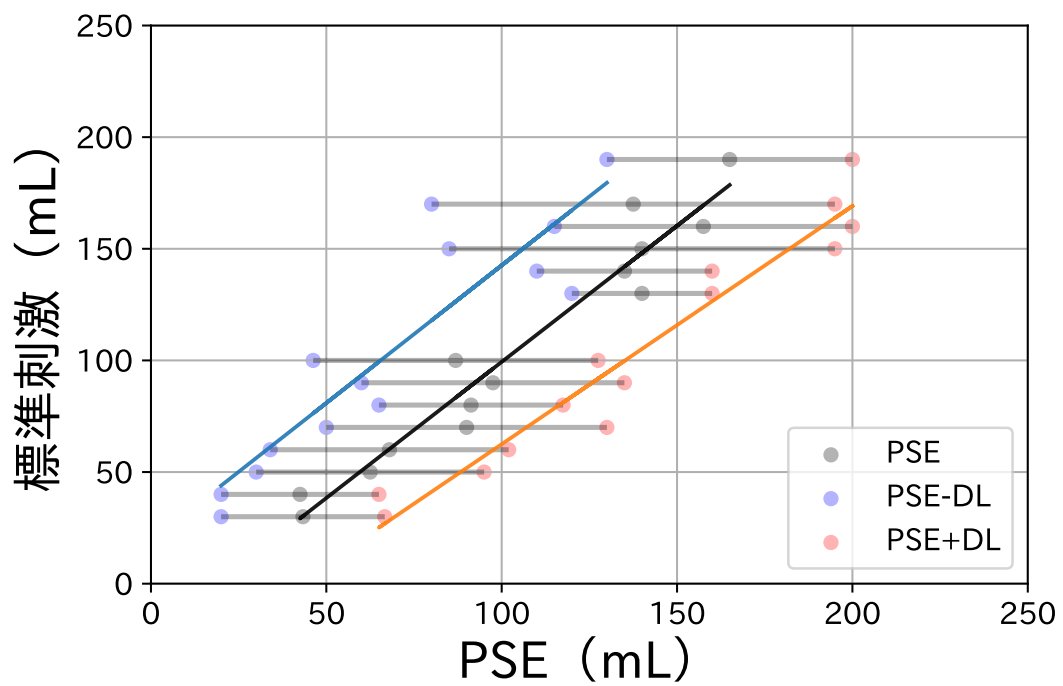


図 6.5: 軟らかさ知覚実験結果 (参加者全体) の一次近似.

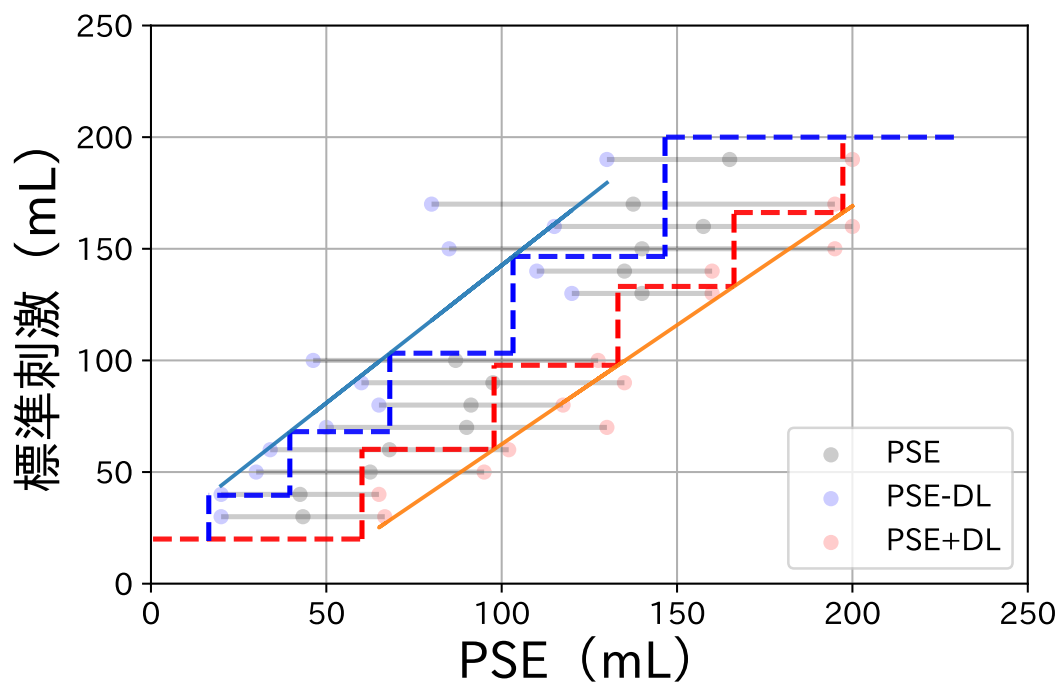
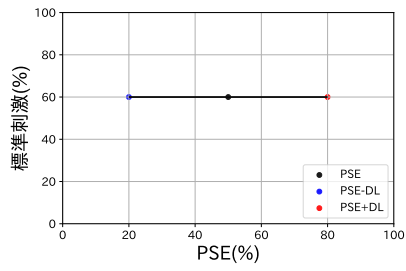


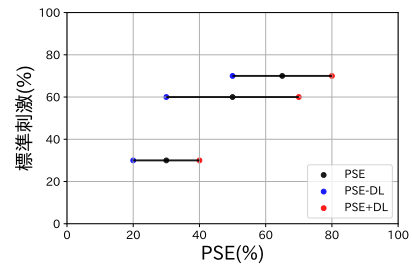
図 6.6: 軟らかさ知覚の知覚可能段階の推定.



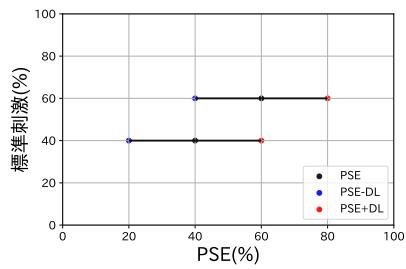
図 6.7: 硬さ知覚測定環境.



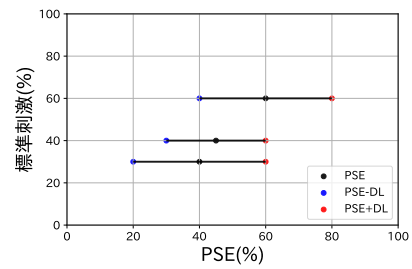
(a) 参加者 A.



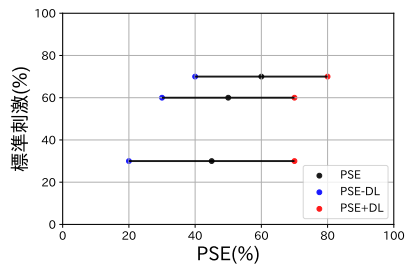
(b) 参加者 B.



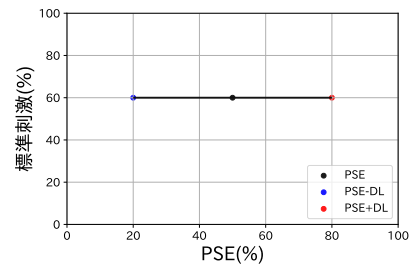
(c) 参加者 C.



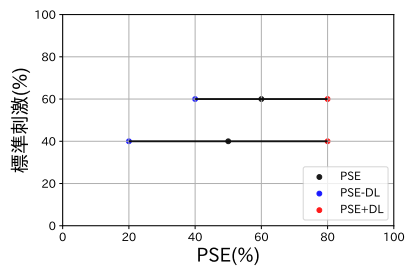
(d) 参加者 D.



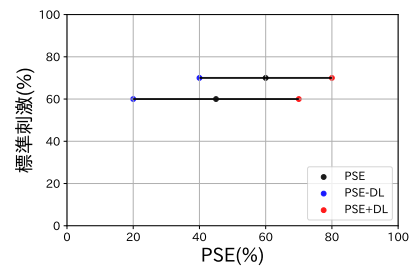
(e) 参加者 E.



(f) 参加者 F.



(g) 参加者 G.



(h) 参加者 H.

図 6.8: 硬さ知覚実験結果 (各参加者).

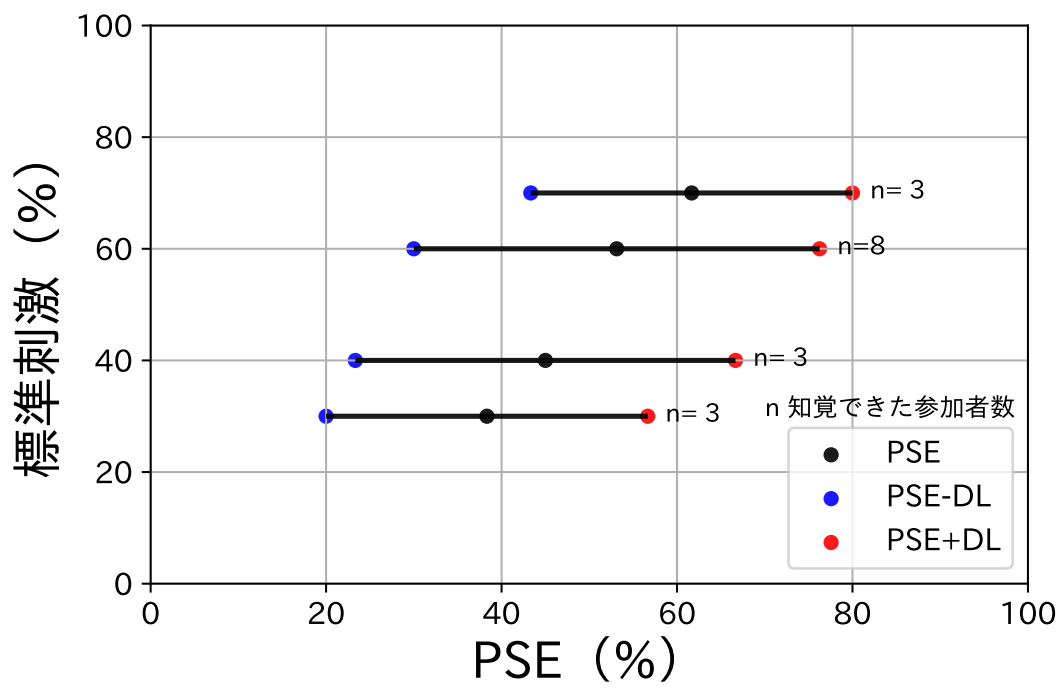


図 6.9: 硬さ知覚実験結果 (参加者全体).

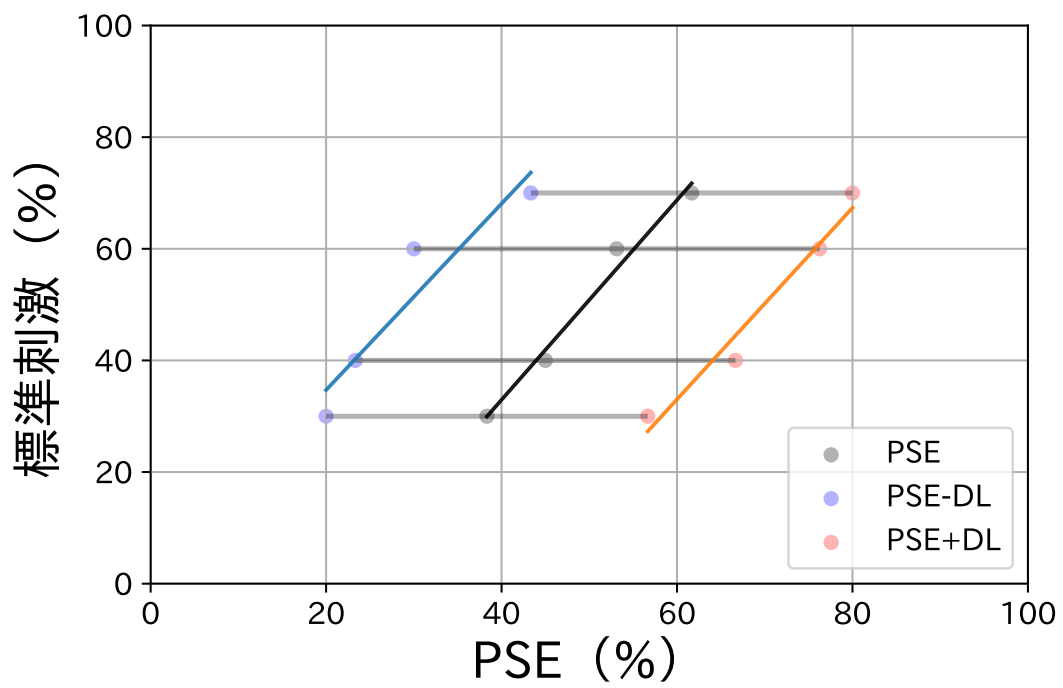


図 6.10: 硬さ知覚実験結果 (参加者全体) の一次近似.

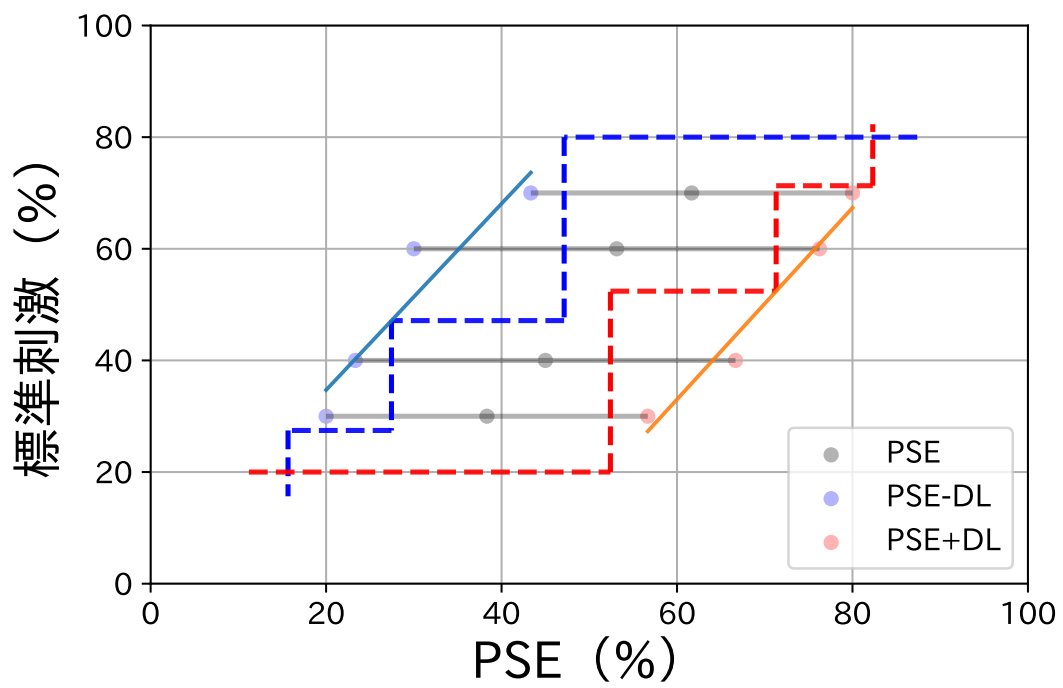


図 6.11: 硬さ知覚の知覚可能段階の推定.

第7章 VR コンテンツにおける有効性評価実験

7.1 実験目的

試作デバイスがVR体験を向上させるか、また、視覚情報から連想される硬軟と同等の触覚フィードバックを提示できているかを明らかにするため、VR体験における実験と評価を行った。

7.2 コンテンツ実装

実験に用いるVRコンテンツを実装した。VRコンテンツに求められる機能は、提示物体の切り替えと試作デバイスとの連動である。提示物体は、デバイスで提示できる硬軟範囲における軟らかさ、中間的な硬軟、硬さのものであることが望ましい。そこで、5章で明らかにした試作デバイスの物理特性と物体自体のヤング率を考慮し、マシュマロ [23]、サッカーボール [24]、人の拳 [25] に決定した。拳については、機械式ピストン1本での再現のため、面全体が接触するのではなく、中指の第二関節部分が接触するような設定とした。

実装したVRコンテンツを図7.1に示す。HMDにはHTC Vive Proを使用した。物体の切り替えや試作デバイスへの動作開始命令は実験者がキーボードで行う。参加者の手のひらの位置はLeap Motionによってトラッキングする。また、デバイスとVRコンテンツ内の物体の位置を調整するためにVIVE Trackerを用いた。空気圧バルーンへの空気供給とモータ起動は実験者が手動で行った。

7.3 実験条件

試作デバイスがVR空間でのモノの硬軟の知覚において有効かを明らかにするため、実装したVRコンテンツ体験時の参加者の心理測定を行った。また、視覚情報から連想される硬軟と同等の触覚フィードバックを提示できているかを明らかにするため、視覚情報と提示刺激の比較を行なった。

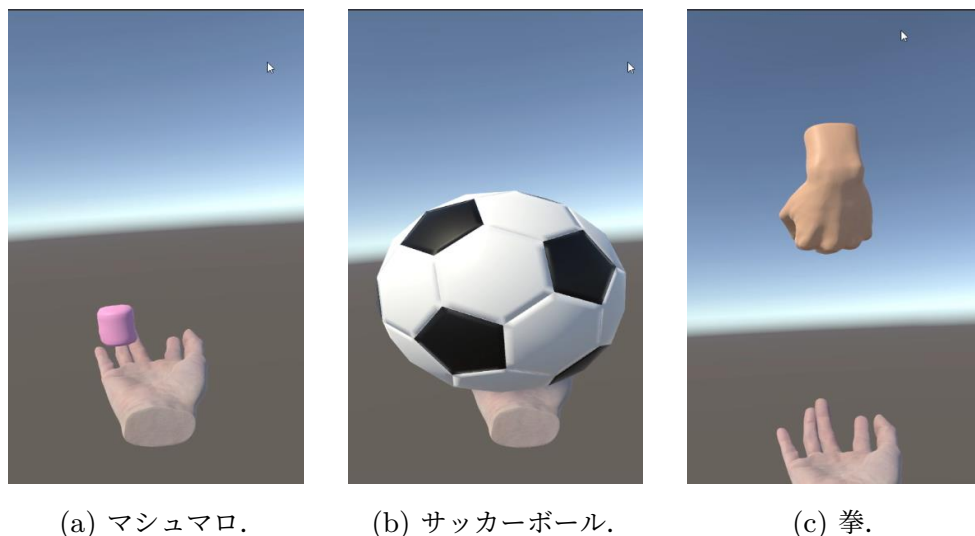


図 7.1: VR コンテンツにおける各オブジェクトの様子.

7.3.1 計測方法

VR 体験における参加者の心理測定には Visual Analog Scale (VAS) を用いた。VAS とは、スケール調査 (評点尺度) の一手法である。従来の Likert Scale (順序尺度) に比べより柔軟な、離散的でない回答が可能であるので、VAS によるスケール調査は参加者の感覚的な「量」をよりの確に示すことが可能な手法といえる。参加者は各項目に対し、それぞれの直線上の任意の点をプロットすることで主観評価測定に回答する。この回答については、左端を 0, 右端を 1 とした数値として定量化する。

視覚情報と提示刺激の比較においては、各オブジェクトに対応した実物体のヤング率をもとに決定した。測定環境を図 7.2 に示す。成人男性 10 名, 成人女性 2 名, 計 12 人の参加者 (右利き 11 人, 左利き 1 人) に対して、試作デバイスの有無のみを変えて実験を行なった。



図 7.2: VR 体験実験環境.

7.4 実験手順

本実験は大きく二つのタスクに分かれている。一つ目のタスクにおいては試作デバイスの VR 体験への有効性を検証した。VR コンテンツ上で物体を提示し、参加者にはオブジェクトの表面を下から、最大 2 分の制限時間内でその硬軟を十分に知覚できるまで触れるように指示した。その後、以下の 4 つの設問について VAS で回答させた。VAS アンケートフォームを図 7.3 に示す。

- (1) VR 体験はどれくらいリアルだと感じましたか？
- (2) この体験がどれくらい好きでしたか？
- (3) この体験はどれくらい楽しかったですか？
- (4) この体験にどれくらい違和感を覚えましたか？

アンケート

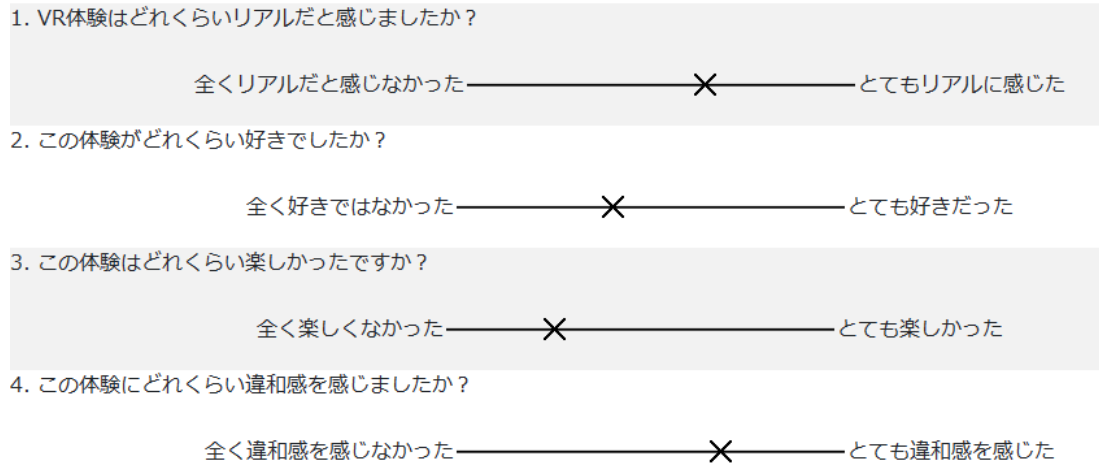


図 7.3: VAS による主観評価測定.

設問 1 から 3 は、VR 体験のリアルさ、嗜好性、楽しさを問うものである。設問 4 は VR 体験における総合的な違和感を問うものである。上記を各物体、試作デバイスの有無を変えて行なった。

二つ目のタスクにおいては、視覚情報と触覚フィードバックの比較を行なった。比較は試作デバイスありの条件で行った。VR コンテンツにおいて物体を表示し、あらかじめ実験者が決定した 3 種類の刺激を提示した。刺激の内訳は、実物体のヤング率から決定した刺激を基準とし、これに加えて 6 章で作成した知覚の段階から求めた、1 段下・1 段上の段階における平均値の刺激である。拳のみ、試作デバイスの性能限界の都合上、実物体のヤング率から決定した刺激は出力の最大値となっているため、残りの 2 種類の刺激は、1 段下・2 段下の段階における平均値の刺激としている。各刺激について参加者には最大 2 分の制限時間内で自身の評価に確信が持てるまで触れるように指示した。その後、視覚情報から連想される硬軟に最も近かった段階を回答させた。上記を各物体について行った。

上記二つのタスクにおけるオブジェクトや刺激の提示順序は、順序効果を考慮して表 7.4 のように決定した。

被験者	オブジェクト提示順序			提示刺激順序								
	Obj1	Obj2	Obj3	M1	M2	M3	S1	S2	S3	N1	N2	N3
A	M	S	N	80mL	100mL	150mL	120mL	150mL	180mL	20%	40%	80%
B	M	N	S	80mL	150mL	100mL	120mL	180mL	150mL	20%	80%	40%
C	S	M	N	100mL	80mL	150mL	150mL	120mL	180mL	40%	20%	80%
D	S	N	M	100mL	150mL	80mL	150mL	180mL	120mL	40%	80%	20%
E	N	M	S	150mL	80mL	100mL	180mL	120mL	150mL	80%	20%	40%
F	N	S	M	150mL	100mL	80mL	180mL	150mL	120mL	80%	40%	20%
G	M	S	N	80mL	100mL	150mL	120mL	150mL	180mL	20%	40%	80%
H	M	N	S	80mL	150mL	100mL	120mL	180mL	150mL	20%	80%	40%
I	S	M	N	100mL	80mL	150mL	150mL	120mL	180mL	40%	20%	80%
J	S	N	M	100mL	150mL	80mL	150mL	180mL	120mL	40%	80%	20%
K	N	M	S	150mL	80mL	100mL	180mL	120mL	150mL	80%	20%	40%
L	N	S	M	150mL	100mL	80mL	180mL	150mL	120mL	80%	40%	20%

M: マシュマロ S: サッカーボール N: こぶし

図 7.4: 順序効果を考慮したオブジェクトと刺激の提示順序.



図 7.5: 各オブジェクトと対応した実際の物体.

二つのタスクが終了した後、参加者には VR 体験で触ったオブジェクトに対応した実際の物体 (図 7.5) を触らせた。その後、参加者には自由に意見や感想を述べるよう指示を出した。

7.5 結果と考察

まず、一つ目のタスクについて、アンケート結果を対応のある t 検定にかけた。マシュマロ、サッカーボール、拳に関する結果を図 7.6, 図 7.7, 図 7.8 にそれぞれ示す。各項目に関して有意差があり、すべてのオブジェクトで試作デバイスがある

ことの有効性が確認された。このことから、試作デバイスによって VR 体験は向上したと言える。

二つ目のタスクの回答結果をまとめたものを図 7.9 に示す。オブジェクトごとに、物理量から設定した刺激と参加者の回答の一致率は異なり、マシュマロが 33%、サッカーボールが 16.7%、拳が 58.3% であった。これらには参加者が各オブジェクトを触った経験が大きく影響していると考えられる。そこで、参加者のコメントから、この結果についての考察を述べる。マシュマロは、下から触ったことがある参加者は少なかったため、回答がばらついたと考えられる。サッカーボールは、試作デバイスにおける接触面の表面材質や曲率が回答に影響を与えたと考えられる。拳は、参加者が日常的に触れることが多い身体部位であることから回答が収束した一方で、オブジェクトの表面形状の違和感などによりばらつきが生じたと考えられる。このことから、デバイスの出力を物性のマッチングではなく知覚のマッチングから決定する必要がある事が示唆された。一方で、各オブジェクトについて、度数分布で見たときに参加者が回答した刺激の平均値は、知覚の段階において実験者が実物体のヤング率から決定した刺激と同じ段階にあった。つまり、視覚から連想された知覚の平均と、実物体のヤング率から決定した刺激、つまり試作デバイスによって提示される触覚フィードバックに大きなずれはなく、試作デバイスは実物体の触覚フィードバックにおいて一定の再現性を持つと言える。

7.6 まとめ

試作デバイスは、リアルさ、好み、楽しさ、違和感の項目において VR 体験を向上させたと言える。また、視覚情報から連想される硬軟と触覚フィードバックの比較結果にはばらつきが生じたことから、デバイスの出力を物性のマッチングではなく知覚のマッチングから決定する必要がある事が示唆された。一方で、視覚から連想された知覚の平均と、実物体のヤング率から決定した刺激、つまり試作デバイスによって提示される触覚フィードバックに大きなずれはなく、試作デバイスは実物体の触覚フィードバックにおいて一定の再現性を持つと言える。

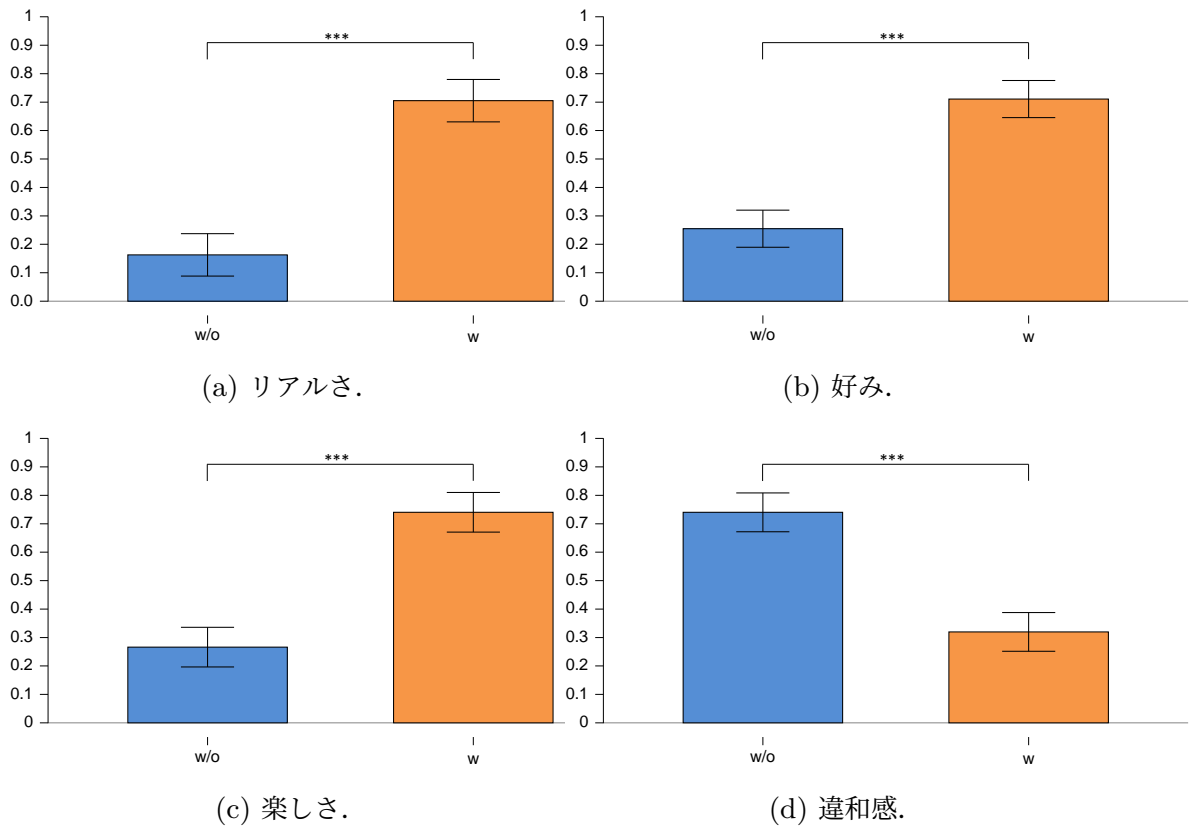


図 7.6: マシュマロに関するアンケート各項目の対応ある t 検定結果 (青: デバイスなし, 橙: デバイスあり, ***: $p < 0.001$).

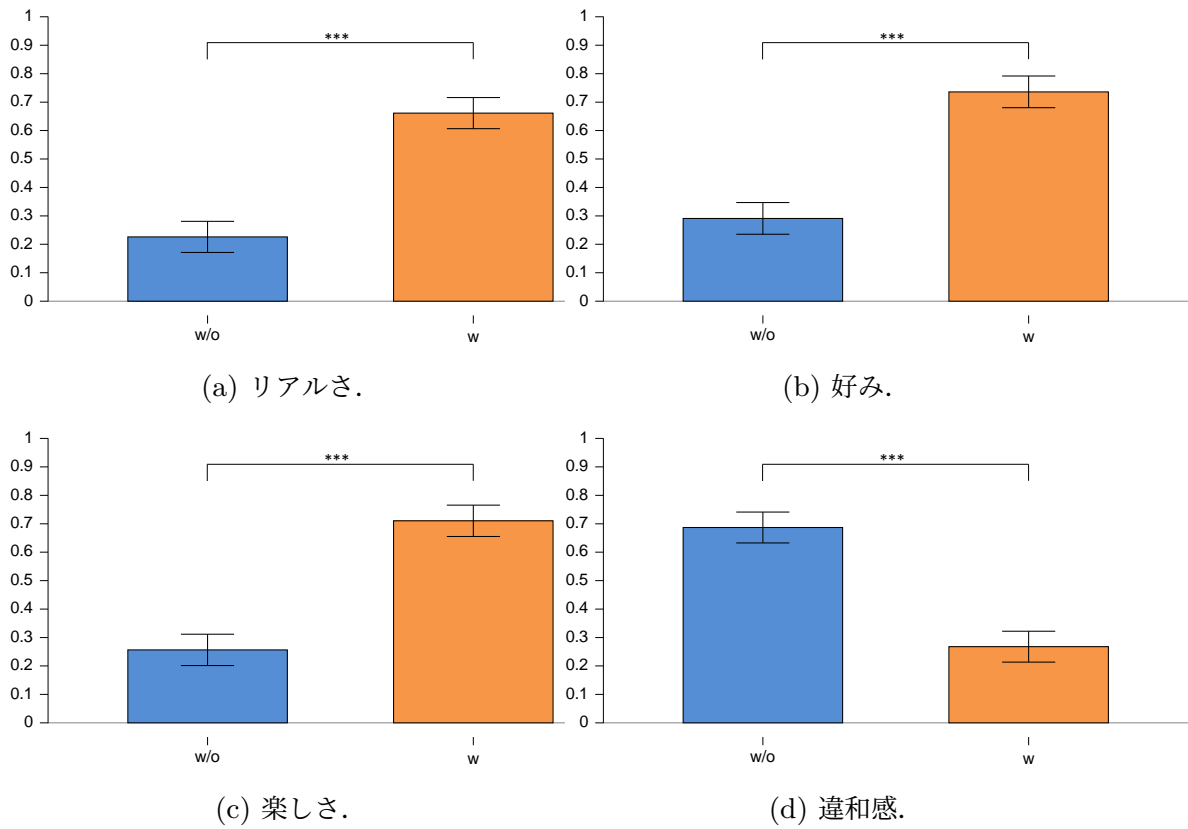


図 7.7: サッカーボールに関するアンケート各項目の対応ある t 検定結果 (青: デバイスなし, 橙: デバイスあり, ***: $p < 0.001$).

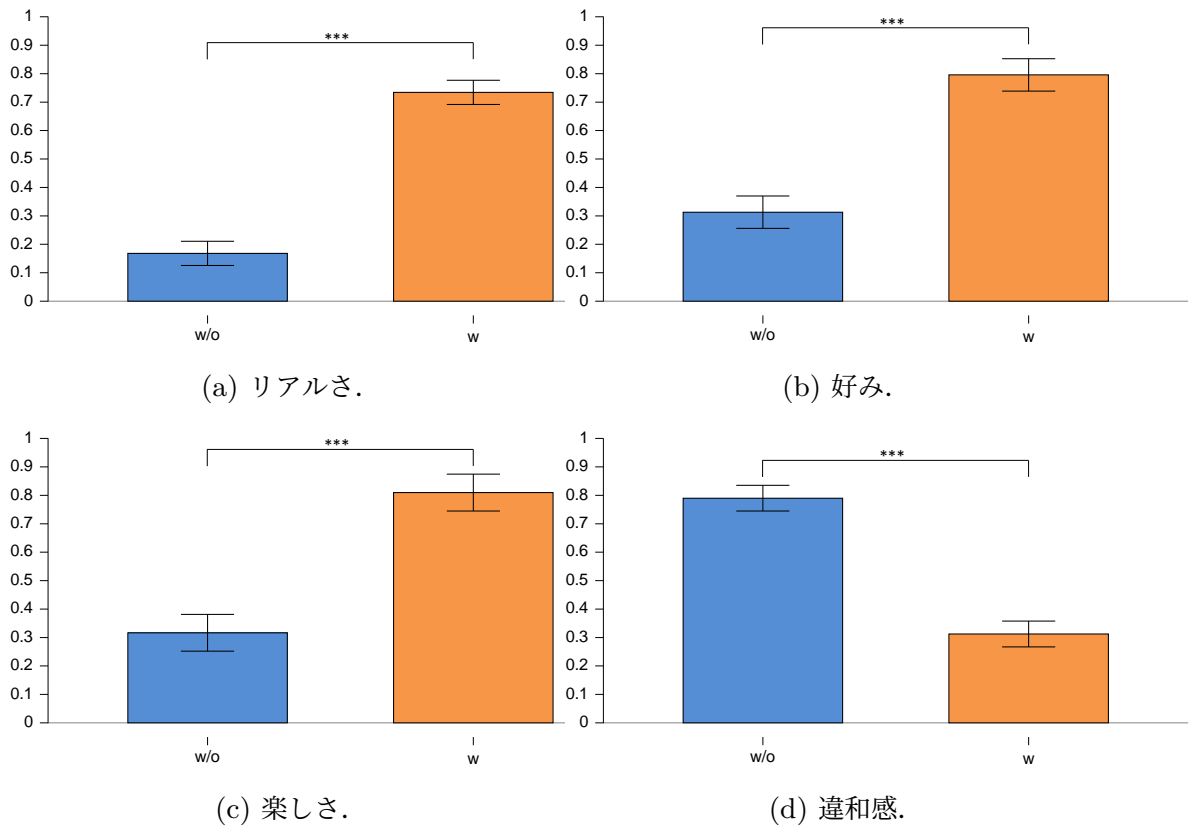


図 7.8: 拳に関するアンケート各項目の対応ある t 検定結果 (青: デバイスなし, 橙: デバイスあり, ***: $p < 0.001$).

α : 実験者が実物体の応力から定めた段階

$\alpha - 1$: 知覚の階段で見たときに α より一段下の段階

$\alpha + 1$: 知覚の階段で見たときに α より一段上の段階

$\alpha - 2$: 知覚の階段で見たときに α より二段下の段階

マシュマロ		
$\alpha - 1$	α	$\alpha + 1$
3人	4人	5人

$$(\alpha/12) * 100 = 33.3\%$$

サッカーボール		
$\alpha - 1$	α	$\alpha + 1$
6人	2人	4人

$$(\alpha/12) * 100 = 16.7\%$$

拳		
$\alpha - 2$	$\alpha - 1$	α
3人	2人	7人

$$(\alpha/12) * 100 = 58.3\%$$

図 7.9: 視覚情報から連想される硬軟に最も近かった段階の回答結果.

第 8 章 おわりに

8.1 結論

本研究では，刺激面の自由度が高い硬軟提示が可能な触力覚提示デバイスを提案した．そして，提案システムの物理特性，知覚特性，VR 体験における有効性を評価するための実験を行った．物理特性評価実験では，表面の硬度，変位，接触圧力を測定し，試作デバイスが硬軟提示に十分な出力を有していることを確認した．知覚特性評価実験では，硬軟それぞれの弁別閾を測定し，試作デバイスが 5 段階の軟らかさ，3 段階の硬さを提示可能であると明らかにした．

VR 体験における有効性評価実験では，リアルさ，好み，楽しさ，違和感に関するアンケートと，視覚情報から連想される硬軟と触覚フィードバックの比較を行った．アンケートの結果から，試作デバイスによる VR 体験の向上が示唆された．また，視覚情報から連想される硬軟と触覚フィードバックの比較結果にはばらつきが生じたことから，デバイスの出力を物性のマッチングではなく知覚のマッチングから決定する必要がある事が示唆された．一方で，視覚から連想された知覚の平均と，実物体のヤング率から決定した刺激，つまり試作デバイスによって提示される触覚フィードバックに大きなずれはなく，試作デバイスは実物体の触覚フィードバックにおいて一定の再現性を持つと言える．

以上より，提案システムは硬軟提示に関して一定の出力と提示レンジを持ち，VR 体験におけるリアルさ，好み，楽しさの向上や実物体の触覚再現に有用であると言える．

8.2 今後の展望

8.2.1 ピストンのグリッド化

試作デバイスの改善点として，硬さ提示における自由度が高くないということが挙げられる．軟らかさ提示については，空気圧バルーンによって一定の自由度を実現しているが，現在の試作デバイスにおいては機械式ピストンは一本であるため，刺激面積を変化させることができない．そこで，先行研究 [20] を参考に機械

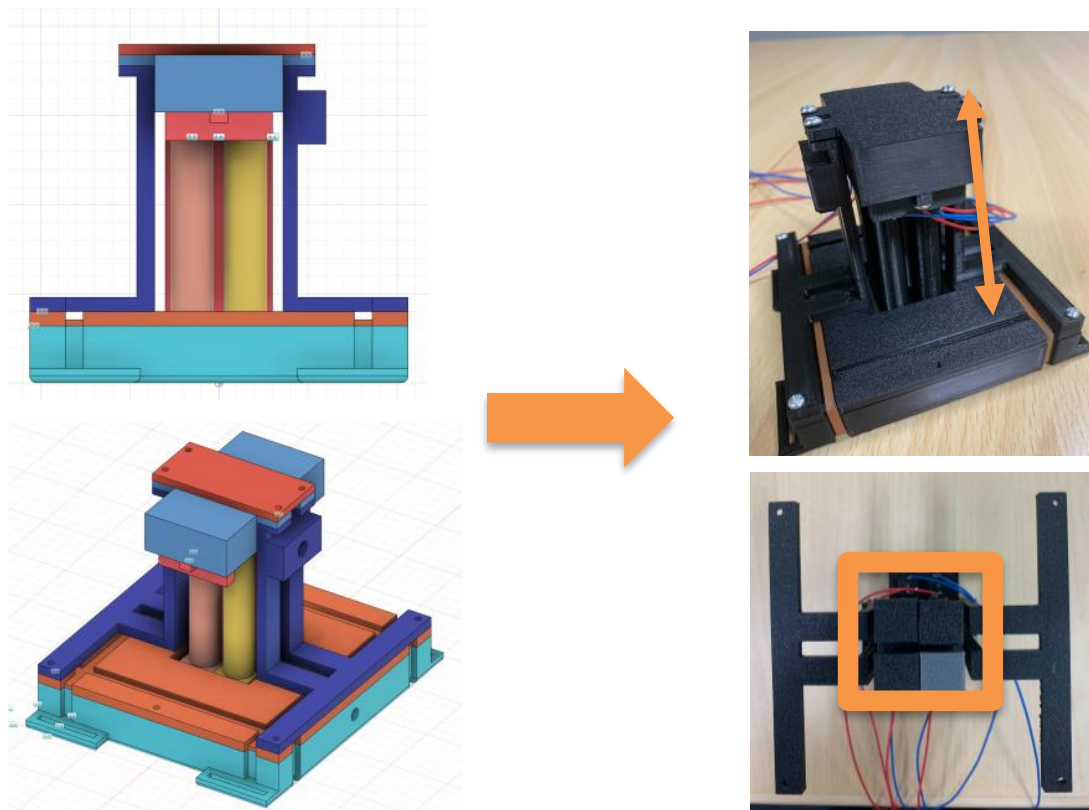


図 8.1: 機械式ピストンをグリッド化したデバイス。

式ピストンのグリッド化を行う必要がある。グリッド化したデバイスの設計と、試作を図 8.1 に示す。試作における機械式ピストンのグリッドは 2×2 で構成している。グリッド化にあたり、小型化のため機構を変更し、モータもより小型のもの (1024GA20) を採用した。機構は先行研究を参考に、モータの回転運動を上下運動に変換するものにした。グリッド化により、硬さ提示における刺激面積を変化させることができるため、提示レンジの向上が期待される。

8.2.2 各機構の制御・自動化

現状の実装ではモータの制御をキー入力で行っているが、実際のアプリケーションではバーチャルなオブジェクトや生物の動きなどと連動して自動で制御するほう

が望ましい。そのため、空気供給部やグリッド化した機械式ピストンについて、物理特性評価実験の結果をもとに制御システムを構築する必要がある。制御システムにおいては、各機構が動作するときの相互干渉や、視覚提示される映像情報と触覚提示の遅延に注意する必要がある。これらは圧力センサや光センサを用いて各機構の接触圧力や動作状況をセンシングすることで対応可能である。

謝辞

本研究の遂行、及び論文の作成にあたっては、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。

サイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川清教授には、入学前のインターン及び今に至るまでの研究活動において、数多くのご支援、ご鞭撻をいただきました。心より感謝の意を表します。清川教授の熱心かつ丁寧な指導や日々の研究姿勢から、研究の取り組み方や学問への向き合い方を学びました。

本研究の副査を担当いただき、学内発表にて有益で的確なご助言をいただきました、インタラクティブメディア設計学研究室 加藤博一教授に御礼申し上げます。

また、知覚特性実験について専門的な立場から有益で的確なご助言をいただきました、筑波大学 黒田嘉宏教授に御礼申し上げます。

本研究に関して多角的な視点からご助言をいただき、実験環境の構築や撮影において機材をお貸しいただきましたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 内山英昭准教授に感謝いたします。

デバイス作成に必要な材料や実験器具の購入手続きをしていただきましたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 磯山直也助教に感謝いたします。物腰が柔らかく学生と同じ目線に立ち、気さくに話しかけていただいたことで、学校生活や研究における不安が軽くなりました。

実験条件や評価手法について専門的な立場から有益なご助言をいただきました、サイバネティクス・リアリティ工学研究室 Monica Perusquía-Hernández 助教に感謝いたします。

学生生活の遂行に際して、必要な事務処理など多岐にわたりご協力いただきました、サイバネティクス・リアリティ工学研究室秘書 中村美奈様、佐藤好枝様に感謝いたします。

また、本学での学生生活を一緒に過ごしたサイバネティクス・リアリティ工学研究室の先輩、後輩の皆様に感謝いたします。特に、研究に関しての助言や、学生生活においての不安などを、暖かく聞いていただいた萩森大貴先輩に感謝いたします。実験の設計や解析について、根気強く、熱心かつ丁寧に指導いただきましたおかげで、本研究を遂行することができました。日々の生活や研究においても、かく

あるべしという姿勢を貫かれており，理想の先輩でした．

サイバネティクス・リアリティ工学研究室の同期となった皆様には学生生活を送る上で大変お世話になりました．本研究に関して，多角的な問題解決に大きく貢献してくれた青木大典君，Pornsomchai Sorapon 君に感謝いたします．また，学外で活動する際に様々なサポートをしてくれた窪田太一君，藤澤岳瞭君，宮崎滉己君，宮脇亮輔君に感謝いたします．日々の生活において暖かく接してくれた押見洋土君，音納陸君，松尾彰太君，横路海斗君，Kannappan Vinayak Teoh 君，大塚真帆さんに感謝いたします．皆様のご支援のおかげでとても楽しく充実した毎日を送ることができ，かけがえのない思い出となりました．

最後に私の長い学生生活を温かく見守り，多くの支援をいただいた家族に感謝の意を表します．

参考文献

- [1] Wang Dangxiao, GUO Yuan, LIU Shiyi, Yuru Zhang, Xu Weiliang, and Xiao Jing. Haptic Display for Virtual Reality: Progress and Challenges. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Vol. 1, No. 2, pp. 136–162, 2019.
- [2] Mourad Bouzit, Grigore Burdea, George Popescu, and Rares Boian. The Rutgers Master II-New Design Force-Feedback Glove. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 256–263, 2002.
- [3] Max Pfeiffer, Stefan Schneegass, Florian Alt, and Michael Rohs. Let Me Grab This: a Comparison of EMS and Vibration for Haptic Feedback in Free-Hand Interaction. In *Proceedings of the 5th augmented human international conference*, pp. 1–8, 2014.
- [4] Anna Vallgård, Laurens Boer, and Ben Cahill. The Hedonic Haptic Player. *International Journal of Design*, Vol. 11, No. 3, 2017.
- [5] Takuto Nakamura, Vibol Yem, and Hiroyuki Kajimoto. Hapbelt: Haptic Display for Presenting Vibrotactile and Force Sense Using Belt-Winding Mechanism. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2017.
- [6] Steeven Villa Salazar, Claudio Pacchierotti, Xavier de Tinguy, Anderson Maciel, and Maud Marchal. Altering the Stiffness, Friction, and Shape Perception of Tangible Objects in Virtual Reality Using Wearable Haptics. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 13, No. 1, pp. 167–174, 2020.
- [7] Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, and Eyal Ofek. Normaltouch and Texturetouch: High-Fidelity 3d Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers. In *Proceedings of the 29th annual symposium on user interface software and technology*, pp. 717–728, 2016.
- [8] Robert Kovacs, Eyal Ofek, Mar Gonzalez Franco, Alexa Fay Siu, Sebastian Marwecki, Christian Holz, and Mike Sinclair. Haptic PIVOT: On-Demand Handhelds in VR. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1046–1059, 2020.

- [9] Cathy Fang, Yang Zhang, Matthew Dworman, and Chris Harrison. Wireality: Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–10, 2020.
- [10] Marynel Vázquez, Eric Brockmeyer, Ruta Desai, Chris Harrison, and Scott E Hudson. 3d Printing Pneumatic Device Controls with Variable Activation Force Capabilities. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1295–1304, 2015.
- [11] 永野光, 岡本正吾, 山田陽滋. 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向 (<特集>ハプティクスと VR). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 343–353, 2011.
- [12] 岡本正吾. 触力覚による柔らかさ・硬さ知覚. システム/制御/情報, Vol. 64, No. 4, pp. 121–125, 2020.
- [13] Chi-Jung Lee, Hsin-Ruey Tsai, and Bing-Yu Chen. HairTouch: Providing Stiffness, Roughness and Surface Height Differences Using Reconfigurable Brush Hairs on a VR Controller. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2021.
- [14] Kenji Inoue, Fuyuki Kato, and Suwoong Lee. Haptic Device Using Flexible Sheet and Air Jet for Presenting Virtual Lumps Under Skin. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1749–1754. IEEE, 2009.
- [15] Liang He, Cheng Xu, Ding Xu, and Ryan Brill. PneuHaptic: Delivering Haptic Cues with a Pneumatic Armband. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, pp. 47–48, 2015.
- [16] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L Klatzky, Scott E Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson 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.
- [17] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian

- Holz. CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2018.
- [18] Pedro Lopes, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Impacto: Simulating Physical Impact by Combining Tactile Stimulation with Electrical Muscle Stimulation. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp. 11–19, 2015.
- [19] Ken Nakagaki, Luke Vink, Jared Counts, Daniel Windham, Daniel Leithinger, Sean Follmer, and Hiroshi Ishii. Materiabile: Rendering Dynamic Material Properties in Response to Direct Physical Touch with Shape Changing Interfaces. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2764–2772, 2016.
- [20] Alexa F Siu, Eric J Gonzalez, Shenli Yuan, Jason Ginsberg, Allen Zhao, and Sean Follmer. shapeshift: A mobile tabletop shape display for tangible and haptic interaction. In *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 77–79, 2017.
- [21] Stanley Smith Stevens. Problems and methods of psychophysics. *Psychological Bulletin*, Vol. 55, No. 4, p. 177, 1958.
- [22] Miguel Altamirano Cabrera, Juan Heredia, and Dzmitry Tsetserukou. Tactile perception of objects by the user’s palm for the development of multi-contact wearable tactile displays. In *Haptics: Science, Technology, Applications: 12th International Conference, EuroHaptics 2020, Leiden, The Netherlands, September 6–9, 2020, Proceedings 12*, pp. 51–59. Springer, 2020.
- [23] Kenneth A Pestka. Young’s modulus of a marshmallow. *The Physics Teacher*, Vol. 46, No. 3, pp. 140–141, 2008.
- [24] Alireza Karimi, Reza Razaghi, Mahdi Navidbakhsh, Toshihiro Sera, and Susumu Kudo. Measurement of the mechanical properties of soccer balls using digital image correlation method. 2015.
- [25] Chao Zhang, Pingan Zhu, Yangqiao Lin, Zhongdong Jiao, and Jun Zou.

Modular soft robotics: Modular units, connection mechanisms, and applications. *Advanced Intelligent Systems*, Vol. 2, No. 6, p. 1900166, 2020.

発表リスト

- [1] 藤澤岳瞭, 音納陸, 佐々木卓也, 宮崎滉己, 磯山直也, 内山英昭, 清川清. FinGun. 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, IVRC-16, 2021.
- [2] 佐々木卓也, 萩森大貴, ペルスキアエルナンデス モニカ, 磯山直也, 内山英昭, 清川清, “空気圧バルーンと機械式ピストンを用いた二層構造型触力覚提示デバイスの提案と評価”, IEICE-MVE, Vol. 122, No. 200, pp. 40-45, 2022.