

# バーチャルリアリティ環境における 指先触覚の頭部提示技術の構築

亀岡 嵩幸

電気通信大学大学院情報理工学研究科

博士(工学)学位申請論文

2023年3月

# バーチャルリアリティ環境における 指先触覚の頭部提示技術の構築

博士論文審査委員会

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

著作権所有者

亀岡嵩幸

2023 年

# Construction of Head-Mounted Haptic Technology for Fingertip Haptic Feedback in Virtual Reality Environments

Takayuki Kameoka

## Abstract

In 2023, the term "Virtual Reality (VR)" is gaining widespread usage in conjunction with the proliferation of head-mounted-displays (HMDs). VR technology is being employed not only within the realm of research but also in an array of fields including industrial applications, medical care, nursing training, communication tools, and media. As the adoption of HMDs continues to rise, the presentation of multisensory experiences, in addition to the visual and auditory stimuli provided by the HMD, is being explored in order to create more immersive experiences of higher quality.

Efforts are being made to incorporate various modalities of sensation, such as gustation, olfaction, haptics, and somatosensory perception. However, many of these endeavors necessitate hardware capable of physically eliciting the respective sense, which can be costly to install and operate.

In response to this predicament, this study proposes an approach for seamlessly incorporating tactile cues into virtual reality experiences utilizing HMDs through the integration of a tactile presentation mechanism within the HMD. Furthermore, the study aims to enhance the immersive nature of VR experiences by allowing for hand-based interactions and corresponding tactile feedback to be presented on the face through the incorporation of the aforementioned tactile presentation mechanism within the HMD. Conventionally, tactile sensation generated by hand interactions is conveyed solely to the hand, however, this study endeavors to create a multisensory presentation system that encompasses not only passive sensations but also active experiences through the use of tactile transfer technology commonly employed in sensory prosthetic hands.

Therefore, the objective of this paper is to devise a user-friendly tactile presentation method for virtual reality experiences that aims to achieve two objectives: (1) the design and fabrication of a compact and lightweight tactile presentation device integrated within an HMD and (2) the assessment of the improvement in virtual reality experiences through the presentation of fingertip tactile information on the face.

Firstly, to accomplish the first objective, the development of a compact and lightweight tactile presentation device integrated within an HMD poses a significant challenge due to the limited space available within the HMD. Traditional HMDs with built-in tactile presentation devices have employed either large and heavy skin deformation mechanisms equipped with actuators or small and lightweight physical deformation methods such as heat, smell, and wind. In contrast, this research endeavors to develop an easy-to-use tactile presentation method through the utilization of skin suction technology.

In this study, we employed a skin suction tactile presentation method. The suction tactile presentation method allows for the separation of the actuator component, which is typically heavy, from the tactile presentation component through the use of a connecting tube. As a result, the suction component in contact with the skin can be designed to be small and lightweight, thereby enabling the integration of the tactile presentation component into an HMD. Additionally, suction-based tactile sensation presents an advantage in

that the skin perceives suction stimuli as pressure stimuli, which is crucial for the perception of touch.

In order to fabricate an air-suction type tactile presentation device integrated within an HMD, we conducted an initial investigation on the optimal suction area and suction pressure for tactile stimulation. Our findings revealed that the optimal suction diameter and suction pressure varied depending on the suction area, and that inter-individual variations played a significant role. This is due to the fact that skin deformation, a crucial aspect of suction-based tactile perception, is dependent on the softness of the skin and is influenced by the location on the face and individual variations. However, as a general trend, a suction diameter of approximately 12 mm and a suction pressure of  $-400$  hPa were sufficient for tactile presentation. Additionally, our study found that the sensitivity around the eye area was more acute on the cheek side than on the forehead side, which can be attributed to the amount and softness of skin deformation.

Subsequently, a preliminary study was conducted to assess the impact of presenting tactile information generated by contact with objects in VR environment to the face during a VR experience utilizing an HMD on the overall experience, the sense of haptic engagement with objects, and the realism of objects. The findings indicated that suction-based tactile presentation significantly enhanced the quality of the overall experience and the sense of haptic engagement with objects in comparison to conventional tactile presentation methods such as the use of controllers or vibrators on the face.

Furthermore, an experiment was conducted to determine whether the pressure illusion phenomenon, a characteristic of the suction-based tactile presentation method, also occurs on facial skin. The results confirmed that the perception of pressure is indistinguishable from that of suction if the suction pressure is weak to the extent that it cannot be clearly perceived as suction. Additionally, an effort was made to present the sensation of hardness and softness in order to expand the range of tactile information that can be conveyed through suction-based tactile presentation and to simulate the sensation of haptic engagement with a variety of virtual objects. The study also examined the impact of the user's movements in the VR environment on the perception of tactile information. The results revealed that it is challenging to present the sensation of hardness and softness with user motion and suction-based tactile sensation, however, it is possible to discern the difference in the rate of change when the air pressure is altered dynamically.

In order to enhance the efficiency of the suction-based tactile sensation presentation device, simulations were conducted to analyze the stress generated within the skin during skin suction with various suction shapes, and the correlation with the subjective tactile intensity was investigated to elucidate the mechanism of skin suction perception. In particular, when suction-based tactile sensation is presented on the cheek, it was found that sufficient tactile intensity can be achieved even with weak suction pressure when 2 mm suction holes are densely packed at a distance of 2.5 mm between centers. This suggests that further miniaturization and weight reduction are potential design considerations for suction pressure control devices.

Secondly, in order to enhance the VR experience by presenting fingertip tactile information to the face, an initial examination was conducted to determine the level of discomfort associated with the unusual situation of changing the tactile presentation area from the fingertips to the face. Subsequently, a subjective evaluation was carried out to assess the improvement in the quality of the experience.

To evaluate the discomfort caused by the tactile presentation from the fingertips to the face, the user's sensation of their own avatar, which reflects the user's movement during the VR experience, was examined. Since the consistency of bodily sensation with the avatar has a significant impact on the VR experience, we

investigated whether the user's bodily sensation to the avatar is reduced when the proposed system is used to present tactile sensations of different parts of the body. The avatar's bodily sensation was evaluated by assessing the occurrence of the virtual hand illusion (sense of body possession). Firstly, under conditions in which the avatar's movement was constrained, images of objects touching the avatar's fingertips were displayed while presenting the tactile sensation of suction to the avatar's fingers and cheeks. The occurrence of the virtual hand illusion was then confirmed in a similar manner under conditions in which the avatar's movement was unrestricted. At the same time, a subjective evaluation of the quality of the VR experience was conducted. As in the static condition, the difference in the tactile presentation area did not alter the sense of ownership, and the quality of the VR experience improved to the same degree. As a result, there was no substantial difference in the sense of ownership and the quality of the VR experience compared to the condition in which tactile information was presented directly to the fingertips.

In order to evaluate the quality of the VR experience, tactile information generated by the five fingers of the right hand was presented to the fingertips and cheeks, respectively, and a qualitative evaluation of the experience was conducted while the user actively interacted with the virtual object by moving their arm. The results indicate that the user was able to perceive the contact with the virtual object adequately through the use of tactile information on different parts of the body.

The objective of this paper is to devise a user-friendly tactile presentation method for VR experiences. The first objective was to present tactile information on the face through a mechanism integrated within an HMD and the second objective was to improve the VR experience by presenting fingertip tactile information on the face. The first objective was achieved through the integration of the suction component within the HMD and the actuator component outside the HMD using the skin suction tactile method. As for the second objective, it was determined that the quality of the user's VR experience is not compromised through an evaluation of the sense of body possession and the quality of the VR experience utilizing the HMD with an integrated suction-based tactile presentation device. Therefore, it can be stated that the research objectives of this paper have been sufficiently accomplished.

## 概要

2023年現在、HMDの普及に伴いバーチャルリアリティ（VR）という言葉も広く浸透しはじめ、VR技術は研究領域にとどまらず産業応用や医療、介護研修、コミュニケーションツール、メディアなど多種多様な分野にて活用されている。このようにHMDの活用が増える中、より高品質な没入体験を提示するためHMDにより提示される視覚、聴覚刺激だけにとどまらず、様々な感覚への刺激を組み合わせた体験の構築が検討されている。

これらの感覚として味覚、嗅覚、触覚、体性感覚など様々な感覚へ働きかける取り組みがなされているが、その多くが物理的な感覚提示のためのハードウェアが必要である点やその装置が大掛かりで導入及び運営のコストがかかることが課題となっている。

このような状況に対し、本研究ではHMDを利用したVR体験の利用状況において触覚の手がかりを簡便に提示するためにHMDに触覚提示機構を内蔵することを提案する。さらにVR体験において重要な、手を利用したインタラクションとその触覚的フィードバックをHMDに内蔵した触覚提示機構を用いて顔に提示する。通常であれば手を用いたインタラクションにて生じた触覚は手に提示するところであるが、感覚義手に用いられる触覚転移技術により異部位への触覚提示を行い、受動的な感覚だけでなく能動的な体験をカバーする感覚提示システムの開発を行う。

まとめると、本論文では簡便に利用可能なVR体験向け触覚提示手法の実現を目的とし、(1) HMDに内蔵する小型軽量な触覚提示装置の開発と(2) 指先触覚情報の顔面への提示によるVR体験の質の向上を行った。

第一にHMDに内蔵する小型軽量な触覚提示装置の開発に関してはHMDという限られた空間に触覚提示機構を内蔵することは難しく、これまでの触覚提示装置を内蔵したHMDの開発ではアクチュエータを搭載した大型かつ重量のある皮膚変形機構や小型軽量ではあるものの熱や匂い、風など皮膚の物理的な変形を伴わない触覚提示が多く、利用しやすい触覚提示手法は実現されていなかった。

これに対し本研究では皮膚吸引触覚提示手法を採用した。吸引触覚提示は触覚提示部分と吸引を行うアクチュエータ部分をチューブ等にて連結することで重量のあるアクチュエータ部を分離することができる。また皮膚と接する吸引部は小型、軽量に設計可能であるため触覚提示部位をHMDに内蔵することが可能である。さらに皮膚は吸引刺激を圧覚刺激と錯覚することが知られており、接触感の知覚に重要な圧覚を提示可能であることも吸引触覚の利点である。

空気吸引型のHMD内蔵型触覚提示装置を開発するにあたり、まず触覚刺激に適した吸引面積と吸引気圧の調査を行った。その結果、吸引箇所により最適な吸引径と吸引気圧は異なり、また個人差の影響も大きいことがわかった。この理由として吸引触覚知覚に重要な皮膚の変形は皮膚の柔らかさに依存し、顔の場所や個人差の影響を受けることが考えられた。しかしながら全体の傾向として吸引径12 mm程度、吸引気圧-400 hPa程度であれば触覚提示に十分であることがわかった。また、HMDの接触する目元周辺において知覚の鋭敏さは額側よりも頬側のほうが鋭く、これもまた皮膚の変形量と柔らかさにより説明できることが明らかとなった。

続いてHMDを用いたVR体験においてVR空間における手の触覚（VR空間のオブジェクトとの接触によって発生する触覚情報）を顔へ提示した場合に総合的な体験の質やオブジェクトとの接触感、オブジェクトのリアリティなどに変化が生じるかについて予備的に調査した。その結果従来のコントローラーを用いた触覚提示や振動子を用いた顔への触覚提示と比較し、吸引触覚提

示は有意に体験の質や物体との接触感が向上したため吸引触覚提示を本研究にて採用した。

さらに吸引触覚提示手法の特徴である圧覚錯覚現象が顔の皮膚においても発生するか調査する実験を行い、明確に吸引であると知覚できない程度の弱い吸引気圧であれば圧覚と区別がつかないことを確認した。これにより触覚提示において重要な接触感の提示が可能であることが確認できた。さらに吸引触覚提示により提示可能な触覚情報の種類を増やし、多様なバーチャルオブジェクトとの接触感を提示することを目的として硬柔感の提示を試みた。硬柔感は接触後の指の押し込みと生じる反力の変化具合により認識される感覚であり、VR 環境におけるユーザーの動作が触覚情報知覚にどのような影響を与えるかも同時に調査した。その結果、硬柔感そのものの提示はユーザーの運動と吸引触覚では困難だが、動的に気圧を変化させた際の変化率の違いを認識可能であることが明らかになった。

また吸引触覚提示装置の効率化を図るため、異なる吸引部形状での皮膚吸引時に皮膚内部に生じる応力をシミュレーションし、主観的触覚強度との相関を調査することで皮膚吸引知覚の特性を理解し、弱い負圧でも十分な触覚強度を提示可能な吸引部形状の条件を明らかにした。特に頬への吸引触覚提示時には 2 mm の吸引孔が中心間距離 2.5 mm で密集した場合に弱い吸引気圧でも十分な触覚強度を提示可能であることが示唆され、吸引気圧制御装置の設計においてさらなる小型、軽量化が期待されることを明らかにした。

第二に指先触覚情報の顔面への提示による VR 体験の質の向上においては、まず指先から顔への触覚提示部位の変更という通常ではありえない状況に対する違和感の有無の調査を行い、続いて体験の質の向上を主観的に評価した。

指先から顔への触覚提示による違和感の調査には VR 体験中におけるユーザーの運動を反映する自身の姿（アバター）に対する感覚を評価することで確認することとした。アバターとの身体感覚の一致性は VR 体験に大きな影響を及ぼすため、本提案システムを用いた異部位触覚提示時にアバターへの身体感覚が低減するかどうかを調査した。アバターの身体感覚評価にはバーチャルハンド錯覚（身体所有感）の生起を確認することで評価した。まずアバターの自由に動かさない条件にて、アバターの指先に物体が触れる映像を見せながら指や頬へ吸引触覚を提示したところ条件間によらず所有感が生じたため異部位への触覚提示によりアバターへの身体性が損なわれることはないと判断した。続いてアバターの能動的に動かせる条件にて同様にバーチャルハンド錯覚の生起を確認した。また同時に VR 体験の質を主観的に評価した。その結果静的条件と同様に触覚提示部位の違いにより所有感は変化せず、また VR 体験の質も同程度に向上した。結果、所有感、VR 体験の質ともに指先に直接触覚提示する条件と有意な差はなく、異部位触覚提示による触覚情報付与は不利益なく VR 体験の質を向上させることが可能であることがわかった。

さらに実際の VR 体験利用中の状況と近づけ評価をするため右手 5 指に生じる触覚情報をそれぞれ指先、頬に提示し、ユーザーが能動的に腕を動かしバーチャルオブジェクトとのインタラクションを実施する際の体験の質を定性的に評価した。体験の結果、異部位触覚提示によりバーチャルオブジェクトとの接触を十分知覚可能であることがわかった。

本論文の研究目的は簡便に利用可能な VR 体験向け触覚提示手法の開発であり、目的達成のため 2 つの目標を設定した。第一に HMD 内蔵機構による顔面への触覚提示、第二に指先触覚情報の顔面への提示による VR 体験の質の向上の 2 点であった。第一の目標に関しては皮膚吸引触覚手法を用いて吸引部を HMD に内蔵しアクチュエータ部を HMD 外部に構築することで達成した。第二の目標に関しては吸引触覚提示装置を内蔵した HMD を用いて VR 体験中の所有感と VR 体

験の質を確認することでユーザーの VR 体験の質的低下が生じないことを確認した。以上から本論文の研究目的は十分に達成されたと言える。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	VR環境における多感覚提示の重要性	1
1.2	既存のVR体験における触覚インタラクションの課題	1
1.3	研究目的	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	皮膚触覚	4
2.2	HMD一体型触覚提示技術	11
2.3	異部位触覚知覚に関する知見および関連研究	17
第3章	HMDに内蔵する吸引触覚提示手法の開発	21
3.1	関連研究	21
3.2	顔面への吸引刺激手法の予備的検討	25
3.3	顔面への提示触覚モダリティの比較実験	35
3.4	吸引刺激による圧覚提示実験	41
3.5	動的吸引刺激変調による硬柔感提示	44
3.6	吸引部形状の変化による触覚変調実験	47
3.7	有限要素法による皮膚構造シミュレーション	54
3.8	試作したアプリケーションおよびデモ展示	59
3.9	結論	65
第4章	異部位触覚提示によるVR体験の質的向上	67
4.1	異部位触覚提示によるバーチャルハンド錯覚の生起検証実験	67
4.2	能動条件下における異部位触覚提示がバーチャルハンド錯覚の生起に与える影響調査実験	75
4.3	多指吸引条件と異部位触覚提示時の比較	82
4.4	結論	84
第5章	結論	86
5.1	本論文の成果	86
5.2	今後の展望	88
	博士論文関連業績	91
	謝辞	93
	参考文献	95

## 図表目次

図 2.1	皮膚構造と機械受容器の配置. [58]より再構成. ....	5
図 2.2	マイスナー小体の構造. [58]より再構成. ....	6
図 2.3	メルケル細胞の構造. [58]より再構成. ....	7
図 2.4	パチニ小体の構造. [58]より再構成. ....	7
図 2.5	ルフィニ終末の構造. [58]より再構成. ....	8
図 2.6	機械受容器の分類. [58]より再構成. ....	9
図 2.7	機械受容器の周波数特性. [59]より再構成. ....	9
図 2.8	機械受容器の空間分解能と分布密度. [58]より引用. ....	10
図 2.9	カリパスを用いて測定された男性の 2 点弁別閾. [58]より引用. ....	10
図 2.10	Oliveira らによる振動子を内蔵した HMD [66]. ....	11
図 2.11	Kon らによるバルーン圧迫を搭載した HMD[69]. ....	12
図 2.12	Chang らによるベルト引張機構を内蔵した HMD[70]. ....	13
図 2.13	Wang らによる水平皮膚せん断が提示可能な HMD[75]. ....	14
図 2.14	Gugenheimer らによるフライホイールを取り付けた HMD[76]. ....	15
図 2.15	Peiris らによる温感の提示が可能な HMD[80]. ....	16
図 2.16	Ooshima らによるワイヤー巻取り式指先触覚提示装置を内蔵した HMD [95]. ....	16
図 2.17	Okano らによる足裏触覚提示[50]. ....	17
図 2.18	感覚義手の触覚情報提示[56]. ....	18
図 2.19	欠損した腕を VR 環境にて表示し, 頬へ触覚提示を行うことで幻肢痛が減少した [107]. ....	18
図 2.20	ペンフィールドのホムンクルス. [117], [118]より改変. ....	19
図 2.21	11 歳時点で右腕を肘の下から切断した成人の脳の MEG と MRI の 3D レンダリング結果を統合した図[108]. ....	20
図 3.1	吸引刺激と圧覚刺激の錯覚[124]. ....	22
図 3.2	有限要素法による皮膚内部へ発生するひずみエネルギーの三次元解析結果[124]. ....	22
図 3.3	図 3.2 における皮膚表面から深さ 0.7 mm 地点のひずみエネルギー[124]. ....	22
図 3.4	吸引孔をもつ接触物体[124]. ....	23
図 3.5	比較対象となるなめらかな曲面を持つ接触物体と突起を持つ接触物体[124]. ....	23
図 3.6	吸引気圧調整システムと装置全体図[132]. ....	24
図 3.7	実際の吸引触覚提示面[132]. ....	24
図 3.8	吸引刺激による力覚知覚調査実験装置[132]. ....	25
図 3.9	注射器を用いた吸引装置と吸引気圧計測装置. ....	26
図 3.10	吸引刺激装置システムブロック. ....	26
図 3.11	シリコンシートとアクリルにより作られた吸引部. ....	27
図 3.12	吸引箇所. ....	28
図 3.13	吸引気圧値表示画面のスクリーンショットより再構成. ....	28
図 3.14	吸引ポンプ (SC3701PML, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC). ....	30

図 3.15	吸引気圧制御システムの概要図.	31
図 3.16	気圧調整状態別制御システムの概要.	32
図 3.17	吸引気圧の変化と刺激強度の関係調査実験の様子.	33
図 3.18	吸引刺激の快適さ (目の下) (1:心地よくない, 7:心地よい).	34
図 3.19	吸引刺激の快適さ (眉の上) (1:心地よくない, 7:心地よい).	35
図 3.20	積層式 3D プリンタとシリコンシートにより作られた吸引部.	36
図 3.21	HMD の内側に振動子を取り付けた様子.	37
図 3.22	VR 空間における接触感知覚の実験の様子.	38
図 3.23	被験者が HMD にて見ている映像.	38
図 3.24	質問の回答結果.	40
図 3.25	マグニチュード推定法の回答結果.	43
図 3.26	リッカートスケール評価の結果.	43
図 3.27	UV レジン製の吸引部.	44
図 3.28	多点吸引部を装着した HMD.	45
図 3.29	吸引圧と指の押し込み量の関係.	46
図 3.30	実験結果.	47
図 3.31	吸引気圧調整機構の概略図.	48
図 3.32	吸引気圧制御モジュールの写真.	48
図 3.33	目標圧力 (-200, -300, -400 hPa) に到達するまでの応答時間と FET 印加電圧.	50
図 3.34	多点吸引部のパターン.	51
図 3.35	吸引孔の直径を変えた場合の吸引気圧の最大値と最小値.	52
図 3.36	触覚の質 (-3:吸引, +3:圧覚) と主観的触覚強度の関係.	54
図 3.37	皮膚構造モデルの模式図.	55
図 3.38	各吸引径における歪みエネルギーシミュレーション結果の断面図.	56
図 3.39	各吸引孔及び吸引気圧あたりの最大ひずみエネルギー.	57
図 3.40	皮膚吸引時の変形概念図.	57
図 3.41	各吸引孔及び吸引気圧あたりの最大ひずみエネルギーと円周長の積.	58
図 3.42	10 点吸引刺激制御基板.	60
図 3.43	吸引ポンプ.	60
図 3.44	インタラクション 2018 における Haptopus 体験の様子.	61
図 3.45	デモコンテンツの例.	61
図 3.46	UIST2018 における Haptopus 展示の様子.	62
図 3.47	改良した様々な物体に触れることができるコンテンツ.	63
図 3.48	バーチャル空間内で楽器の演奏が可能なコンテンツ.	63
図 3.49	バーチャル空間内でピアノの打鍵が楽しめるコンテンツ.	64
図 3.50	複数吸引点を持つ接触部を搭載した Haptopus.	65
図 4.1	吸引部形状.	69
図 4.2	VR 環境の実験場.	69
図 4.3	バーチャルハンド実験の様子.	70
図 4.4	所有感に関するアンケートのスコア (-100/+100).	73

図 4.5	アンケートスコアのうち所有感と比較条件のスコア (-100/+100).	73
図 4.6	指先吸引部.	76
図 4.7	HMD のクッション部へ吸引部を取り付ける様子.	77
図 4.8	実験時の様子.	77
図 4.9	バーチャル環境の様子.	78
図 4.10	能動条件下における所有感に関するアンケートのスコア (-100/+100).	80
図 4.11	能動条件下における体験の質に関するアンケートのスコア.	81
図 4.12	アンケートスコアのうち所有感と比較条件のスコア (-100/+100).	81
図 4.13	吸引部を取り付けたフェイスマスク.	83
図 4.14	VR 環境にて表示した接触オブジェクト.	83
図 4.15	指先吸引部を 5 箇所装着し, VR 体験を行っている様子.	84
図 5.1	バネにより固定された吸引部の試作.	89
表 3-1	吸引刺激の心地よさ (目の下) (1 が心地よくない, 5 が心地よい).	29
表 3-2	吸引刺激の心地よさ (眉の上) (1 が心地よくない, 5 が心地よい).	29
表 3-3	閾吸引気圧値 (hPa).	34
表 3-4	吸引知覚気圧値.	42
表 3-5	吸引径と圧力の違いによる吸引感覚と圧覚の感じ方.	53
表 3-6	吸引径と吸引圧の違いによる触覚強度の変化.	53
表 3-7	表皮, 真皮, 皮下組織のヤング率.	55
表 4-1	所有感および非所有感を確認する回答項目[142].	71
表 4-2	被験者ごとの頬と指先の吸引気圧.	72
表 4-3	能動的条件下における所有感と VR 体験の質を確認する質問項目.	79
表 4-4	被験者ごとの頬と額, 人差し指, 親指の吸引気圧.	80

# 第1章

## 序論

### 1.1 VR 環境における多感覚提示の重要性

近年 VR (Virtual Reality) という言葉が一般に普及しつつある。VR とは Virtual Reality の略称であり、日本語訳では「実質的現実」や「人工現実感」と訳される[1], [2]。この言葉の意味するところは「みかけは現実ではないが、実質的には、現実であること」というものであり、実在感、存在感と表現される[3]。そしてこの状態を作り出すために必要な手法や知見を総称して VR、または VR 技術と呼ぶ。普及の背景として Head Mounted Display (HMD) の低価格化があげられる。コンシューマ向け HMD が普及したことで VR 体験が普及しており、様々な状況で HMD は活用されている[4]。

このように HMD は VR の普及に大きな影響を及ぼしているが、VR の概念は古くは舞台演出や芸術表現の一つとして用いられており、VR の指す範囲は HMD を用いた体験に限らない。例えば Mareorama は 1900 年に Hugo d'Alesi により作られた動くパノラマ絵画とモーションプラットフォームを組み合わせた大掛かりなメディアである[5]。この作品はマルセイユから横浜までの航海の旅路を描いており、観客台は油圧シリンダなどのアクチュエータを用いてロール、ピッチ軸の運動を実現し、観客にまるで甲板の上にいるかのような感覚を提示した。さらに送風機による潮の香りや照明による太陽の動きを再現するなど多感覚を刺激した演出はまさに VR といえるものであった。しかしながらこのような大掛かりな装置は気軽に利用することができず、普及や様々な状況にて活用するという点においては HMD を用いた VR 体験は有用である。そこで HMD を用いた VR 体験を改善するためには Mareorama のように様々な感覚を提示できるようになることが求められる。

### 1.2 既存の VR 体験における触覚インタラクションの課題

#### 1.2.1 2022 年の HMD 利用状況

前述の通りコンシューマ向け HMD を用いた VR 体験の活用は幅広い分野においてなされており、産業応用[6]-[8]や医療現場への導入[9], [10]、教育への活用[11]-[17]など多岐にわたる。このほか AR (Augmented Reality : 拡張現実) や MR (Mixed Reality : 複合現実) といったデジタル世界と物理世界の組み合わせの度合いを変化させた概念も存在し、それぞれに専用のハードウェアが展開され、HMD の位置を推定しユーザーの移動に合わせた映像を投影することで映像を空間に固定することが可能となる点が共通している。中でも位置推定手法として HMD 自身にカメラを内蔵し映像から自己位置を推定する手法が存在し、外部のセンサが不要な点から屋外における活

用も注目されている[18]. さらにこのカメラを用いてユーザーの手の形状を認識し, VR 環境におけるオブジェクトとの接触をシミュレーションする直感的な操作手法が広く実装されつつある[19]. これにより従来必要であったコントローラーも不要となりさらに活用の幅が広がっている.

### 1.2.2 触覚知覚メカニズムと提示手法

HMD の普及にともない様々な VR 体験が普及していることは前述のとおりであるが, これらの VR 体験の多くは視覚, 聴覚刺激を用いたものであり触覚の活用はあまりなされていない. 触覚は物体の微細な凹凸の違いを感じ分けるほか, 温度や力を感じ取るなど物性の認識や空間把握に大きな役割を担っていることから CG 空間の形状認識等に大きく貢献することが知られている[20], [21].

特に手は多くの役割を果たし[22], 我々の生活の中で手と物体との接触により生じた滑らかさやごつごつとした手触りは映像により得られる記号的情報を超えた情緒的知覚をもたらす[23], [24]. このような情緒的感覚は VR 環境の実在感を高めるだけでなくその世界そのものへの好意を誘発すると考えられる. VR 技術の普及, 活用を推進する上で体験の心地よさは不可欠なものであり, 故に VR 環境における触覚体験の実現は作業効率化など実務的な課題解決手法としてだけでなく, Well-being の実現など人々が人生を謳歌する環境を実現するためにも解決すべき課題である.

触覚は大別すると, 純粋な力を提示する力覚と皮膚表面にて知覚する皮膚触覚に分類される. その他内臓の感覚や体性感覚を触覚として分類する方法も存在するが, 本稿における触覚は力覚および皮膚触覚を指すものとする.

力覚とは筋肉や腱に接続される筋紡錘やゴルジ腱器官が筋肉の状態を把握することで生じる感覚であり[25]–[27], 主に身体の運動状況や姿勢, 外力の知覚に用いられる. 力覚を提示するために最も一般的な手法は物理的に外力を身体に対して提示することである. そのためには動力となるモーターやその他アクチュエータが必要となる. 例外的に直接筋や腱を電気刺激により反応させる手法や錯覚を応用した疑似力覚提示手法なども存在するが, 微細な力の制御は困難である.

皮膚触覚は皮膚内部に存在する機械受容器により皮膚の変形や振動, 熱などを知覚することで生じる感覚であり[25], [28], [29], 主に体全体の接触状況の把握や巧緻動作のために用いられている. 皮膚触覚を提示する手法も力覚同様直接的に皮膚を変形させる, 表面温度を変化させるなど物理的に状態を変化させる手法が主流である. その他レーザーや超音波を用いた遠隔触覚手法, 化学物質を用いた手法なども存在するが感覚の強度が弱い点や応答性が悪いといった課題がこのころ.

### 1.2.3 既存の VR 環境への触覚提示技術とその課題

VR 環境への触覚提示技術に関連して, CG 映像と触覚提示を組み合わせた取り組みがなされており[30], [31], MX4D[32]や4DX[33]に代表される映画館やアトラクション施設にて利用される商業施設向け設置型全身触覚提示装置も開発されている. このほか装着型の全身触覚提示装置も種々開発されており[34]–[39], 近年ではコンシューマ向けの触覚提示装置も販売されている[40], [41]. また全身への触覚提示とは別に, 特に手掌部を対象とした触覚提示により VR 環境の知覚を行う取り組みがなされている. その方式は大別して大型な設置型[42]と比較的小型, 軽量の装着型

に分けられる。特に手に装着する指先触覚提示装置などが提案されており[43]–[47], Pacchierotti によるレビューがなされている[48].

このように力覚, 皮膚感覚ともに物理的な触覚提示用の専用デバイスが必要であることが多く, 製造コストがかかることや対象とする触覚の種類がデバイス依存であること, 準備に時間がかかることなどが普及を妨げている。特に指先装着型触覚デバイスは装着自体が煩雑である, 各指に装着した場合に装置同士が干渉して指の自由な動きを妨げるなどという問題もある。このような問題を解決するために VR 空間で指や手に生じる触覚を直接指や手に提示するのではなく, 体の他の部位に提示する提案が行われている[49]–[52]. これらの研究から異部位への触覚提示により十分な触覚情報の提示ができる可能性が示唆されている。以降本論文において異部位とは通常触覚を感じる身体部位とは異なる部位へ触覚が生じる状況を指す。こうした異部位への触覚提示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, 電気刺激を用いるなどの試みは数多く存在する[53][54][55][56].

## 13 研究目的

本研究は HMD を用いた VR 体験における触覚提示を, 装着性の面で簡便にすることをめざす。そのために前節で述べたような「異部位への触覚提示」に着目する。もし触覚提示を HMD 内にて行うことができるなら, HMD 自体は多くの VR アプリケーションで装着を前提としているため, 新たな追加デバイスの装着の必要がなくなると考えられる。

本論文の目的は, HMD へ内蔵可能な触覚提示手法の実現とその検証である。HMD への内蔵を可能とし, かつ圧覚を提示するために空気吸引による手法を採用する。検証においては VR 空間における手を用いたインタラクションに着目し, 触覚提示の有無による評価の変化を明らかにする。

## 14 本論文の構成

本論は全 5 章からなる。第 1 章 (本章) では現状の VR 体験の状況と触覚インタラクションの課題について述べ, 本論の目的について述べた。第 2 章は触覚の基礎的知見について述べ, さらに本論にとくに関連の深い HMD 一体型触覚提示技術と異部位触覚知覚に関する知見を述べる。第 3 章は提案する HMD に内蔵する吸引触覚提示機構の原理検証及び評価実験について説明する。第 4 章は VR 環境における指先触覚情報の顔面への転移が VR 体験に与える影響の調査とその結果, 考察について述べる。第 5 章は本論のまとめと今後の展望について述べる。

# 第2章

## 関連研究

### 2.1 皮膚触覚

本論文で用いる触覚とは皮膚内部に存在する機械受容器により感じられる皮膚感覚と筋、腱に存在する感覚器より感じられる力覚により構成される感覚を指すものとする。特に皮膚感覚とは物理的に皮膚が物体と接触した際に触覚受容器が皮膚の変形や刺激により反応し、神経信号として感覚を知覚することを指す。

皮膚触覚は接触物体の形状や質感の認識に寄与しており、我々はこれらを高い精度で認識することができる。これは私たちの皮膚には振動と圧力、2種類の感覚を認識することができる触覚受容器が備わっているためである。さらに直接触れていなくとも、例えば握ったペンを通して物体に間接的に触れた場合でもその物体の質感をある程度把握することができる。このことから私たちの触覚受容器の精度の高さがうかがえる。

触覚受容器には時間的、空間的分解能が存在し、特に指先に発生した微細な変化を知覚することができる。以降、本研究と特に関連の深い皮膚触覚について概説するものとし、皮膚構造と触覚受容器の特性を述べる[25], [57].

#### 2.1.1 皮膚構造

図 2.1 に人の無毛部の皮膚内部構造と機械受容器の分布を示す。皮膚は表面を覆う表皮、その下に存在する真皮、さらにその奥に存在する皮下組織の3層から構成される。表皮はさらに3から5層からなる。皮膚には機械受容器が存在するが、産毛や毛髪の生える有毛部に比べ掌や足底などの無毛部には高い密度で機械受容器が密集しており、刺激に対し非常に敏感である[58].

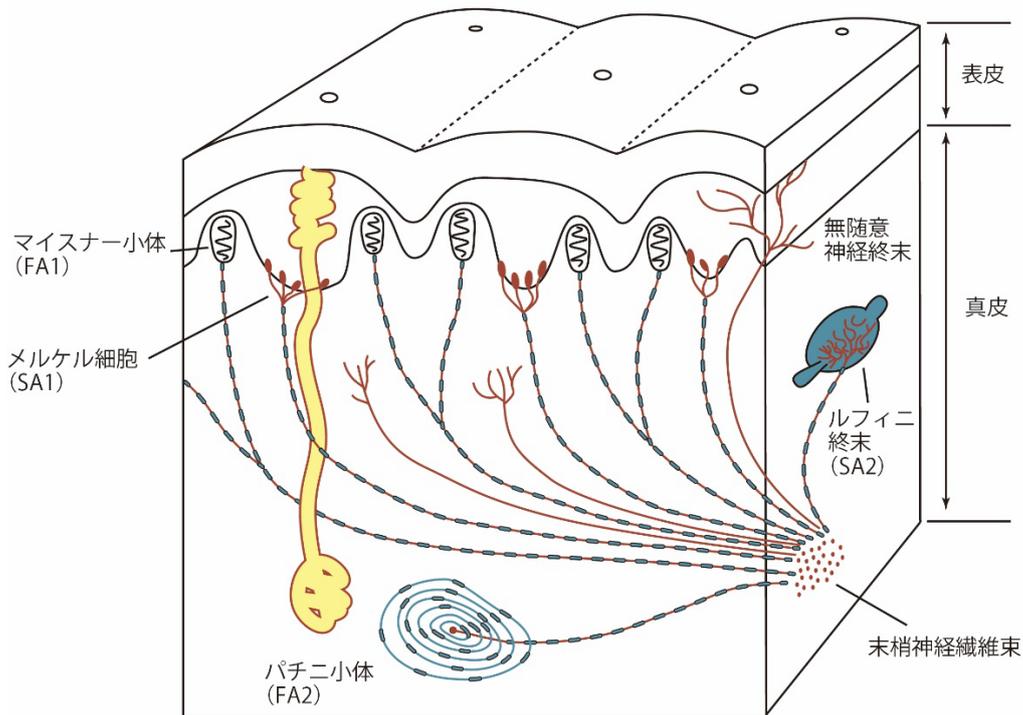


図 2.1 皮膚構造と機械受容器の配置. [58]より再構成.

### 2.1.2 触覚受容器

皮膚内部に存在する機械受容器は4種類存在し、速順応型 (FA: Fast Adapting) と遅順応型 (SA: Slowly Adapting) の2種類に分けられる。さらに皮膚表面からの深さによって番号が振られ、それぞれマイスナー小体 (FA1)、メルケル細胞 (SA1)、パチニ小体 (FA2)、ルフィニ終末 (SA2) と呼ばれる。このほかにも自由神経終末が表皮、真皮、皮下組織にひろく存在する。以降各受容器について説明する。

#### マイスナー小体 (FA1)

マイスナー小体は1852年に人の手掌と手指の真皮乳頭で発見された。図 2.2 にマイスナー小体の構造を示す。長さ  $80\sim 150\ \mu\text{m}$ 、直径  $40\sim 70\ \mu\text{m}$  の比較的大きい受容器で、指腹部で  $10\sim 24\ \text{個}/\text{mm}^2$  の高い密度で分布する。マイスナー小体の内心では、層状細胞の薄板が円柱状に積層し、その間に平らになった軸索末端が挟み込まれている。2~9本の神経に支配されており、接触した物体のエッジの鋭さ、点字のようなわずかな盛り上がりなどの検出に優れている[25], [58]-[60]。

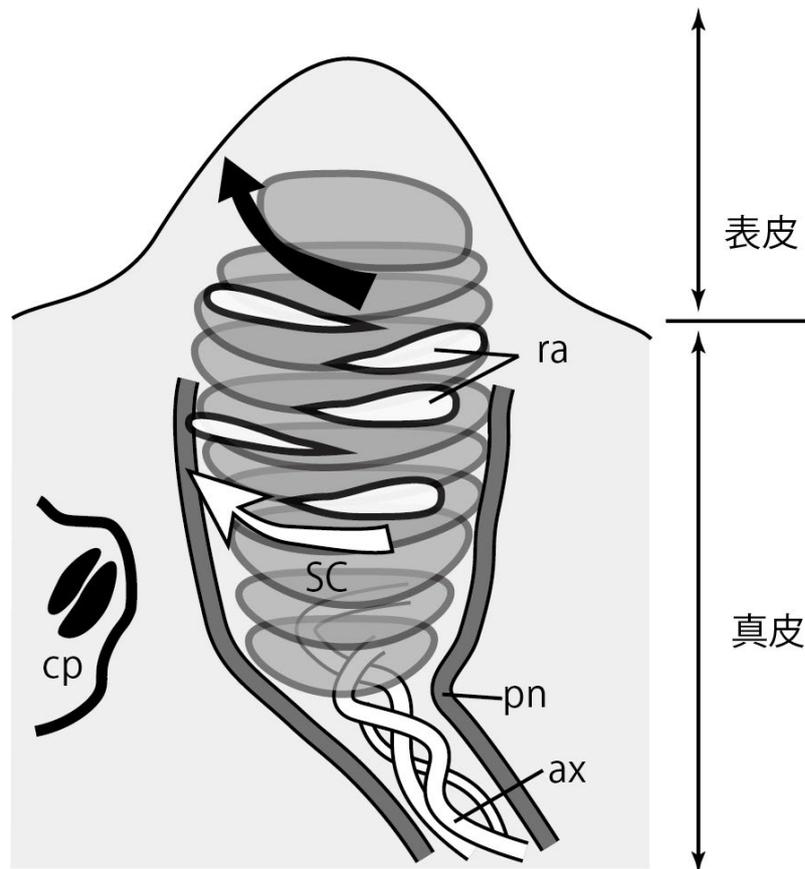


図 2.2 マイスナー小体の構造. [58]より再構成.

黒い矢印：コラーゲン繊維により神経軸索が表皮と結合する方向を示す。白い矢印；小体の下半分の動きの方向を示す。ax：軸索（有髄），ra：受容器内軸索（無髄），SC：シュワン細胞，pn：神経周囲細胞，cp：毛細血管。

### メルケル細胞（SA1）

1875年にカエルと哺乳類から発見されたメルケル盤はほかの受容器と異なり、狭い隙間を挟んで対置するメルケル細胞と円盤状に広がった神経終末から構成され、両者の間でシナプス結合に似た情報伝達が行われることからメルケル細胞は神経内分泌系の一種とみなすことができる。メルケル盤は直径約  $7\ \mu\text{m}$ 、厚さ約  $1\ \mu\text{m}$ 、メルケル細胞は無毛部皮膚では感染の通過する表皮最深部の表皮突出部に集合している。有毛部皮膚ではメルケル細胞が50～70個集合して隆起したピンカスの触盤として存在する。メルケル細胞は垂直方向の変形によく応答し、皮膚に接触した物体の材質や形を検出するのに適している。

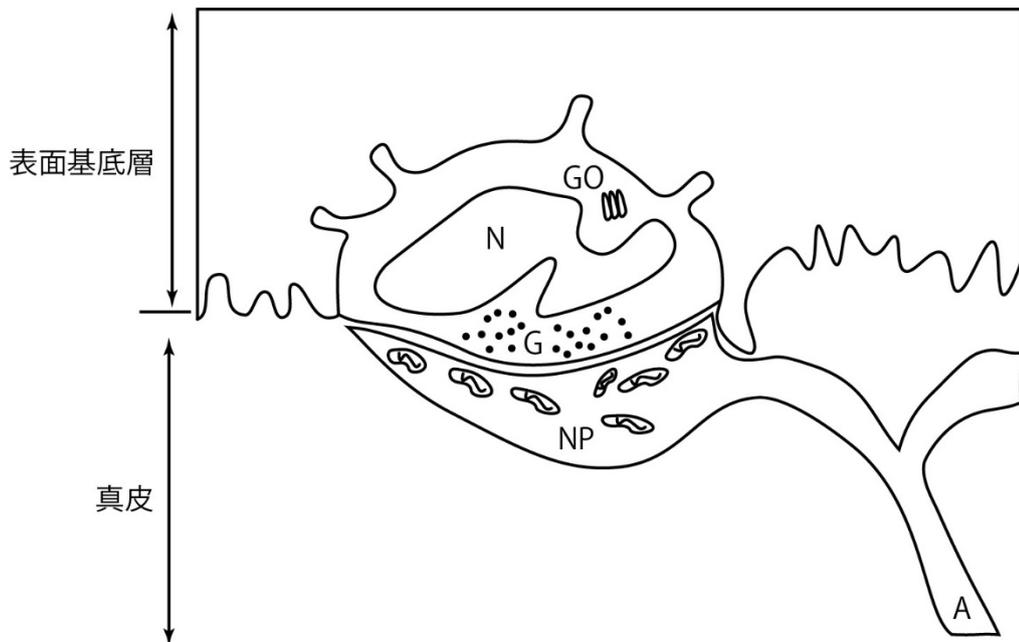


図 2.3 メルケル細胞の構造. [58]より再構成.

A：神経軸索の有髓部分，NP：神経の終末，盤状となり，メルケル細胞に接している．メルケル細胞は核（N），顆粒胞（G），ゴルジ装置（GO）などを含む．細胞の突起（P）が表皮基底層に突入している．

### パチニ小体（FA2）

パチニ小体は1741年に発見された．パチニ小体の大きさは加齢や局在部位によって大きく変動するが， $2500 \times 750 \mu\text{m}$ の卵型が人の平均的な形状で，十分に目視可能な大きさである．加齢によって最大で $4 \times 2\text{mm}$ に達することもある．パチニ小体の構造は20～70層のカプセルが棒状の1本の無髄神経終末を含む内芯を包んでいる（図 2.4）．このカプセルがこの受容器の生理学的特徴，すなわち刺激に対する順応の速さを決めている．パチニ小体は大きく，手のどこに加わった刺激にも応答するほど感度が良いためパチニ小体の神経発火は振動感覚を知覚する．

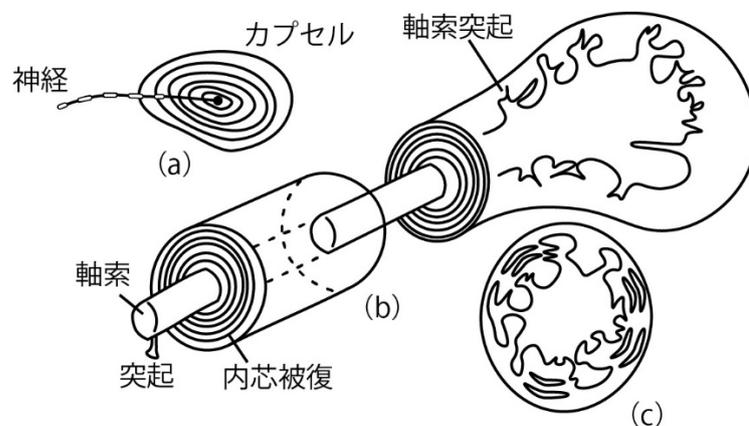


図 2.4 パチニ小体の構造. [58]より再構成.

(a) 全体図，(b) a 図において，四角で囲った部分を拡大したもの，(c) b 図の終末部の断面．

## ルフィニ終末 (SA2)

ルフィニ終末は有毛部，無毛部皮膚の真皮に存在し，紡錘形で長さ 0.5~2 mm である。5 層のカプセル内に液体が満たされ，内部はいくつかに区切られている。直径 6~12  $\mu\text{m}$  の 1 本の有髄線維の先が多数のより細かい分子となって終末を作り，内芯をなす。ルフィニ終末は人以外の哺乳類の皮膚無毛部では発見されておらず，人の手指腹部における分布密度も極めて低い。ルフィニ終末は受容野の境界があまり明快でなく，四肢の長軸に沿って細長く，局所的な圧迫，局所的あるいは遠方からの皮膚の引っ張りに応答する。

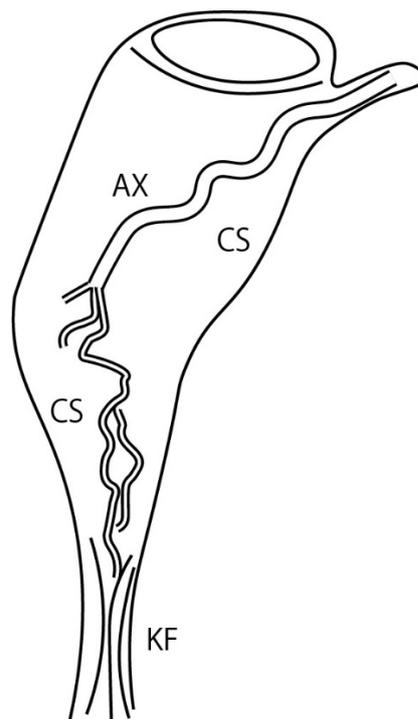


図 2.5 ルフィニ終末の構造。[58]より再構成。

全長約 0.5mm のルフィニ終末の約 2/3 を示す。AX：神経軸索，これより先で無髄となり分枝する。KF：コラゲン線維，CS：結合組織隙間。

### 2.1.3 機械受容器の分類

2.1.2 で述べた 4 種の機械受容器は遅順応型 (SA) と速順応型 (FA) の 2 種類に分けられると述べた。SA 型は刺激に対する応答が遅いため刺激に対して応答が持続する。FA 型は逆に刺激に対する応答が速いため刺激の起こり始めと終わりに強く応答する。また，前述のとおり機械受容器の深さ（刺激の届きにくさ）から I 型と II 型に分類する。これらより機械受容器の分類を行うと図 2.6 のようになる。

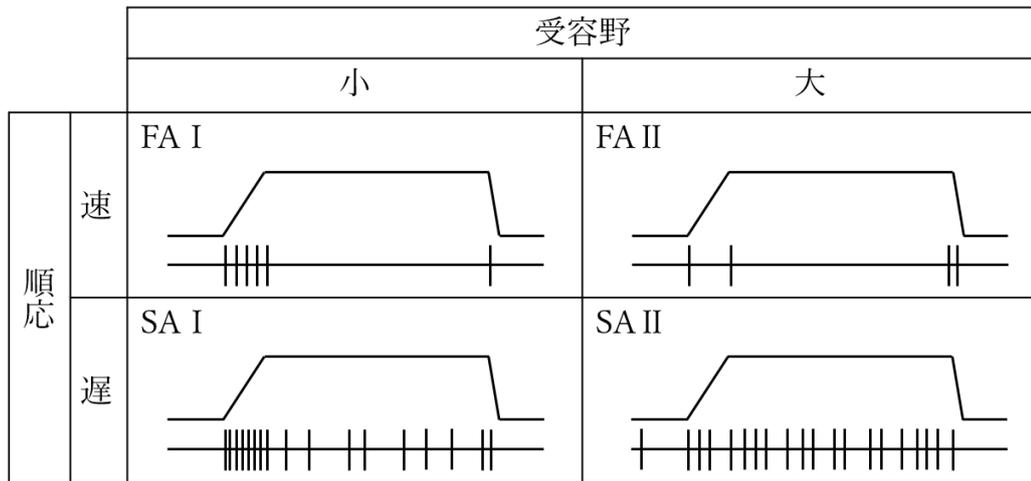


図 2.6 機械受容器の分類. [58]より再構成.

これらの受容器は振動の周波数によって反応する閾値が異なっている. 図 2.7 に各受容器における周波数特性を示す. 描かれた曲線より大きい振幅の振動を人間は知覚できることを示している.

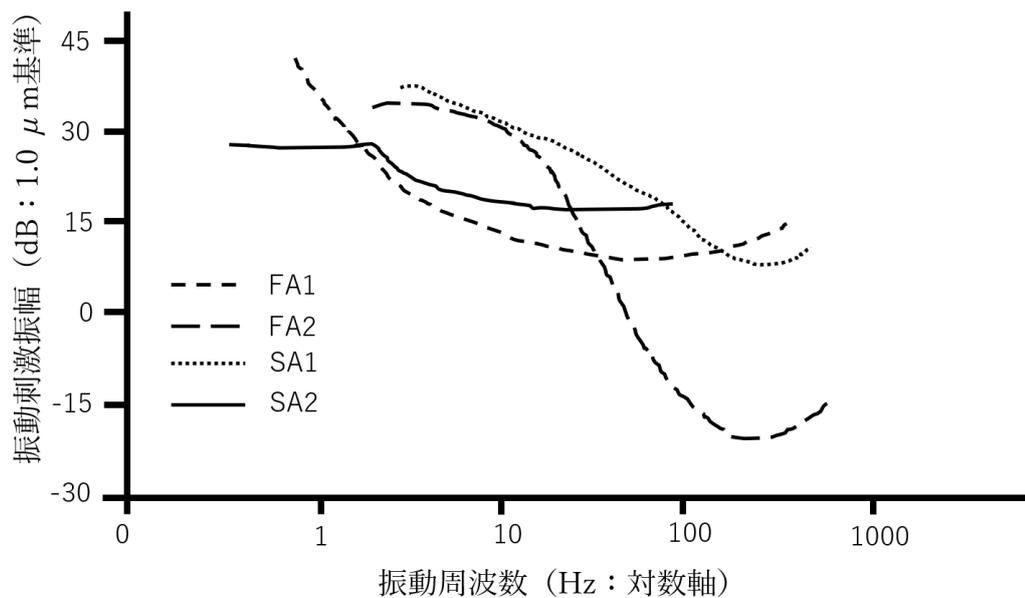


図 2.7 機械受容器の周波数特性. [59]より再構成.

これらの機械受容器の手掌における存在分布は図 2.8 のようになっており, 指先に非常に集中し, 空間分解能も指先が高くなっている. 図 2.9 に全身の2点弁別閾を示す. 2点弁別閾とは触覚の空間分解能を示すためによく用いられ, 皮膚上の異なる2点に同時に刺激が加えられたときにその刺激を別々の刺激であると認識できる最小の距離である. すなわち, 2点弁別閾よりも短い距離で加えられた刺激は同一の刺激と感じられる. 人間の皮膚上においては指先が2~3mmと最も2点弁別閾が狭く, 非常に敏感な部位といえる.

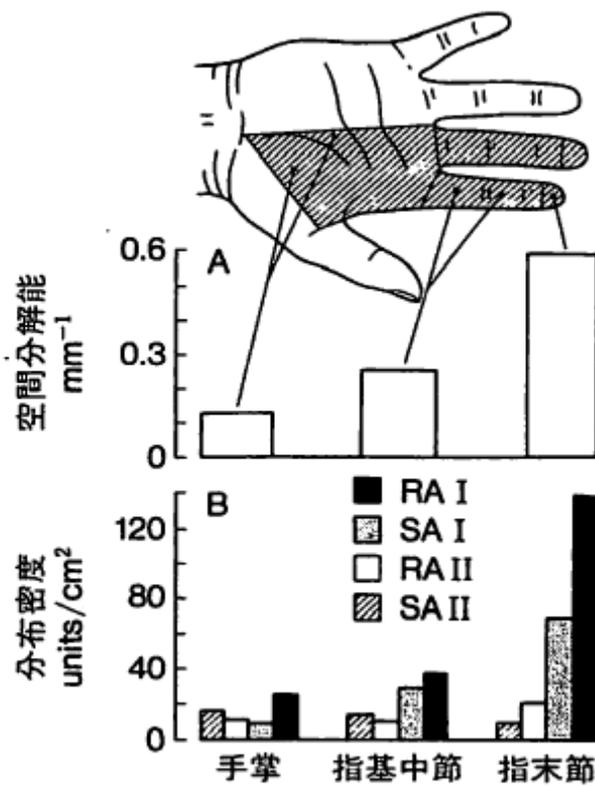


図 2.8 機械受容器の空間分解能と分布密度. [58]より引用.

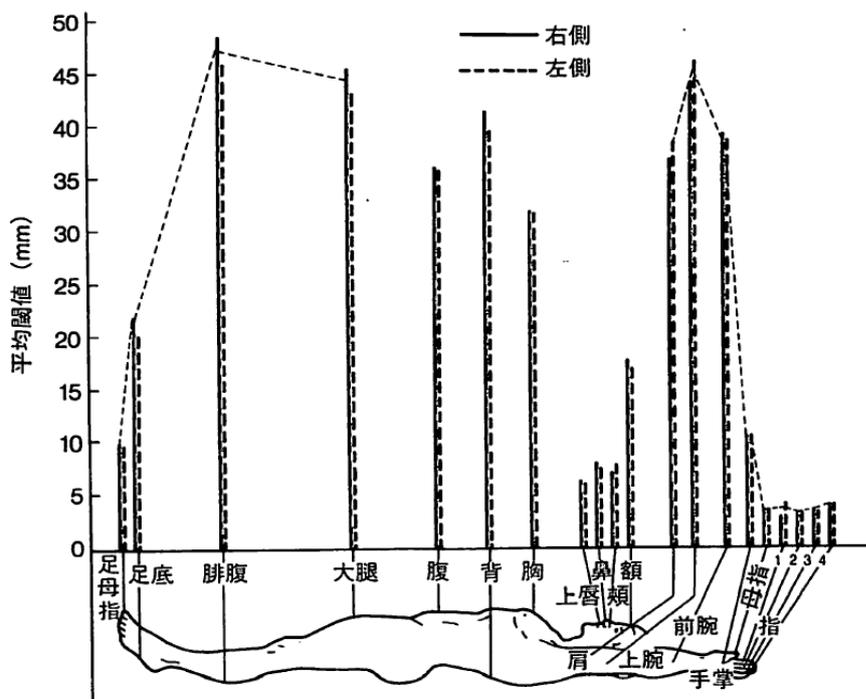


図 2.9 カリパスを用いて測定された男性の2点弁別閾. [58]より引用.

## 2.2 HMD 一体型触覚提示技術

HMD を用いた VR 体験に触覚情報を付与するため HMD に触覚提示装置を内蔵する取り組みは多数なされており [61]–[64], すでにコンシューマ向け HMD への内蔵もなされている [65]. 本節では HMD に触覚提示装置を内蔵する技術について述べる.

HMD に触覚提示装置を内蔵するにあたり大きな技術的課題として小型化が上げられる. 特に皮膚に対し物理的に変形や状態の変化を伴う手法の場合, HMD 装着時に接する目元周辺へ感覚を提示することが必要となり, 限られたスペースへ装置を内蔵しなければならない.

最も簡易的に実装する方法として振動子を内蔵する取り組みがなされている. Oliveia らは HMD のクッション部に振動子を内蔵し, VR 空間内における方向知覚に対する有効性を検証した. 振動子を使った触覚提示は安価かつ高品質な体験を作ることができるが, 振動触覚は何かに触れた際の重要な触覚情報である圧覚を振動に変換する必要がある, あくまで記号的な情報提示にとどまっている [66].

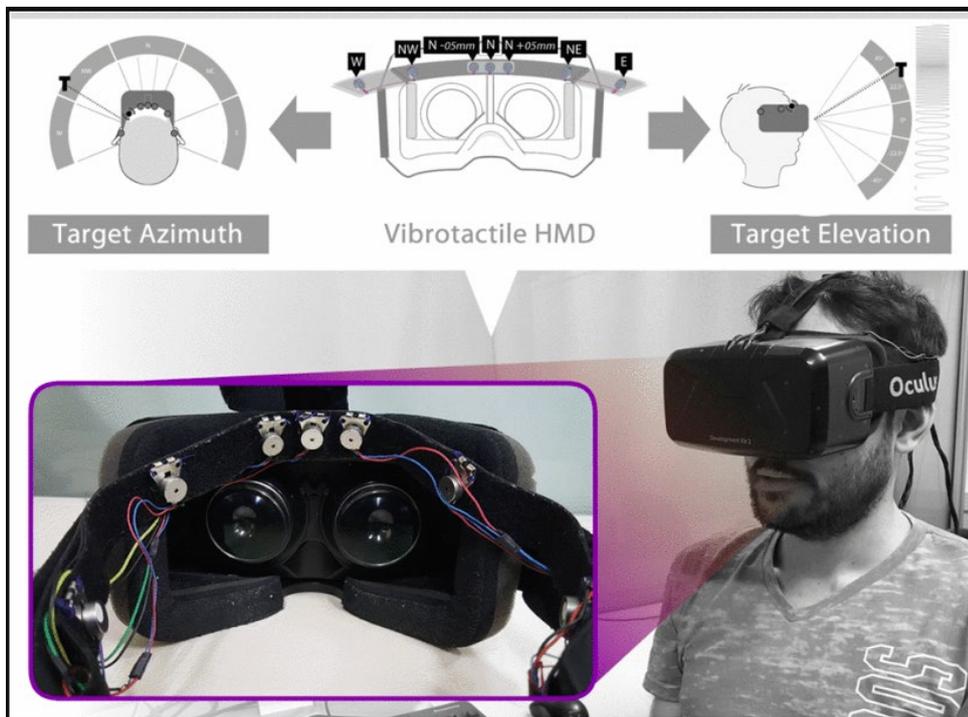


図 2.10 Oliveia らによる振動子を内蔵した HMD [66].

Valkov らは同様に振動子を HMD のクッション部に内蔵し顔面へ振動提示を行ったが, VR 環境の情報ではなく距離センサにより計測した外部の物体との距離情報を振動に変換して提示することで安全に VR 体験を行うことができるシステムを提案している [67]. また Chu らは側頭部に触れるように複数の振動子を取り付けた HMD を開発し, VR 環境における方向指示やユーザーの移動感の提示を行った [68]. 本手法では横並びになった振動子を連続的に振動させることで仮現運動を生じさせ, 移動感の提示を行っている点が特徴的である.

このように振動感覚は小型化が容易な反面, 記号的な触覚提示にとどまっており, ユーザーの解釈が必要である. したがって, 自然な接触感知覚に重要な圧覚や摩擦といった皮膚変形の手触感を提示することは困難である. そこで物理的に皮膚を変形させる圧覚提示機構を内蔵した HMD

の開発がなされている。Kon らはバルーンによる圧迫提示機構を備えた HMD を開発し、受動的な触覚情報を提示するコンテンツの製作とその評価を行った。バルーン圧迫を用いることで顔面部への圧迫の提示に成功しているが、提示する際には HMD 自体を押し上げ、動いてしまうという問題が生じる[69]。また Chang らはサーボモータを用いて HMD のベルト部分を締め付けることで顔面に純粋な圧迫力を提示することに成功した。さらに VR コンテンツと組み合わせその評価を行った。この手法では純粋な圧迫力の提示に成功しているが、ベルトを巻き取るという構成上、提示する力の方向はベルトの本数と向きに依存し、細かな力制御は難しい[70]。これらに対し Tseng らは HMD 内部に空気噴出ノズルを取り付け目元周辺へ空気圧による接触感提示を行っている[71]。空気噴出を用いることで空間分解能の高い圧迫提示を実現しているが、目への不快感を生じさせない範囲の空気圧の使用にとどまっており、より強い触覚強度を提示することが困難である。さらに Shen らは HMD 底部に超音波提示アレイを取り付け、超音波を収束させることで顔面へ触覚提示を行った[72]。これにより頬から口元、口内に微弱な接触感を提示している。超音波を用いることで小型軽量かつ非接触な触覚提示を実現しているが、提示可能な接触感の面積が狭いことや純粋な力の提示が困難であるという課題がある。

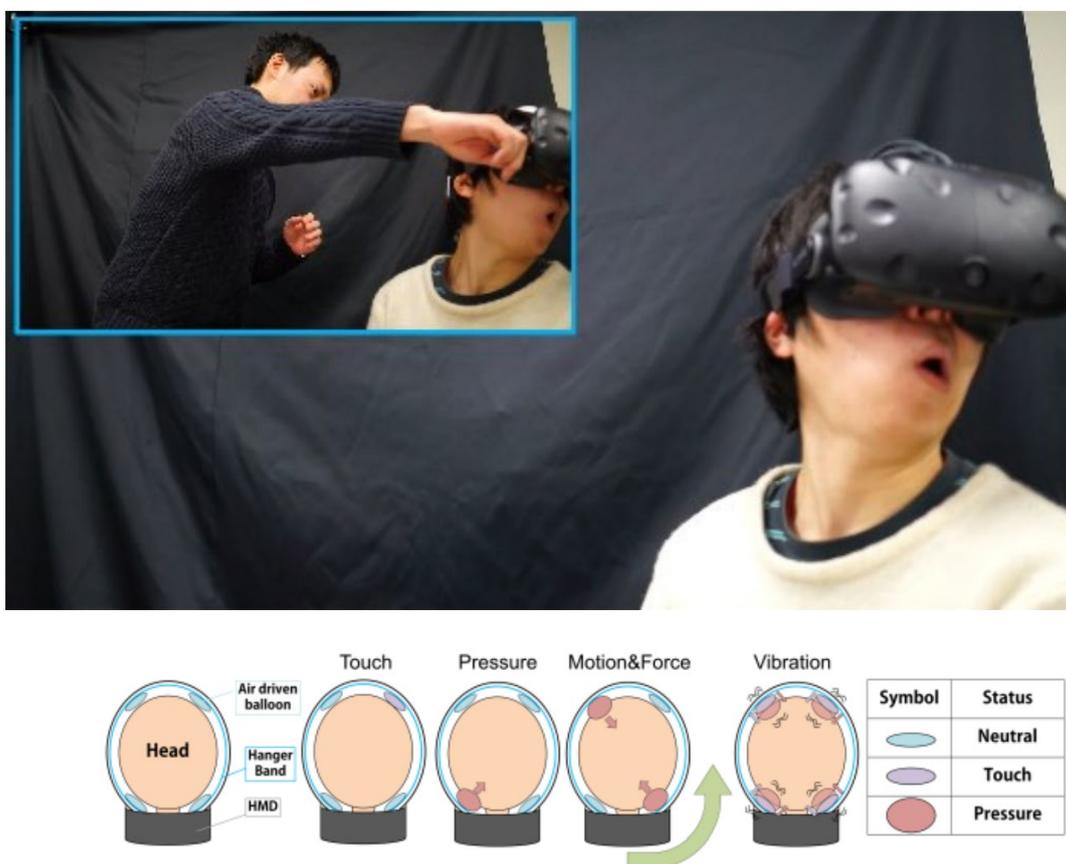


図 2.11 Kon らによるバルーン圧迫を搭載した HMD[69].

圧迫のパターンを調整することでハンガー反射 [2]を生起させ空気圧の制御により接触感，圧迫，運動，振動を提示できる。

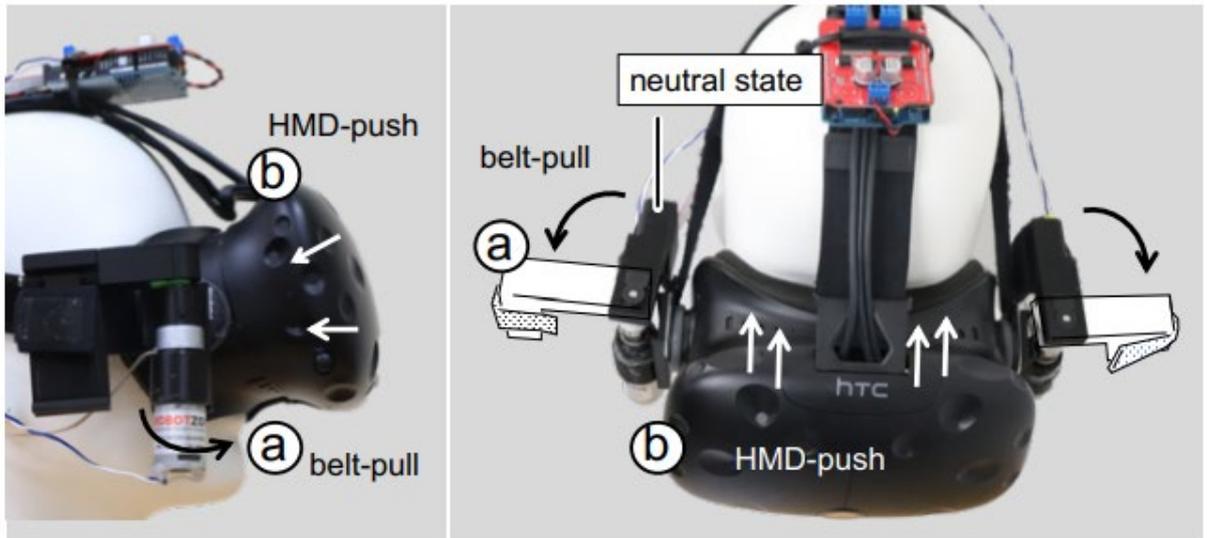


図 2.12 Chang らによるベルト引張機構を内蔵した HMD[70].

HMD 横に取り付けた DC モーターがベルトを引くことで顔面に HMD が強く押し付けられる。VR 空間にて顔に何かが接触する感覚を再現する。

また圧覚を生じさせる手法として HMD 外部に装置を取り付ける手法も存在している。Wilberz らは HMD にロボットアームを取り付けその先端を付け替えることで柔軟物体との接触感やなぞり感覚の提示を行っている[73]。同様に Nakamura らは 2 本のロボットアームを取り付けた触覚提示を行っており、同時に複数箇所の触覚刺激を行っている[74]。

触覚提示として重要な皮膚変形を生じさせる手法として皮膚せん断を用いる研究も存在する。Wang らは皮膚表面に接触したゲルパッドを 2 自由度のせん断方向へ移動する装置を用いて VR 空間における力提示を行った。純粋なせん断力の提示は物体との接触感を強く生起することができるが、モーターを用いた水平移動機構は重量の増加や大型化に繋がり、また接触による圧迫感の提示ができないという問題があった[75]。

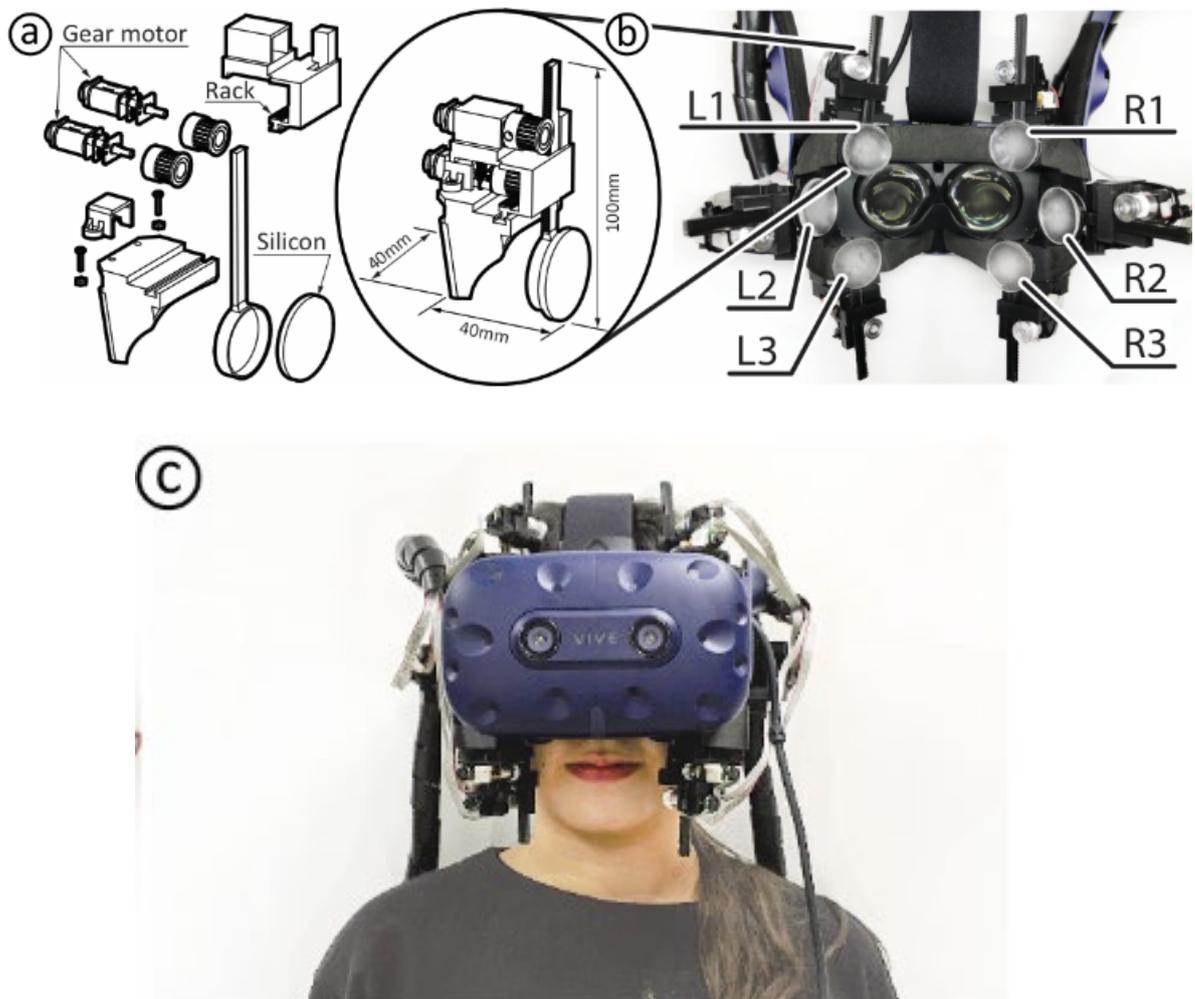


図 2.13 Wang らによる水平皮膚せん断が提示可能な HMD[75].

HMD のクッション部に取り付けられた皮膚との接触ゲルパッドを 2つの DC モーターを使い垂直方向と水平方向の 2 方向に変位を提示できる。接触部は 6 箇所内蔵されている。

また頭部全体への力覚を提示する手法として Gugenheimer らは HMD にフライホイールを用いたジャイロ効果による力覚提示機構を内蔵し、VR コンテンツを用いたユーザー評価を行った。ジャイロ効果を用いることで非設置の力覚提示に成功したが、提示可能な力覚はフライホイールの回転軸に依存しており細かな力覚提示は困難である[76]。より強い力覚提示手法として Tsai らは HMD 前面にモーターで引っ張ったゴムの弾性を用いて衝撃感を提示している[77]。また Liu らは圧縮空気をを用いた反力提示を行っている[78]。HMD 上部に 4 方向の空気圧ノズルを取り付け、圧縮空気の比率を調整することで任意方向への力覚提示を実現している。

このほか全身への感覚提示手法として前庭へ電気刺激を行うことで加速度感を提示する手法も考案されている[63], [79].



図 2.14 Gugenheimer らによるフライホイールを取り付けた HMD[76].  
 回転させたフライホイールはジャイロ効果を生みユーザーへ力覚を提示する.

VR 環境の感覚提示として皮膚触覚，力覚のほかに熱の感覚提示も重要であり，HMD への熱提示装置の組み込みも活発になされている．多くはペルチェ素子を用いた物理的な熱の提示を行うものであり，例えば Peiris らはペルチェ素子による温度感覚提示機構を内蔵した HMD を製作し，方向知覚及び温度感覚の提示を用いたコンテンツの製作を行った[80]．温度感覚は皮膚感覚提示において重要であり，触覚提示を高品質なものにできる．一方で局所的な提示が難しく，手掌部の触覚情報を HMD 接触部という限られたスペースで提示するには向いていない[80]–[82]．このほか水流を用いた熱提示装置の提案もなされているが，同様に細かな提示部位の制御は難しい[83]．またペルチェ素子を用いた熱提示に加え振動提示を行うことで細かな熱源の移動感覚や接触感を提示する取り組みがなされている[84], [85]．本手法のように熱と異なる触覚刺激を同時に提示することで本来熱提示がなされていない触覚部位にも熱感覚がなされたように錯覚する現象を Thermal Referral と言い[86], [87]，最小限のアクチュエータで広範囲へ熱提示を行う手法として着目されている．このように物理的に熱を提示するほか化学物質を用いた手法[88]や電気刺激により冷覚を提示する手法[89]も提案されている．

このほか嗅覚[90]–[92]や風[93]の提示を行うなど多種多様な感覚提示手法が提案されている．

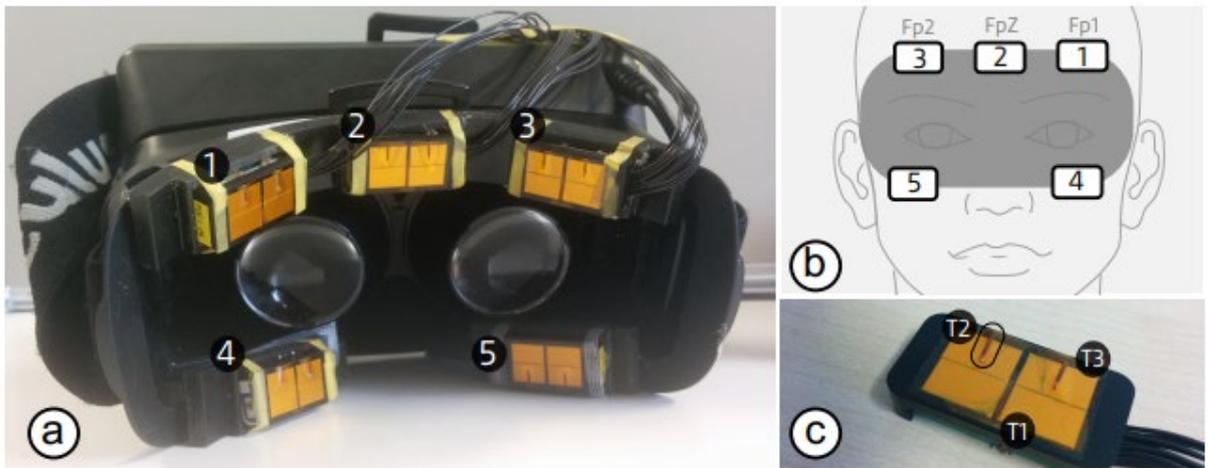


図 2.15 Peiris らによる温感の提示が可能な HMD[80].

HMD の内側にペルチェ素子を取り付けられており，温感と冷感を組み合わせることで素早い温度知覚を利用できる。

さらに HMD に触覚提示装置を内蔵しつつ，指先への触覚提示を行う取り組みも存在する．Wang らは HMD にワイヤー巻取式の触覚提示装置を取り付け，指サックへとワイヤーを接続することで VR 環境における接触により生じる反力を指先に提示している[94]．また同様に HMD にワイヤーを取り付けたものとして Ooshima らは 2 本のワイヤーを用いた機構を提案しており，ワイヤーの巻取力を調整することで異なる方向への力各提示を実現している．さらにかれらは指サックにペルチェ素子を内蔵することで熱提示も行っている[95]．また HMD に取り付けた機構により指先へ触覚提示を行う手法として HMD の前面へ物理的に駆動するボタンを取り付け，VR 環境における入力インターフェースとする取り組みや[96]，HMD 側面にキーボードを取り付けることでキー入力を触覚フィードバックつきで行うことができるもの[97]が提案されている．



図 2.16 Ooshima らによるワイヤー巻取り式指先触覚提示装置を内蔵した HMD [95].

## 2.3 異部位触覚知覚に関する知見および関連研究

異部位への触覚提示は義肢開発において盛んであり、欠損部位の感覚を補填するために残存部位へ触覚情報を提示する試みが数多く行われてきた。感覚提示手法として様々なモダリティが用いられており、振動[56], [98], 筋電気刺激[99], [100], 皮膚せん断[101], [102], 熱[54], 圧迫[53], [103], など様々な手法が用いられている。複数の感覚を統合して提示する取り組みも多くなされており[55], 異部位触覚提示は感覚モダリティによらずユーザーの感覚を補填可能である。また上腕義肢の感覚フィードバック技術に関しては Sensinger らによるレビューがなされており[104], 各種感覚フィードバック技術の開発は活発に行われ、近年では機械学習を組み合わせた取り組みがなされるなど異なる分野との連携が進んでいる。

その他、感覚補填技術は残存部位の感覚補助としても用いられており、Maeda らは指先の振動情報を手首に提示することで触覚知覚能力の向上がなされたことを明らかにしている[105], [106]. Saichi らは足裏の感覚が麻痺している人に対して足裏触覚情報を背部に振動を用いて伝えることで歩行補助が可能であるとしている[107].

同様に VR 体験において指先触覚情報を異部位へ提示した研究では Okano らによる空気圧ピンディスプレイを用いて足裏へ分布触覚提示を行ったものや[50], Moriyama らによる前腕部へ 5 節リンク機構を用いた皮膚せん断, 圧迫, 熱提示を行ったもの[49], 背部へ振動子を用いて提示したもの[51]などが存在する。



図 2.17 Okano らによる足裏触覚提示[50].

空気圧によりピンを押し出すことで触覚提示を行う。VR 空間にて手で受けた触覚情報を足裏へ提示する。

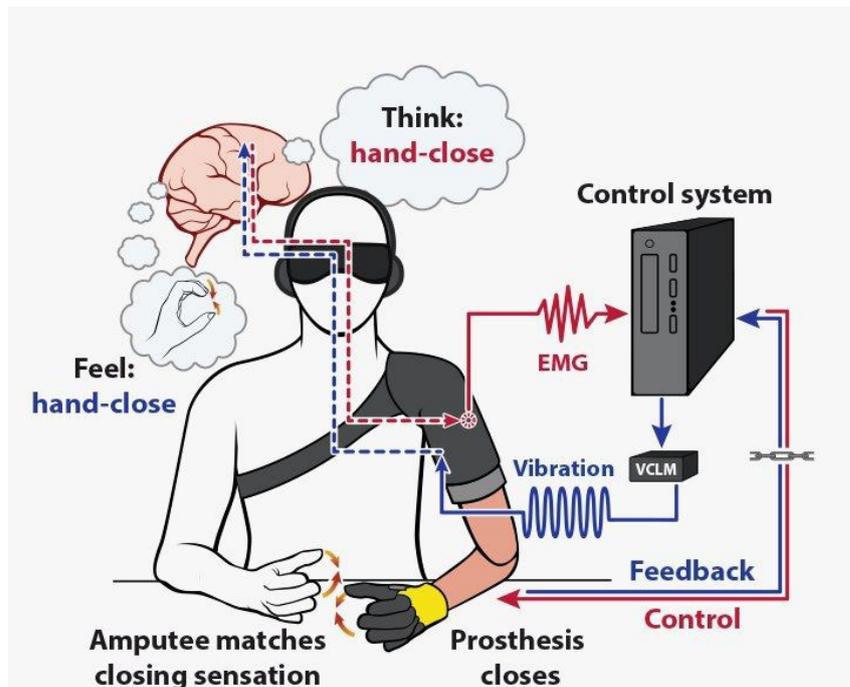


図 2.18 感覚義手の触覚情報提示[56].

感覚義手の触覚情報を振動として上腕へ提示し，筋電センサを用いて義手を操作する。

特に，Ichinose ら[108]は喪失した部位の感覚が他の部位に転移し得ることがあることを基に，切断した（または感覚が麻痺した）腕側の感覚を頬へ振動子によってフィードバックを行った。これにより HMD を用いた主観視点にて，バーチャルな腕が感じる触覚情報を頬への振動として提示することで幻肢痛が減少したと報告している。

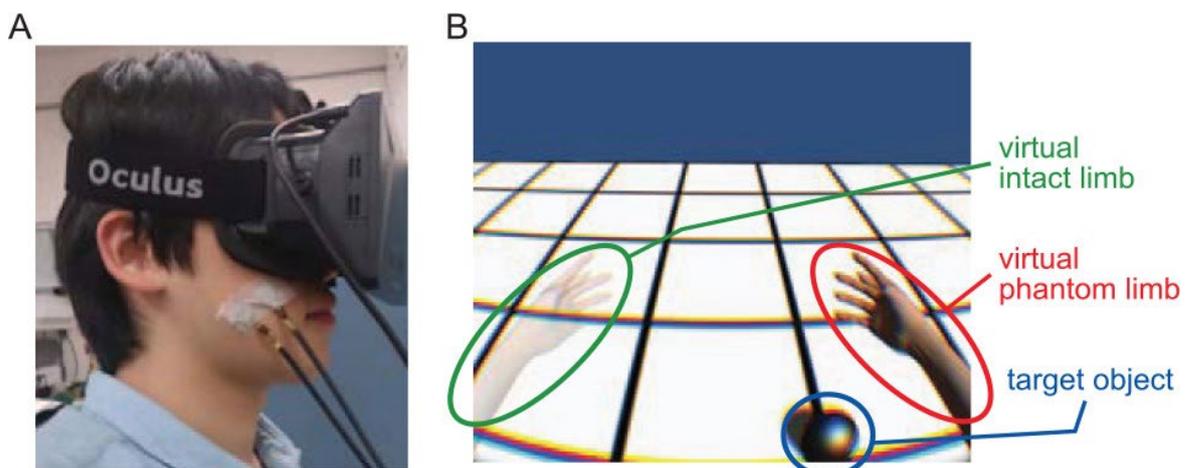


図 2.19 欠損した腕を VR 環境にて表示し，頬へ触覚提示を行うことで幻肢痛が減少した [108].

ここで腕を切断した者に対し肩や頬を触れるとまるで手を触られたように感じるという報告がなされている。このような触覚刺激を異部位への刺激として知覚する現象は Referred sensation として知られており [109]–[113]，このメカニズムには脳領域の機能再編が影響していると考えられている [109], [114], [115]。脳領域の機能再編とは例えば腕を切断した者の脳では元来腕の情報を処理していた領域は使われなくなり，周辺の脳領域が担当していた機能に置き換えられる。このように脳は生来決められた機能だけでなく，状況に応じて自身の機能を変質させることができる。

ここで我々の身体部位の感覚と脳内へ投射される部位は一対一で対応づいており、全身の触覚情報は脳内の体性感覚野及び運動野において処理されている[116]. 特に脳内の顔を担当する領域と手掌部を担当する領域は物理的に隣接しており、腕を欠損した人間の脳内では手掌部の領域が顔の領域により侵食されることで、顔を触れられると手を触られたように感じるという現象が生じると考えられる[109], [110]. またこのときの脳活動を計測すると元来腕の領域であった部位に顔の領域が広がり、顔と手の感覚を同時に感じていることが示唆された (図 2.21).

さらに Referred sensation は映像と触覚刺激を組み合わせることで人為的に発生させることも報告されている[117]. 映像と触覚刺激の組み合わせによる Referred sensation は刺激提示時に生じる一時的なものである可能性が高いが、長期的に刺激を提示した場合より自然に顔への触覚刺激を指先への刺激だと認識することができる可能性がある.

本論文では異部位への触覚知覚の原理構築の第一歩として、一時的な刺激における HMD を用いた映像提示と触覚刺激の組み合わせにより本来指先に生じるはずの触覚情報を顔面へ自然に提示することを目指す.

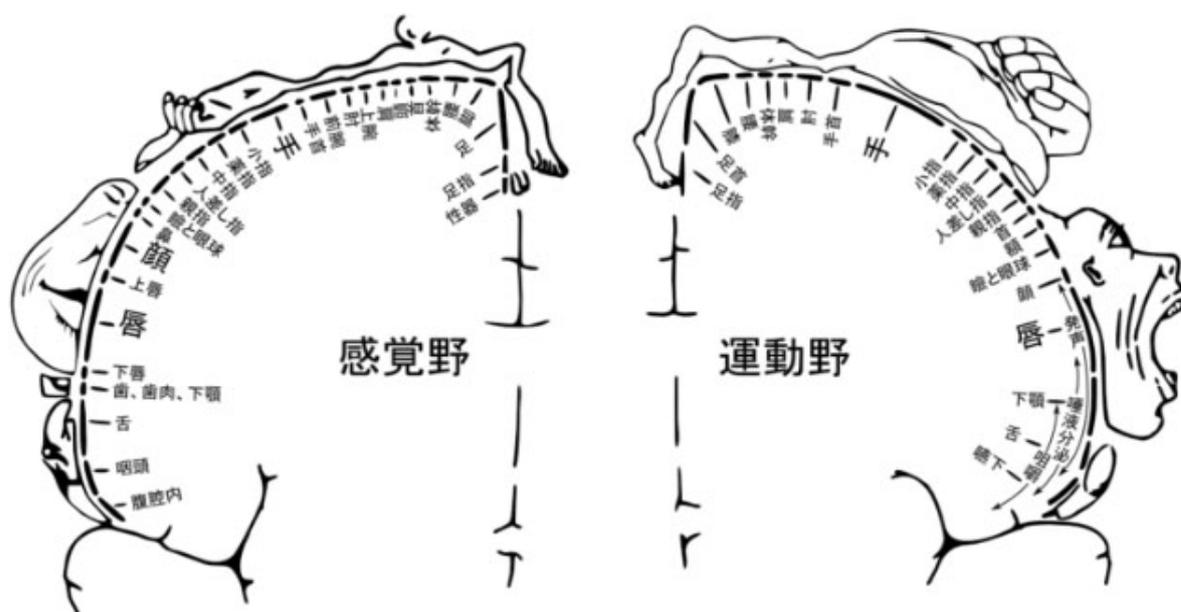


図 2.20 ペンフィールドのホムンクルス. [118], [119]より改変.

一次体性感覚野と一次運動野は対象的にほぼ同じ身体部位が割り当てられている.

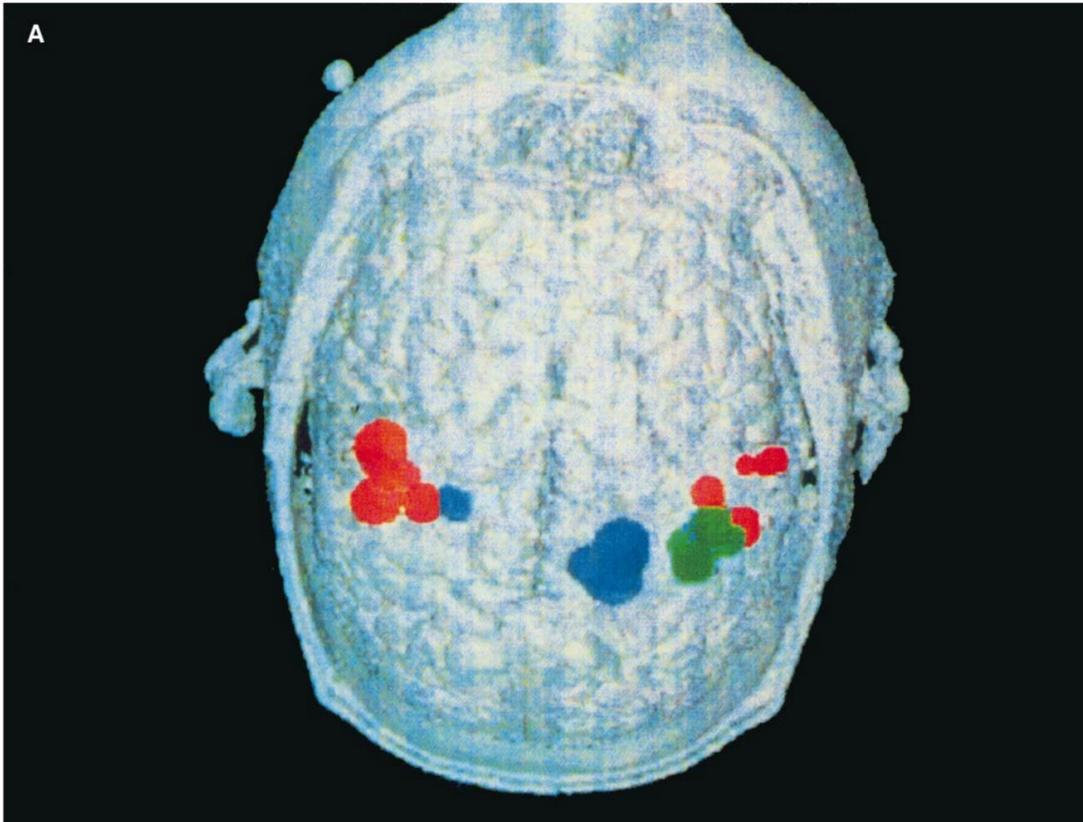


図 2.21 11歳時点で右腕を肘の下から切断した成人の脳のMEGとMRIの3Dレンダリング結果を統合した図[109].  
一次体性感覚野のうち赤は顔を示し、緑は手を示し、青は上腕を示している。右半球は正常であるが左半球では赤と青の領域が隣接している。

## 第3章

# HMD に内蔵する吸引触覚提示手法の開発

## 3.1 関連研究

### 3.1.1 吸引触覚提示技術

第2章において HMD に触覚提示装置を内蔵する研究を紹介したが、物に触れた際に最も重要と考えられる圧覚がほとんど提示されておらず、提示可能な場合も HMD の固定を阻害してしまう、局所的な提示が困難である、という課題が挙げられる。特に圧覚を提示する手法としてバルーンを HMD と顔面の上に挿入する手法[69]が提案されているが、バルーンの影響により顔面が圧迫される一方で HMD にも反力が生じわずかにディスプレイが揺れるという課題がある。またバルーンの影響に対し筐体に力が加わり頭部の別の部位にて意図しない力が生じてしまうことも考えられる。VR 体験においてディスプレイの揺れは体験を阻害する要因として考えられるため本研究ではこの手法は用いなかった。

また指の触覚を HMD 装着時の顔の付近へ提示するという取り組みも存在していなかった。この指先の感覚を提示するにあたり重要なことは圧覚に代表される物体との接触感の提示と指先の微細な触覚情報を提示するための高密度な触覚提示点の確保という2点である[120]–[123]。HMD に触覚提示装置を内蔵することを前提にこれらの条件を満たす手法として吸引触覚提示手法が考えられる。

吸引触覚提示の特徴として、触覚提示部位と吸引装置をチューブ等により接続することで分離して設置することが可能であるため、触覚提示部を小型かつ軽量に設計することができればウェアラブルデバイス設計において装着性を確保することが容易である。また吸引部を小型に設計することで高密度な感覚提示部位の配置が可能である。さらに皮膚触覚知覚の特性として人間は皮膚に提示されたひずみの大きさを認識することは可能であるが、ひずみの方向は知覚することが難しいため、適切な強度で皮膚を吸引することで圧覚を錯覚させることができる(図 3.1) [124]。特に圧覚錯覚に関して Makino らは圧覚刺激時と吸引刺激時に皮膚内部へかかる力のひずみを、有限要素法 (FEM) を用いたシミュレーションにより調査している[125]。FEM シミュレーションは皮膚で生じる機械的変化と触覚知覚の関係において機械受容器がどのように対応するかを調査するために用いられる[126]。特に皮膚の変形に応答するメルケル細胞に加えられるひずみエネルギーと主観的触覚強度が相関することが知られており[127], [128]、Makino らの行ったシミュレーションにおいてもメルケル細胞が存在する領域を調査している。Makino らの行ったひずみエネルギーのシミュレーション結果を図 3.2 及び図 3.3 に示す。図 3.2 より皮膚表面付近におけるひずみエネルギー分布は圧迫時と吸引時で異なっていることがわかるが、皮膚表面より 0.7 mm の深さ

にてひずみエネルギーの分布が吸引時と圧迫時でよく似ていることがわかる (図 3.3)。この地点は図 2.1 における表皮の領域でありメルケル細胞及びマイスナー小体が反応している可能性が高く、吸引時の皮膚変形を圧覚時の皮膚変形として錯覚していると考えられる。

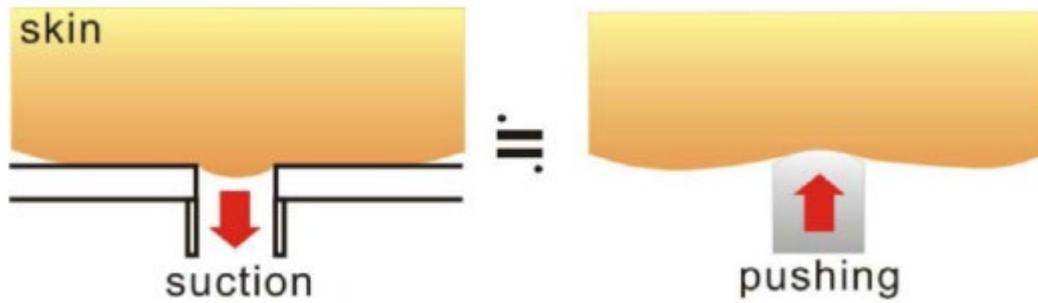


図 3.1 吸引刺激と圧覚刺激の錯覚[125].

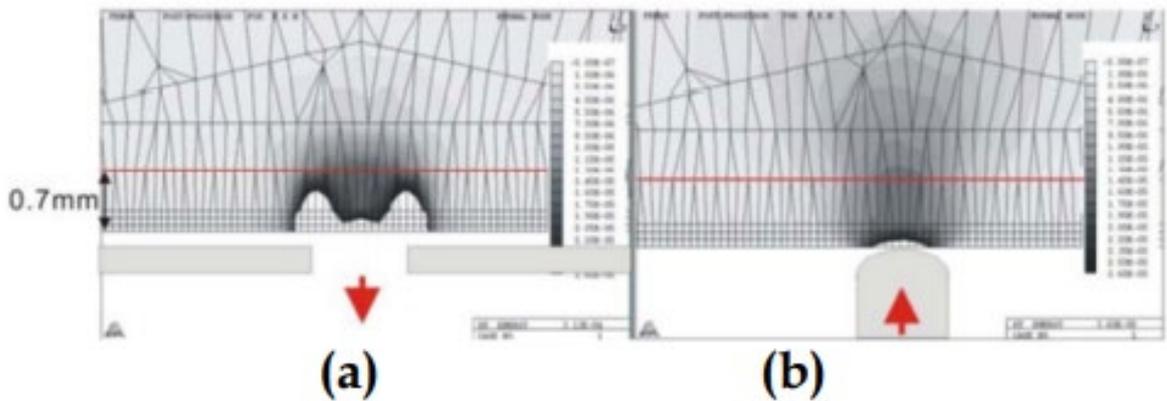


図 3.2 有限要素法による皮膚内部へ発生するひずみエネルギーの三次元解析結果[125].  
(a) 吸引時のひずみエネルギー分布, (b) 圧迫時のひずみエネルギー分布.

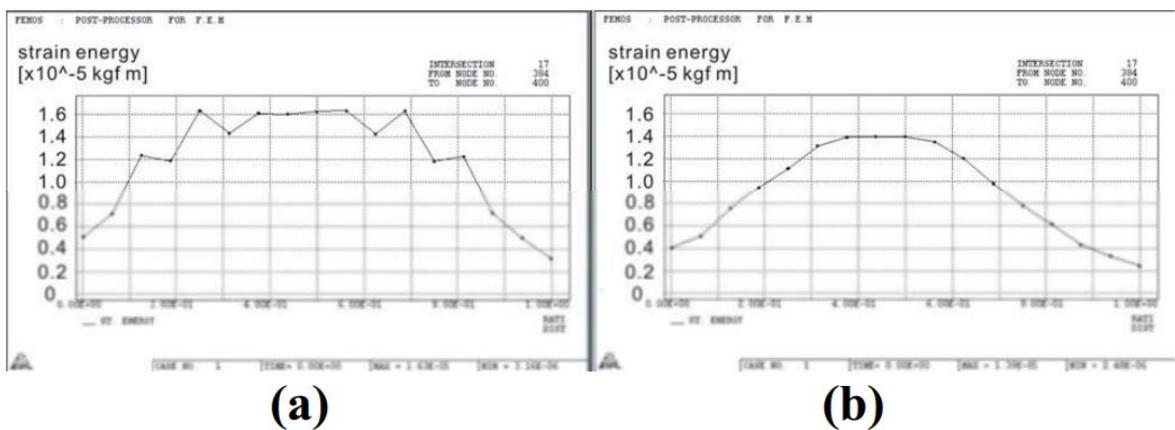


図 3.3 図 3.2 における皮膚表面から深さ 0.7 mm 地点のひずみエネルギー[125].  
(a) 吸引時のひずみエネルギー, (b) 圧迫時のひずみエネルギー.

また Makino らは吸引触覚提示装置を開発し、吸引刺激による圧覚生起の検証も行っている。複数吸引点を持つ凸曲面と突起を持つ凸曲面、なめらかな表面を持つ凸曲面を用意し手掌部へ押し付けた際に表面形状の知覚に差が生じるかを調査した。その結果、吸引刺激を行った場合に表面形状の知覚が実際の突起ほどではないがなめらかな表面よりも粗く感じる事がわかった。

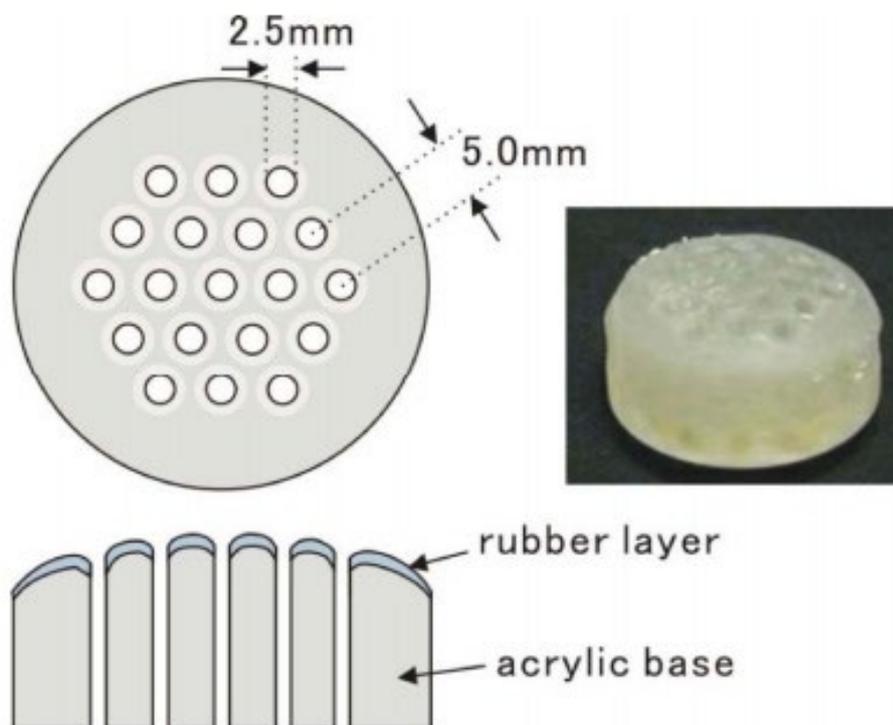


図 3.4 吸引孔をもつ接触物体[125].



図 3.5 比較対象となるなめらかな曲面を持つ接触物体と突起を持つ接触物体[125].

吸引触覚提示技術を用いた触覚提示装置は複数提案されているが[129]–[131]，中でも関連が深い取り組みを紹介する。

Porquis らは吸引触覚提示機構を内蔵したペン型の触覚提示システムを提案している[132], [133].

このシステムでは把持しているペン型デバイスに吸引点を内蔵し、指腹に吸引刺激を提示することで把持物体から受ける力を調整する。また、吸引刺激による力覚知覚の生起を検証しており、ペン型デバイスに重りを取り付けた場合の重量感知覚を回答させた。その結果吸引触覚提示により力覚知覚を変化させることができることが確認された。この知見は吸引触覚による圧覚知覚に基づいており、吸引触覚提示の可能性を広げるものであった。

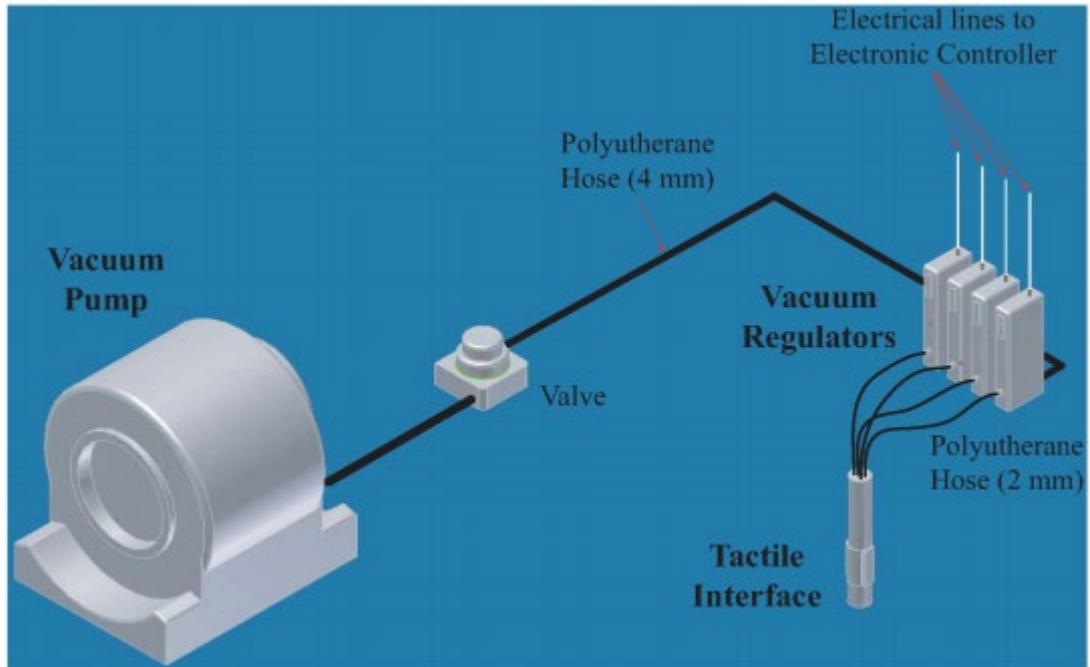


図 3.6 吸引気圧調整システムと装置全体図[133].

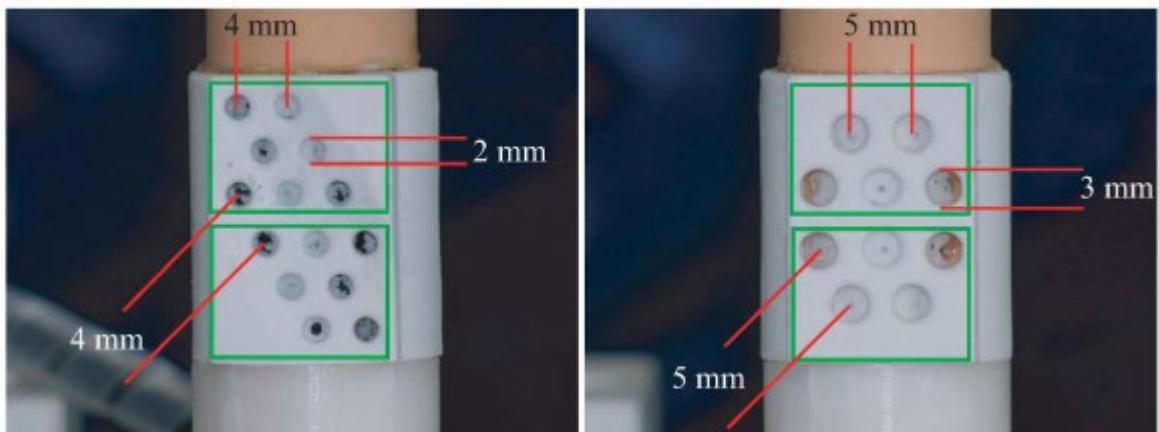


図 3.7 実際の吸引触覚提示面[133].

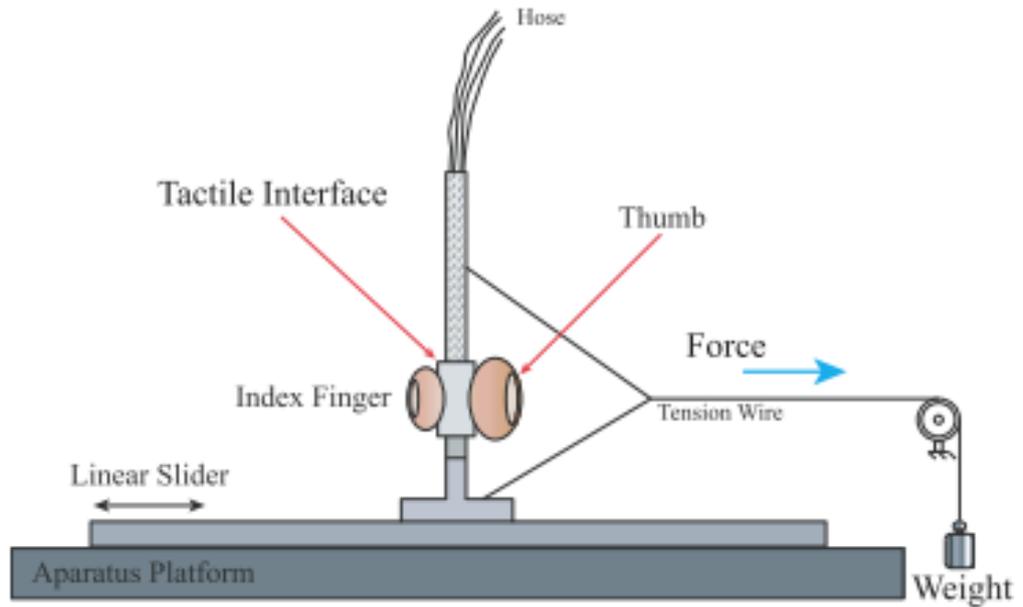


図 3.8 吸引刺激による力覚知覚調査実験装置[133].

吸引触覚提示による力覚知覚と同等の力覚を知覚する重量の重りをのせることで力覚の生起を確認する。

## 3.2 顔面への吸引刺激手法の予備的検討

### 3.2.1 吸引気圧及び径の簡易的な調査

吸引刺激により顔に触覚情報を提示するにあたり適切な吸引径および吸引気圧を簡易的に調査する。吸引刺激を皮膚に提示するために図 3.9 のような装置を作成した。この装置はアクリルとシリコンシートによって構成される吸引接触部と吸引を行う注射器、吸引中の気圧を計測する気圧センサ (MIS-2503-015V)、気圧センサの値を取得するマイコン (ESP-WROOM-32) により構成される。図 3.10 に装置の概略図を示す。



図 3.9 注射器を用いた吸引装置と吸引気圧計測装置.

本実験装置では実験者が手動で注射器を引くことで皮膚を吸引し、その際の吸引気圧を負圧が計測可能な気圧センサを用いて計測する。皮膚との接触部はシリコンシートを円形にカットしたものとアクリルを使用しており、空気漏れが生じないように密閉されている。

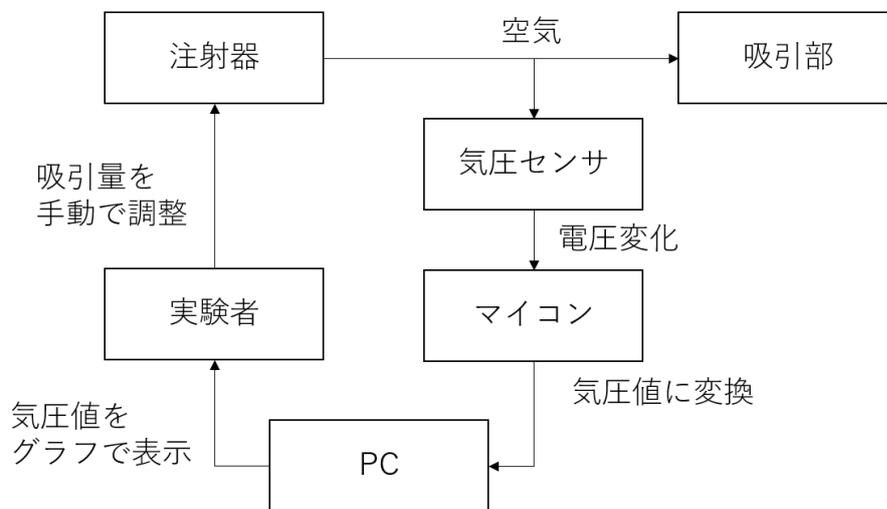


図 3.10 吸引刺激装置システムブロック.

注射器と吸引部はシリコンチューブにより接続されており、途中で気圧センサに分岐し気圧を共有している。気圧センサは気圧をアナログ電圧に変換し、マイコンに内蔵されている ADC (Analog Digital Converter) によりデジタル値に変換する。今回使用した気圧センサ、MIS-2503-015V の最大計測可能負圧は  $-1000$  hPa で精度は  $\pm 1.3$  %FS (フルスケール) であるため計測誤差は  $\pm 13$  hPa である。実験者による事前実験ではこの誤差による吸引触覚強度の変化は感じられなかったため実験に支障はないと判断した。計測された吸引気圧値は PC にデータとして送信され、数値を表示する。

本装置は接触面のシリコンパッドとアクリルフレームを交換することで吸引部の吸引径を変更可能なように作られている(図 3.11)。吸引は実験者の手で行い、気圧センサの値を見ながら目標吸引圧に達するように注射器をなるべく素早く引いた。今回の実験では引く速度は統制しなかった。



図 3.11 シリコンシートとアクリルにより作られた吸引部。

左から直径 4, 8, 12, 16, 20 mm となっており、4 mm 間隔で 5 種類の吸引直径を用意した。図 3.9 の吸引部先端を交換することで容易に吸引直径を変更できる。吸引直径は実験者による事前実験にて直径 2 mm から 30 mm までの範囲で 2 mm 間隔にて変化させたものを試し、吸引触覚強度や弁別しやすさを考慮し上記 5 種類の吸引径を選定した。

吸引触覚の感度を調べる予備的な検討として次のような実験を行った。まず被験者に吸引刺激装置を目の上(眉の上)に押し付けた(図 3.12)。次に吸引刺激を断続的に 5 回行う。吸引は図 3.13 に示す吸引気圧値の表示を見ながら行った。吸引刺激を提示する際被験者には目を閉じるよう指示した。その後被験者に吸引刺激を感じたかどうかを質問し、感じた場合には刺激の心地よさを 5 段階リッカートスケールで解答させた(1 が心地よくない、5 が心地よい)。この時点において吸引刺激に適した吸引気圧と吸引径のパターンは不明であり、また組み合わせが膨大に存在するため、広く触覚知覚の閾値を調査する前に触覚提示に適した吸引パターンの目星をつけるためまず心地よさを基準として調査を行った。

吸引のパターンは吸引径が直径 4, 8, 12, 16, 20 mm の 5 種類、吸引圧が -200, -400, -600 hPa の 3 種類を用意し、それぞれの組み合わせで計 15 パターンをランダムに提示した。その後、目の下に対しても同様の実験を行った。吸引場所は HMD を装着した際に接触するクッション部に基づいて決定した。吸引気圧値も吸引径同様に実験者の事前実験によりわずかに吸引を感じられる気圧値から十分に吸引を感じられる気圧値まで用意した。



図 3.12 吸引箇所.

吸引は右目の下（画像左，目の下から約 20 mm 下），右眉の上（画像右，眉頭頂部より約 20 mm 上）の場所に行った。

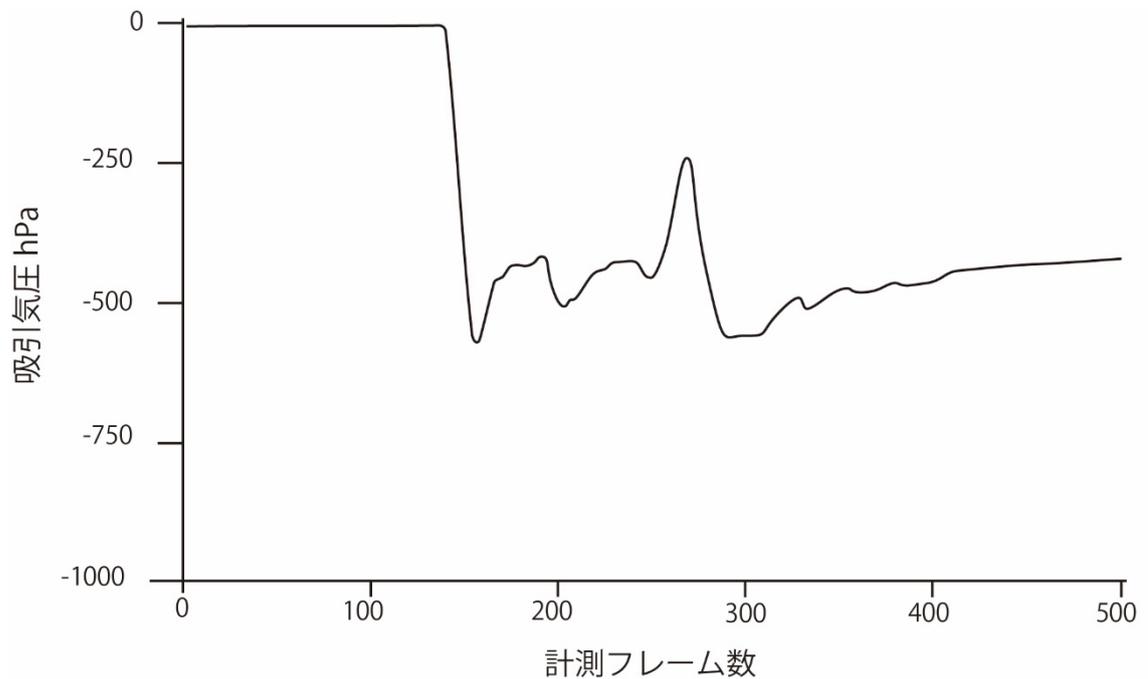


図 3.13 吸引気圧値表示画面のスクリーンショットより再構成.

1 フレームあたり 1.67 ms.

被験者は 3 名（男性 2 名，女性 1 名，22 歳）であった。表 3-1 および表 3-2 に各条件における回答の中央値をのせる。ただし 3 名中 2 名以上が何も感じなかった場合は空欄としており，2 名以上が感じた場合にその中央値を掲載している。

表 3-1 吸引刺激の心地よさ (目の下) (1 が心地よくない, 5 が心地よい).  
 値は中央値を示している. 空欄は 3 名中 2 名が何も感じなかった場合を示す.

		吸引径 (mm)				
		4	8	12	16	20
気圧 (hPa)	-200	1	1	4	4	4
	-400		4	4	3	2
	-600	2.5	3	3	2	1

表 3-2 吸引刺激の心地よさ (眉の上) (1 が心地よくない, 5 が心地よい).  
 値は中央値を示している. 空欄は 3 名中 2 名が何も感じなかった場合を示す.

		吸引径 (mm)				
		4	8	12	16	20
気圧 (hPa)	-200		1	2	3	3
	-400		2	3	3	3
	-600		2	4	3	2

表 3-1 より目の下への吸引刺激の場合最も心地よい刺激パターンは吸引径 8 mm, 気圧 -400 hPa, 吸引径 12 mm, 気圧 -400 hPa, 吸引径 12 mm, 気圧 -200 hPa, 吸引径 16 mm, 気圧 -200 hPa, 吸引径 20 mm, 気圧 -200 hPa の 5 種類であった. 吸引径 4 mm, 気圧 -400 hPa のときは触覚が感じられなかった.

表 3-2 より眉の上への吸引刺激提示の場合最も心地よい刺激パターンは吸引径 12 mm, 吸引圧 -600 hPa であった. 吸引径 4 mm のときはどの吸引気圧においても触覚が感じられなかった.

実験結果より吸引部位によって最適な吸引径と吸引圧が異なることがわかった. 原因として目の下と眉の上では皮膚の柔らかさが異なるため, 吸引したときに変形する皮膚の量が異なることが考えられる. すなわち目の下のほうが眉の上と比較して柔らかいため皮膚の変形量が大きく, 小さい吸引径および低い吸引圧でも十分な触覚を感じられると考えられる. 目の下は全体的に評価の高かった項目が多かった理由も同様であると考えられる. また眉の上で吸引径 4 mm ではどの吸引気圧に置いても触覚を感じる事が難しかった. 目の下でもわずかな触覚しか得られなかったと被験者からコメントを受けた. このことより吸引刺激に最低限必要な吸引径が存在することが推察される.

この実験より得られた吸引径と吸引気圧の組み合わせは吸引触覚提示に使用可能なものとして以降の実験にて基準として利用する.

### 3.2.2 部位ごとの適切な吸引気圧の調査

3.2.1 項では吸引刺激による触覚提示をするために目元周辺への最適な吸引気圧と吸引径を予備的に調査した. その結果, 吸引刺激に対する鋭敏さは吸引箇所および被験者間で一定ではないことがわかった. そこで被験者間で安定した触覚刺激を提示するためにまず被験者ごとに吸引刺激を知覚できる吸引知覚気圧値を調査する. この際「触覚を感じ始めた気圧値」ではなく, 「明確に

吸引だとわかる気圧値」を調査する。先行研究[125]にもあるように人の皮膚は吸引されている場合に圧覚を生じることが示唆されているため、吸引触覚刺激提示において感覚の異なる触覚刺激を除外し安定した触覚提示を行うため吸引知覚気圧値を本実験では基準とした。以後、吸引知覚気圧値と表記した場合はこの意味にて用いる。

さらに、計測した被験者ごとの吸引知覚気圧値に応じた複数パターンの吸引刺激を提示し、その知覚強度を評価することで吸引知覚気圧値と触覚提示に最適な吸引気圧との関係を調査し、安定的な触覚提示手法を見出す。

3.2.1 項における実験では注射器と手動による吸引を行っていたため吸引速度や吸引量を統制することが困難であった。そこで図 3.14 のような空気吸引ポンプ(SC3701PML, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC)を採用し安定した吸引を行い、2 種の電磁弁(SC415GF, SC0526GF, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC)と気圧センサ (MIS-2503-015V) を用いて吸引気圧を制御する。空気吸引ポンプの最大吸引気圧は $-600$  hPa であり、吸引触覚提示に十分な性能を有する。電磁弁は MOSFET (2SK2232) により起動を制御する。電磁弁、気圧センサの制御はマイコン (ESP-WROOM-32) を用いて行う。気圧制御機構の概略図を図 3.15 に示す。2つの電磁弁はそれぞれ3方向電磁弁 (SC415GF) と2方向電磁弁 (SC0526GF) であり、3方向電磁弁は空気吸引ポンプと吸引系に接続され、2方向電磁弁は外気と吸引系に接続されている。3方向電磁弁は通常は空気吸引ポンプとチューブで接続されており、駆動することで空気吸引ポンプと外気を接続する。この際、吸引系側は密閉されており系が外気にさらされることはない。2方向電磁弁は通常密閉されており吸引系を密閉するが、駆動することで外気と接続する。これら電磁弁を切り替えることで、系の吸引、密閉、開放の3状態を操作する(図 3.16)。また皮膚に吸引痕を残さないために本実験では吸引と開放を1秒間隔で切り替え、最大吸引気圧値は $-500$  hPa を上限とする。吸引部は3.2.1 における実験と同様にアクリル製の外装とシリコンシートの皮膚接触部により構成される。吸引径は3.2.1 項における実験結果より直径 12 mm を採用する。



図 3.14 吸引ポンプ (SC3701PML, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC)。

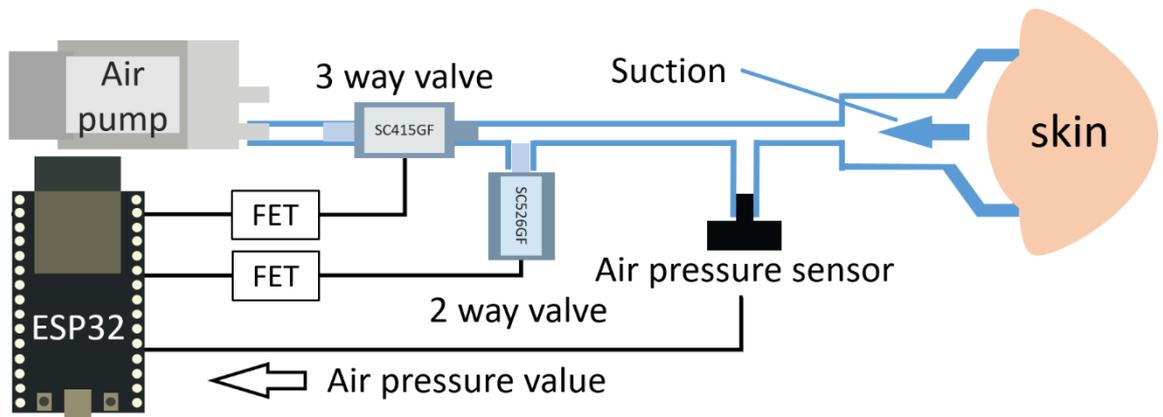


図 3.15 吸引気圧制御システムの概要図。

3方向電磁弁により吸引を制御し、2方向電磁弁により排気を制御する。吸引気圧を気圧センサでよみとり目標気圧との差に応じて電磁弁の動作をFETで制御する。

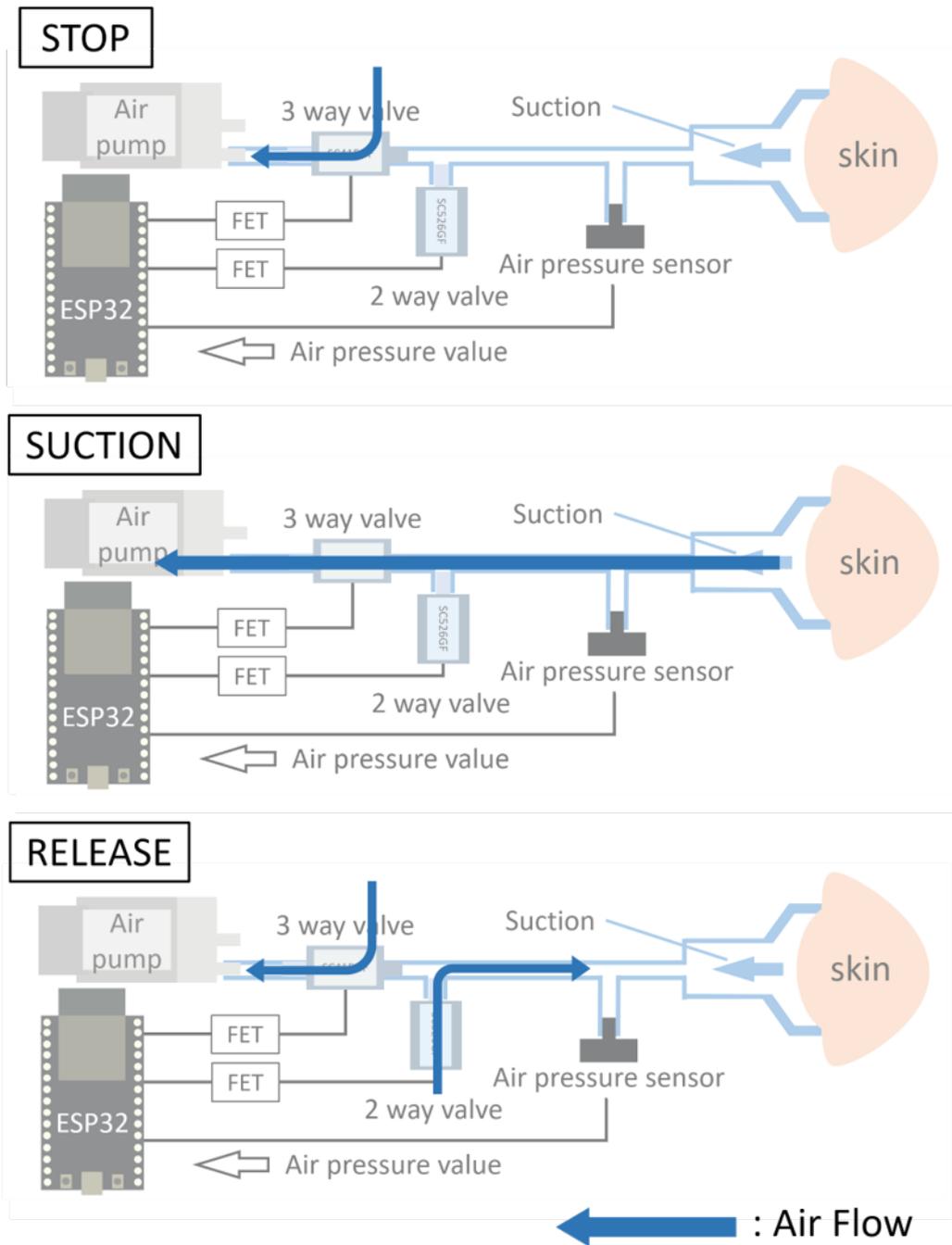


図 3.16 気圧調整状態別制御システムの概要。

吸引知覚気圧値は被験者自身の調整により決定した。被験者自身の手で吸引部を肌に押し当て、別の手でテンキーを操作し吸引圧を調整した。被験者は吸引刺激を感じながら「明確に吸引だとわかる気圧値」を選択し、吸引知覚気圧値とした。

吸引知覚気圧値の測定後、最適な吸引気圧値を調査するために吸引知覚気圧値の1倍、 $\sqrt{2}$ 倍、 $2\sqrt{2}$ 倍、4倍、 $4\sqrt{2}$ 倍の気圧値で吸引を行い、それぞれの刺激に対してリッカートスケール7段階で心地よさを評価した（1：心地よくない，7：心地よい）。心地よさの基準としてリッカートスケール4を基準刺激（吸引知覚気圧値の2倍の吸引気圧値）とし、基準刺激と提示気圧値を比較することで回答させた。基準刺激の値は最低限触覚を感じられる吸引知覚気圧値の2倍程度であれば十分触覚情報を感じられる値であると考え設定した。以上の手順を右目の下と右眉の上に対

して行った。被験者は10名（21～27歳，うち女性3名）であった。



図 3.17 吸引気圧の変化と刺激強度の関係調査実験の様子。

目の下と眉の上で計測した吸引知覚気圧値を表 3-3 に示す。10人中2名（subject I, J）を除き、目の下のほうが弱い吸引圧で吸引を感じている。この結果は実験1の結果と合致する。

次に倍率条件ごとの心地よさの評価を図 3.18 と図 3.19 に示す。縦軸はリッカートスケールによる心地よさの回答，エラーバーは標準偏差を示している。Kruskal-Wallis 検定の後，ボンフェローニの補正をかけた多重比較を行った結果，すべての条件間で有意差はなく，群内にて基準刺激と比較した場合においても有意差は見られなかった。

すなわち最適な吸引気圧値は吸引知覚気圧値の倍率に依存せず，被験者間で最適な吸引気圧値は異なることがわかった。

実験後のコメントとして吸引知覚気圧値よりも弱い吸引の場合に圧覚を感じるという意見が多数寄せられた。圧覚のほかに接触感，タップ感を感じたというコメントもあった。これらの観察から，皮膚面に対する垂直方向の圧覚はある一定以下の吸引刺激であれば圧迫として感じられるという手掌部における先行知見[125]が目元周辺においても発生する可能性は高いことが示唆された。

表 3-3 閾吸引気圧値 (hPa).

Subject	under eye	over eyebrow
A	-15	-115
B	-35	-50
C	-35	-195
D	-40	-140
E	-45	-205
F	-65	-95
G	-65	-125
H	-75	-125
I	-95	-55
J	-115	-80

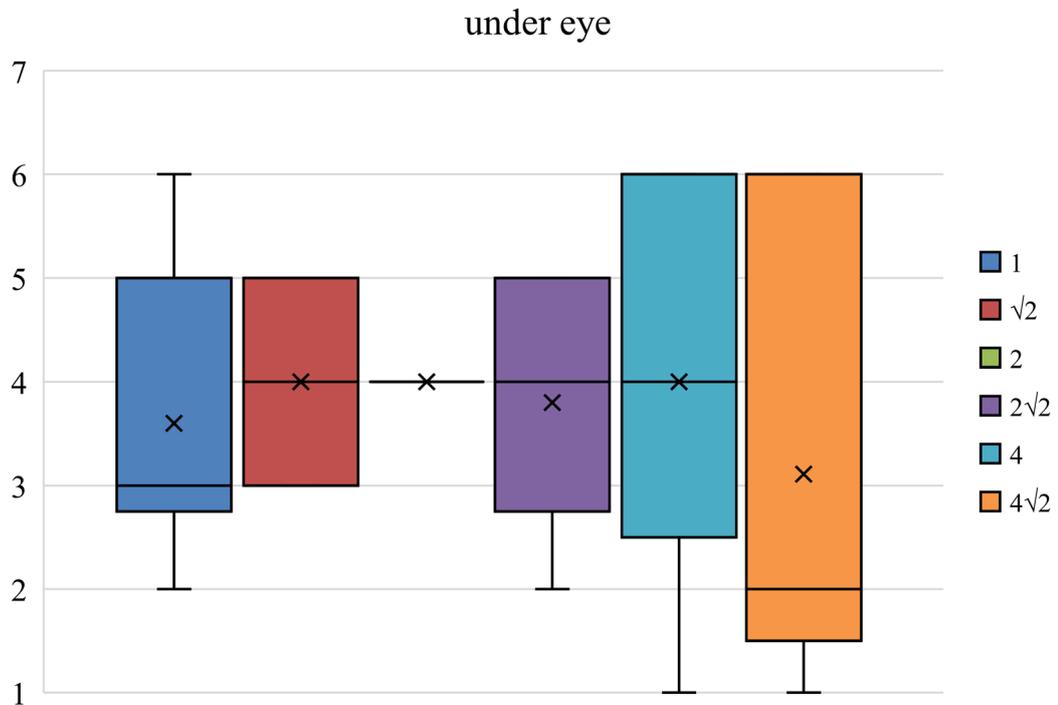


図 3.18 吸引刺激の快適さ (目の下) (1:心地よくない, 7:心地よい).

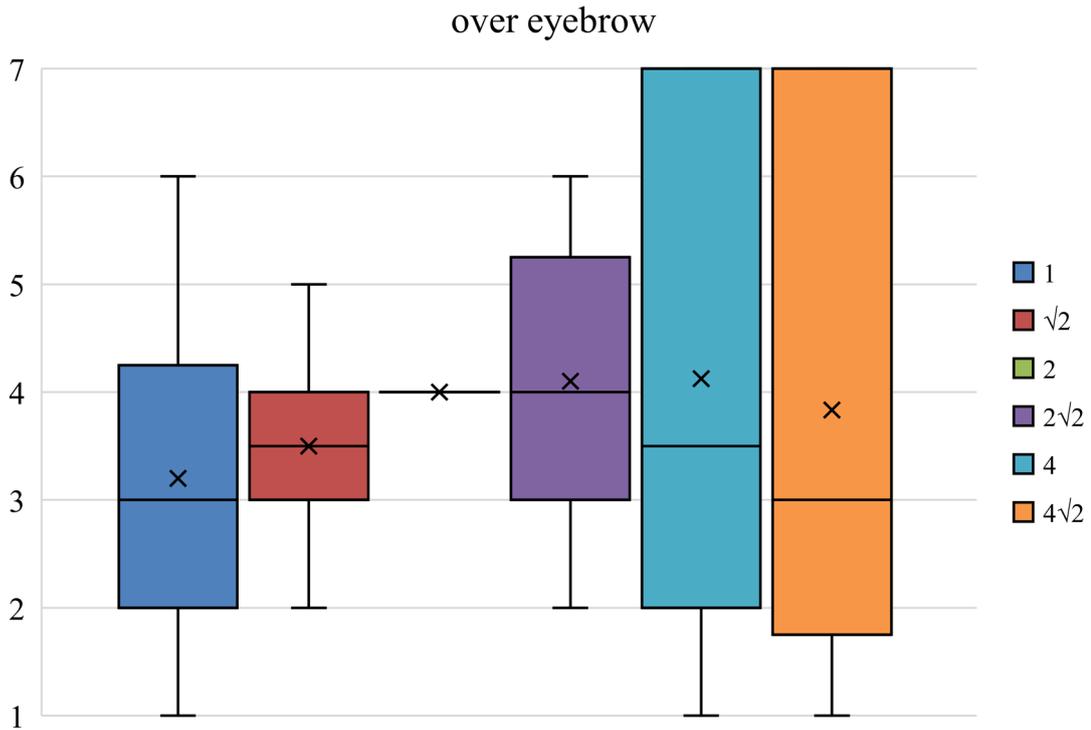


図 3.19 吸引刺激の快適さ (眉の上) (1:心地よくない, 7:心地よい).

### 3.3 顔面への提示触覚モダリティの比較実験

#### 3.3.1 実験目的

本実験では本研究の目標の一つである指先触覚情報の顔面への提示による VR 体験の質の向上を実現するためにはどの触覚モダリティが有用であるかを確認する。そのために本実験では VR 空間においてトラッキングされた自身の指 (手, 前腕) とバーチャルオブジェクトの接触情報を複数の触覚モダリティを用いて顔に提示し, どの感覚が VR 体験の質の向上に最も適しているかを確認する。

#### 3.3.2 実験装置

HMD のクッション部と顔の接触面に吸引接触面を配置するために小型の吸引接触面を開発した (図 3.20)。

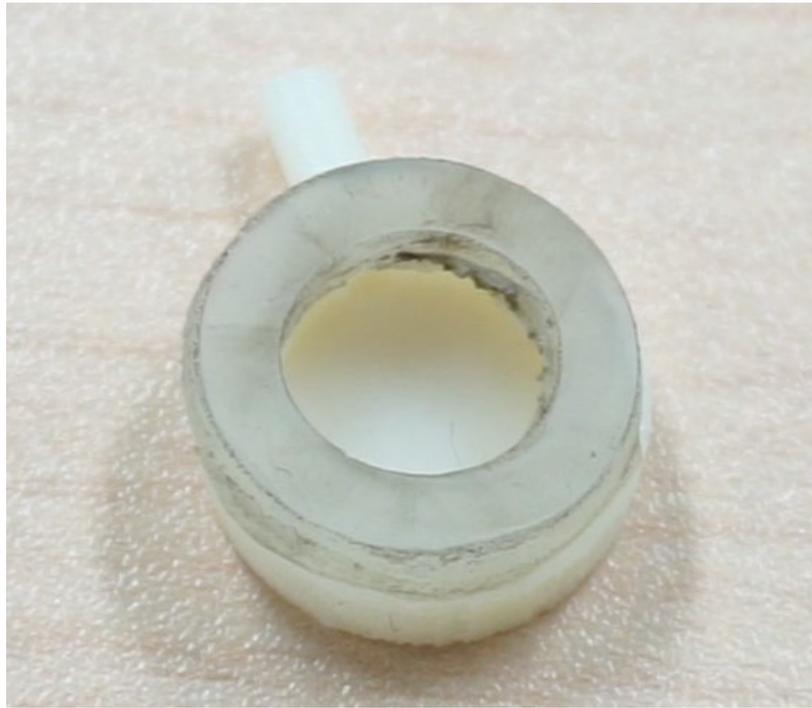


図 3.20 積層式 3D プリンタとシリコンシートにより作られた吸引部。

この吸引部は 3D プリンタ製 (ABS 樹脂) の本体と円形にカットしたシリコンシートを接着し作られている。接続する吸引チューブが横から取り付けられるように作成されており、HMD と皮膚の接触面という限られた空間に配置ができるようにコンパクトな形状になっている。吸引部の直径は 3.2.1 項の実験結果より 12 mm とした。吸引部は 3.2.2 項にて用いられた気圧制御システムに接続され、任意のタイミングで気圧制御を行う。

### 3.3.3 実験手法

HMD に内蔵した吸引刺激 (以下 HMD 吸引刺激)、HMD に内蔵した振動モーター (以下 HMD 振動刺激)、手掌部で把持したコントローラーからの振動提示 (以下手掌部振動刺激) を使った場合における VR 体験の質の向上を比較する。HMD 吸引刺激は 3.2.2 項にて吸引気圧による刺激の心地よさに有意差がなかったため、基準刺激である吸引知覚気圧値の 2 倍の吸引気圧を使用した。吸引位置は 3.2.2 項にて確認した箇所に対して行い (右目の下と右眉の上)、HMD 振動刺激も同じ箇所に対して行った。HMD 振動刺激は振動モーター (coin type coreless vibration motor : FM34F, Tokyo Parts) を HMD に取り付けて使用した。コントローラーは HMD (HTC Vive, HTC. inc) 付属の Vive コントローラーを用い、内蔵された振動子を用いた。



図 3.21 HMD の内側に振動子を取り付けた様子.

体験の質の評価は各触覚刺激提示条件にて VR 体験を行い、各質問項目に回答することで行った。VR 体験は VR 空間中で空中に固定された手のひらで掴めるほどの大きさの球体に触れるという体験を用意した。HMD 吸引刺激、HMD 振動刺激、手掌部振動刺激はすべて VR 空間中で手と球体が接している際に継続して提示された。質問項目はボールのリアリズム、体験全体の質、ボールの境界の明瞭さ、手で触った感覚の明瞭さを 7 段階リッカートスケールで回答させた。このとき、視覚刺激のみの状態を基準刺激とし基準刺激を 4 として質問に回答させた (1 が良くない/明瞭でない, 7 が良い/明瞭である)。

装置構成は HMD として HTC Vive、手の位置計測のために Leapmotion を用い、さらに各触覚刺激デバイス (吸引システム、振動モーター、Vive コントローラー) にて構成される。

VR 空間におけるボールとの接触判定は人差し指と親指に対して付与し、ユーザーの触る姿勢を考慮して人差し指の接触を眉の上、親指の接触を目の下として刺激を提示した。刺激提示は基準刺激のあとに各条件刺激を行い 1 試行ごとに質問項目に回答させた。刺激条件 3 つを 5 試行ずつ行い、計 15 試行をランダムに被験者 8 名 (男性, 21~27 歳) に対して行った。また実験終了後に体験の感想の聞き取りを行った。

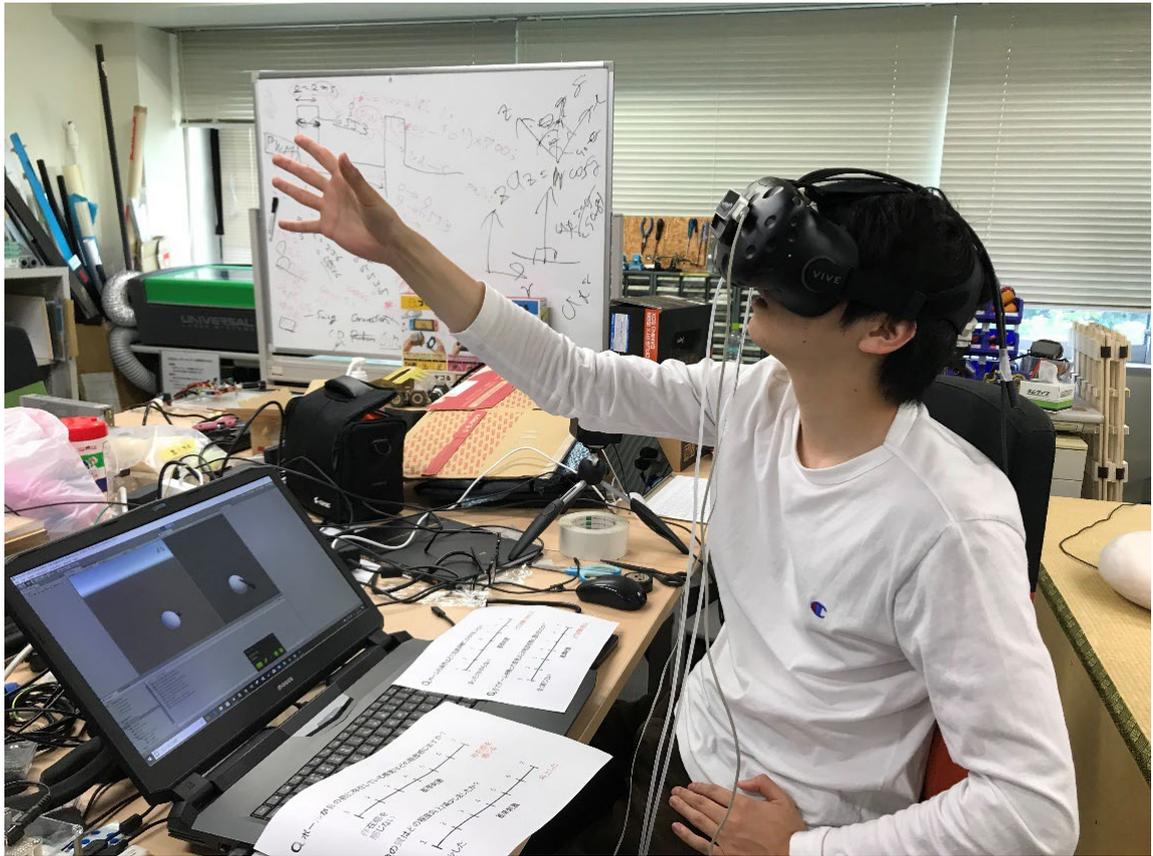


図 3.22 VR 空間における接触感知覚の実験の様子。

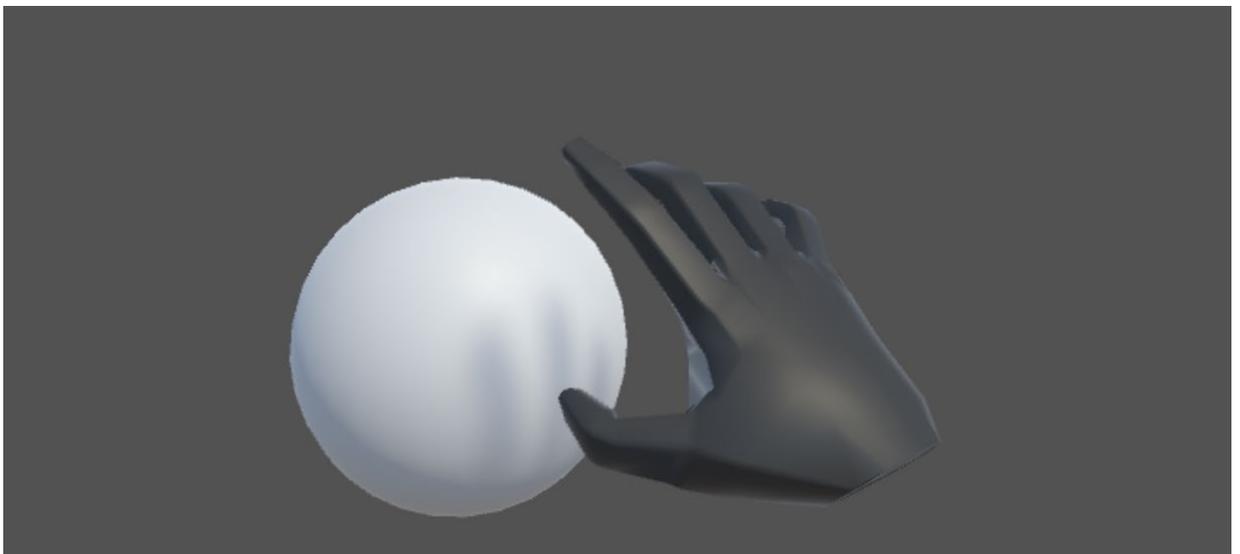


図 3.23 被験者が HMD にて見ている映像。  
黒い手モデルの人差し指と親指の先端に接触反応点がある。

### 3.3.4 実験結果

図 3.24 に結果を示す。まず、基準刺激（視覚提示のみ、スコア 4）との比較については Wilcoxon による符号順位検定の結果、体験の質について HMD 振動刺激は基準刺激と有意な差はなかった。

ほかの質問項目についてはすべて基準刺激よりも有意に良い結果となった。

Kruskal-Wallis 検定の後ボンフェローニの補正をかけた多重比較の結果、ボールのリアリティについて HMD 吸引刺激は手掌部振動刺激に比べ有意に良い ( $p=0.009$ ) 結果となった。体験の質について、HMD 吸引刺激は HMD 振動刺激 ( $p=0.018$ )、手掌部振動刺激 ( $p<0.001$ ) に比べ有意に良い結果となった。境界の認識では HMD 吸引刺激と手掌部振動刺激 ( $p<0.001$ ) 及び HMD 振動刺激と手掌部振動刺激 ( $p=0.024$ ) に有意差があった。手で触った感覚はどの条件間でも有意な差はなかった。

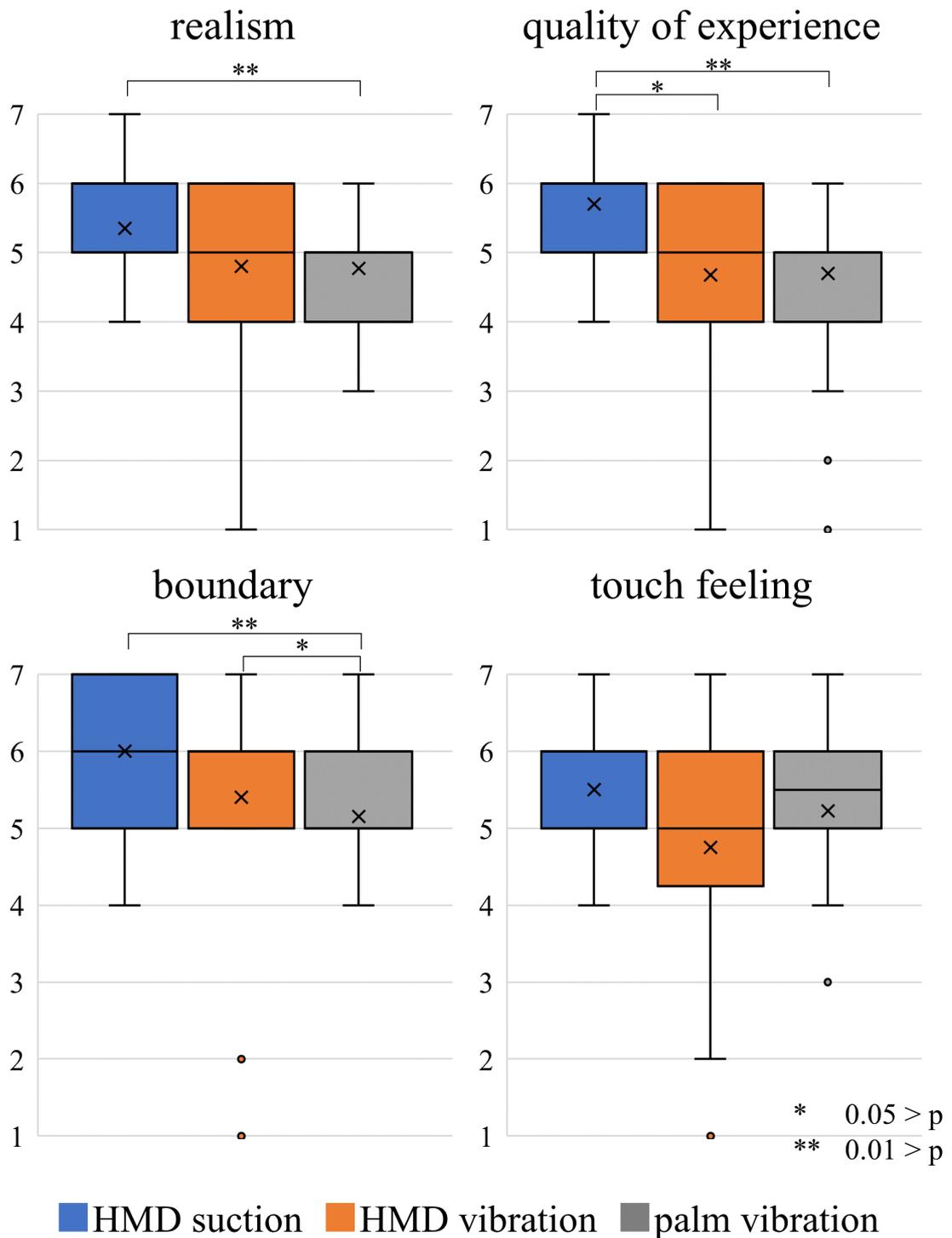


図 3.24 質問の回答結果.

リッカートスケール7段階での回答, スコア4は基準刺激であるHMDの映像のみの刺激. 左上: ボールのリアリズム, 右上: 体験の質, 左下: ボールの境界, 右下: ボールに手で触れた感覚.

### 3.3.5 考察

これらの結果より, HMD吸引刺激は総合的に体験の質, ボールのリアリティ, 境界の認識を向

上させることが確認できた。従来から提案されてきた HMD 振動刺激は境界の認識のしやすさの点で手掌部振動刺激よりも優れていたが、体験の質に関しては唯一視覚提示のみの場合と有意な差が見られなかった。原因として HMD が振動しディスプレイが見えづらくなってしまう、振動が顔全体に伝搬し不快であるなどデメリットがあるため総合的に体験の質がよくなかったと考えられる。

手掌部振動刺激に関しては特にデメリットはないが、コントローラーを持つこと自体が体験の気軽さを損なっており、吸引刺激の優位性を示す結果となった。

HMD 吸引刺激はそのほかコメントで接触時に柔らかさを感じるという意見があった。また HMD 振動刺激と比較して HMD 吸引刺激は接触感を強く感じるというものがあった。これは HMD 吸引刺激の場合、吸引開始時の刺激と定常状態の刺激に差があるため実際に物体に触れた際の皮膚の接触感（触り始めの皮膚変形と定常的に触れている際の皮膚感覚）と非常に近い感覚を提示できていることが原因であると考えられる。振動刺激においても振動の周波数、刺激パターンを変化させることで同様に時間変化させることは可能であるが、明確な圧覚の提示は吸引刺激のメリットであると考えられる。

## 3.4 吸引刺激による圧覚提示実験

### 3.4.1 実験目的

3.2.2 項の結果から顔面への吸引刺激により圧覚が生じる可能性があることがわかった。予備的な調査にて明確に吸引刺激だとわかる吸引気圧よりも弱い気圧で皮膚を吸うことで圧覚に近い感覚を生起することがわかったため、この現象を詳しく調査すべく吸引刺激の吸引知覚気圧値を調査し、その吸引気圧値よりも弱い吸引での刺激強度と圧覚知覚の度合いを調査する。

### 3.4.2 実験装置

吸引システムは 3.3 節の実験と同様のシステムを用いた。吸引圧力は 3 秒間提示され、2 秒間開放し、皮膚に痕跡が残らないよう配慮した。最大吸引圧力値は  $-500$  hPa に制限した。吸引口はアクリル製の外装で構成され、皮膚接触部はシリコンシートで構成した。予備実験から吸引直径は 12 mm とした。

### 3.4.3 実験手順

吸引知覚気圧値は被験者自身が自分の手で吸引部分を皮膚に押し付け、もう一方の手でテンキーを使用して圧力を調整し、決定した。このとき、吸引知覚気圧値は吸引の感覚がはっきりと感じられる値を選択させた。

吸引知覚気圧値を測定した後、吸引知覚気圧値未満の吸引刺激の質を評価した。気圧値は吸引知覚気圧値の  $1/6$  倍、 $2/6$  倍、 $3/6$  倍、 $4/6$  倍、および  $5/6$  倍とした。各刺激条件を 5 回繰り返し、

被験者ごとにランダムな順序で合計 25 回試行を行った。被験者はマグニチュード推定（吸引知覚気圧値での刺激の強度を 10 と設定し、被験者は任意の数で回答できる）および 7 段階リッカートスケール（-3：明らかに吸引されている，3：明らかに押されている）によって吸引強度とその質を評価するよう指示した。比較刺激は常に刺激の後に提示した。被験者には実験中にホワイトノイズを聞かせ、聴覚刺激を遮断した。上記の実験は右目の下に対して行った。5 人の被験者（22～27 歳，すべて男性）に対し実験を行った。

### 3.4.4 実験結果と考察

マグニチュード推定の結果を図 3.25 に示す。Kruskal-Wallis 検定の後，ボンフェローニの補正をかけた多重比較を行った結果，空気吸引圧力値が減少するにつれ触覚の強度が減少することが確認された。

吸引知覚気圧値の結果を表 3-4 に示す。感覚の質の結果を図 3.26 に示す。Kruskal-Wallis 検定の後，ボンフェローニの補正をかけた多重比較を行った結果，1/6 条件は 5/6 ( $p < 0.001$ ) および 4/6 条件よりも圧迫感が有意に高いことが明らかになった ( $p < 0.001$ )。同様に 2/6 条件は，5/6 条件 ( $p = 0.013$ ) および 4/6 条件 ( $p = 0.008$ ) よりも圧迫感が有意に高かった。次に，Wilcoxon の符号ランクテストによるスコア 0（圧力でも吸引でもない）との比較によりスコア 0 と有意な差はないことが明らかになった。

これらの結果は，吸引圧力値が減少するにつれて触覚の強さが減少し，2/6 以下の空気圧条件では吸引のような感覚よりも圧迫的な感覚が有意に多かったことを示している。ある被験者は，吸引感が吸引部を肌に押し付ける圧力によって影響を受けるとコメントした。また別の被験者は，圧迫感ではなく感触やタップ感を感じたとコメントした。これらの結果及びコメントをまとめると，皮膚吸引触覚提示時には明確に吸引だと知覚する気圧値より弱い吸引の場合は圧覚を生じやすいといえる。しかしながら触覚強度は吸引気圧に依存しているためより強い圧覚を提示することは困難である。

VR 体験における指先への圧覚提示手法としては指先に生じる圧覚をバーチャルオブジェクトの把持や操作など比較的弱い圧覚でも対応可能な体験に制限することがより高いリアリティを維持することに繋がると考えられる。ただし，衝撃感など瞬発的に圧覚よりも触覚強度が重要だと考えられる体験においては吸引強度を強くし，刺激強度を高める手法を組み合わせることで幅広い体験に対応できると考えられる。

表 3-4 吸引知覚気圧値。

被験者	吸引知覚気圧値 (hPa)
A	-235
B	-420
C	-110
D	-265
E	-165

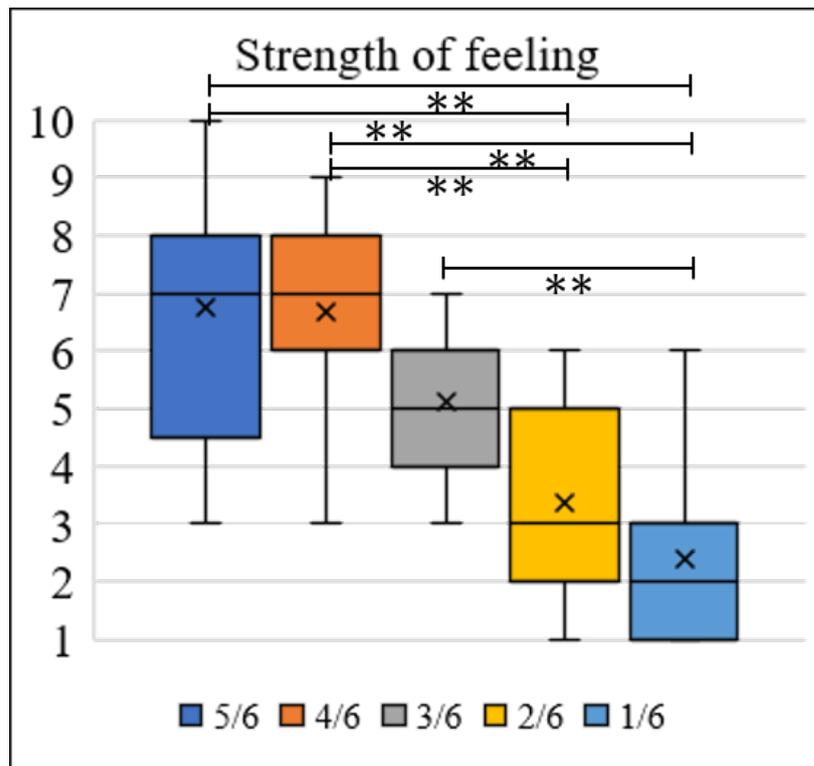


図 3.25 マグニチュード推定法の回答結果.

(スコア 10 を基準吸引刺激吸引知覚気圧値とした) \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ .

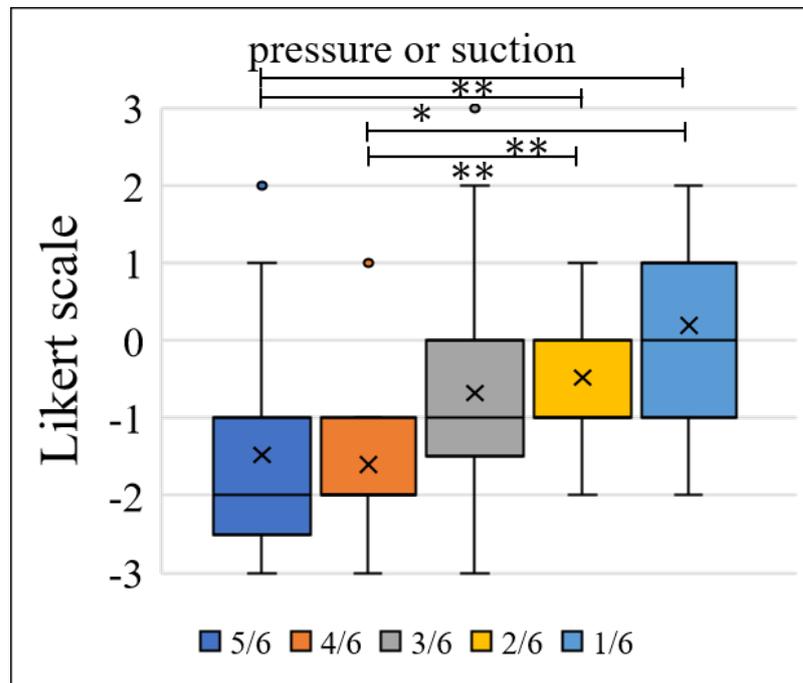


図 3.26 リッカートスケール評価の結果.

(-3 : 明確に吸引されている, 3 : 明確に圧迫されている). \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ .

## 3.5 動的吸引刺激変調による硬柔感提示

### 3.5.1 実験目的

吸引触覚により圧覚を提示可能であることがわかった。しかしながら強く物体に触れるような押し込み感覚や強い反力の提示は困難であった。そこでユーザーのインタラクションに合わせて動的に吸引気圧を調整し、ユーザーが認識する硬柔感を変化させることであたかも硬い物体に触れているような感覚の提示を試みる。硬柔感の提示は接触するバーチャルオブジェクトの硬度に応じて吸引気圧の変化率を調整することで表現する。なお硬柔感は物性知覚において重要なだけでなく、映像だけではわからない触覚特有の感覚であり、インタラクションが触覚に与える影響を調査するために有効な対象である。よって本実験ではより強い圧覚の提示を主目的とし、同時にインタラクションが触覚に与える影響についても考察する。

### 3.5.2 実験装置

吸引気圧の制御はこれまで使用した気圧制御システムにより行った。また吸引気圧形状の改善を行った。皮膚に痕を残さないために吸引径を小さくし、皮膚変形量を最小限に留めた。また最大吸引気圧値は $-600$  hPa を上限とした。吸引部の吸引径は予備実験より多数の試作から選定し、吸引孔は $5$  mm で中心間距離は $6$  mm であった。



図 3.27 UV レジン製の吸引部。  
吸引孔は $5$  mm で中心間距離は $6$  mm であった。

### 3.5.3 実験手順

実験の手続きはすべて VR 空間内で行われた。VR 空間の映像は HMD (Oculus Quest, Oculus) により提示され、指のトラッキングは光学式のセンサ (Leapmotion, Ultraleap) を用いた。VR オブジェクトとの接触は右人差し指が用いられ顔面への吸引刺激は右目の下に提示された。

まず被験者ごとに最大吸引気圧の計測を行った。その際に吸引刺激として不快でない範囲で最大の吸引となるように被験者に調整するように指示し、気圧の調整は被験者自身の手で行った。

最大吸引気圧を決定した後、VR 空間内に固定された球に指先でふれ、その押し込み量に応じて吸引を行った。球の半径は 10 cm であった。押し込み量と吸引気圧の関係は最大吸引気圧に到達するまでの押し込み量が球の半径に対し 4/4 倍, 3/4 倍, 2/4 倍, 1/4 倍, 接触時に最大吸引気圧になる条件という 5 条件を用意した。被験者は各条件にて自由に球に触れ、知覚した硬軟感をリッカートスケール 7 段階で回答した (-3 : 柔らかい, 3 : 硬い)。各条件を 5 試行行い、計 25 試行を行った。



図 3.28 多点吸引部を装着した HMD。  
実験では赤い丸をつけた部分の吸引部のみを利用した。

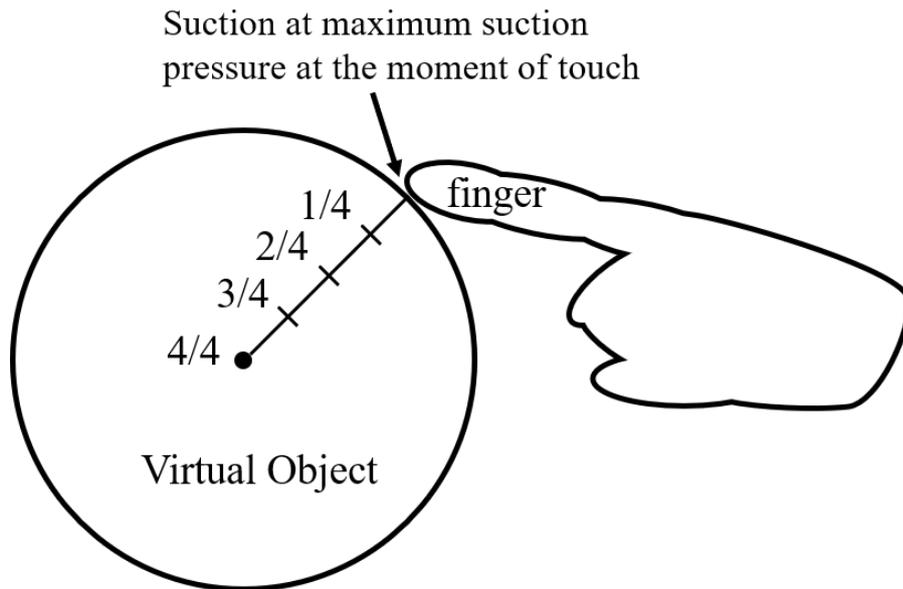


図 3.29 吸引圧と指の押し込み量の関係。  
最大吸引圧になるための指の押し込み量は条件によって異なる。

### 3.5.4 実験結果と考察

研究室所属の 23～25 歳の 6 名（うち女性 1 人）に対し実験を行った。彼らは HMD の使用経験があり、VR 空間におけるインタラクションに慣れていた。実験結果を図 3.30 に示す。図中の max 条件は VR のオブジェクトに接触した瞬間に最大吸引気圧に変更することを意味している。

Kruskal-Wallis 検定の後、ボンフェローニの補正をかけた多重比較を行った結果、max 条件は 2/4 倍 ( $p < 0.001$ )、3/4 倍 ( $p < 0.001$ )、4/4 倍 ( $p < 0.001$ ) と有意差があった。1/4 倍条件は 3/4 倍 ( $p = 0.003$ )、4/4 倍 ( $p < 0.001$ ) と有意差があった。

実験結果より最大吸引気圧に至るまでの押し込み量が大きいほど柔らかさを知覚しやすく、逆に指と VR オブジェクトが接触した瞬間に強く吸引を行うと硬さを知覚しやすい傾向にあることがわかった。

しかしながら実験後に被験者への聞き取りにより一部の被験者から「実験条件の違いにより触覚強度の変化は理解できたが硬柔感を感じにくかった」といったコメントを得た。本実験においては被験者の能動的な運動に合わせて触覚強度を変調することにより硬柔感の提示を試みたが、人は接触時に生じる反力のほかに接触面積の変化[134]や視覚的な変形による硬度の推定[135]を行っているため硬柔感を感じられなかったと考える。また本実験では接触するバーチャルオブジェクトは変形せず、指先がめり込むような映像が表示されたことも硬柔感を感じにくくさせた要因であると考えられる。

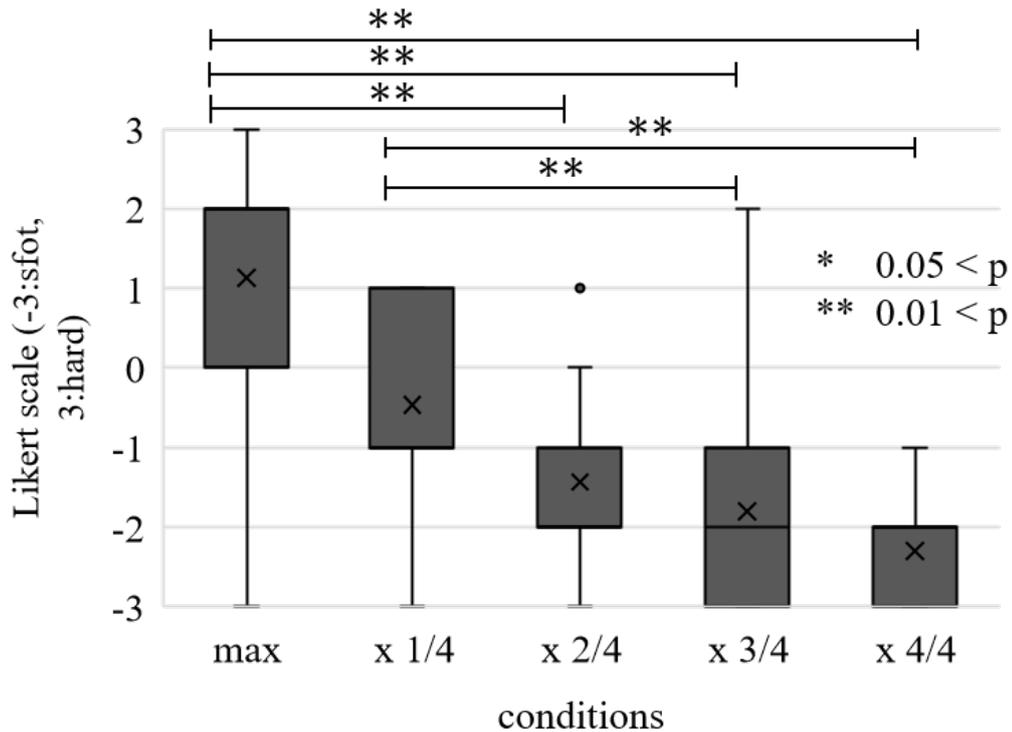


図 3.30 実験結果.

max は VR オブジェクトに触れた瞬間に最大吸引気圧となる。

## 3.6 吸引部形状の変化による触覚変調実験

### 3.6.1 実験目的

3.5 節において多点の吸引孔を持つ吸引部を設計し、触覚提示を行った。過去の吸引触覚提示手法として Makino らの検証[125], [136]では複数点の吸引孔を持つ吸引部が採用されていた。同様に Porquis ら[132]による指先への吸引触覚提示による力覚変調を行った研究においても多点吸引が用いられているが、吸引径パターンによる感覚の違いについては検証されていない。またこれらの研究は手掌部に対して適用されており、顔面の皮膚においても同様の吸引径、吸引点数が有効であるかは明らかでない。そこで本節では複数の吸引形状を試作し、それぞれの吸引部における触覚知覚を調査し、接触感知覚を目的とした顔面への吸引触覚提示に適した吸引部形状を探索する。

### 3.6.2 吸引気圧調整機構

空気圧の調整はこれまで用いた吸引気圧制御機構を改変した装置を新たに開発した。吸気状態、排気状態、停止状態を切り替える手法はこれまで同様であるが (図 3.31, 図 3.32), 本実験では現在の気圧と目標気圧の差が 1 hPa 以内になった場合に密閉するようにした。この 1 hPa を目標気圧と現在の気圧の差を許容する気圧範囲を許容誤差圧とした。制御ループは 1 ms とした。

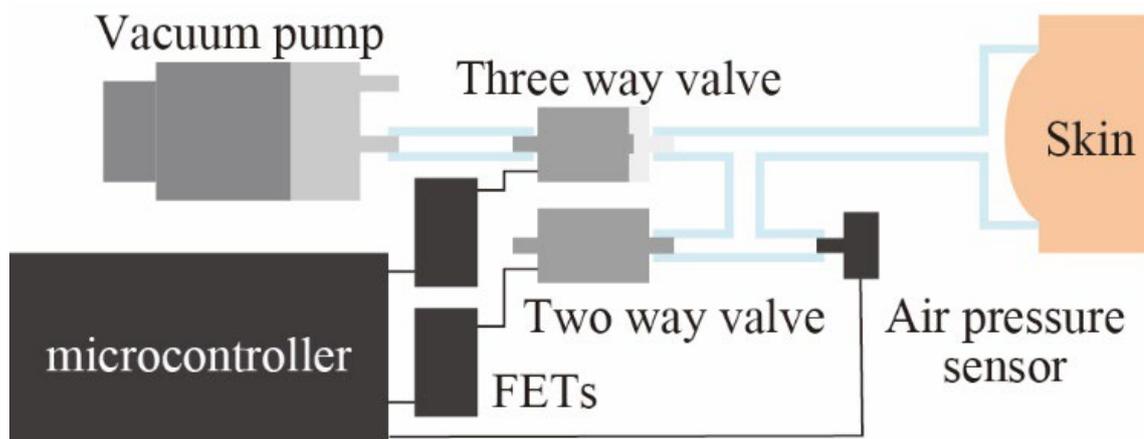


図 3.31 吸引気圧調整機構の概略図。

気圧センサにて吸引気圧を計測し、マイクロコントローラー（ESP32）にてFETを用いて三方電磁弁と二方電磁弁を制御する。

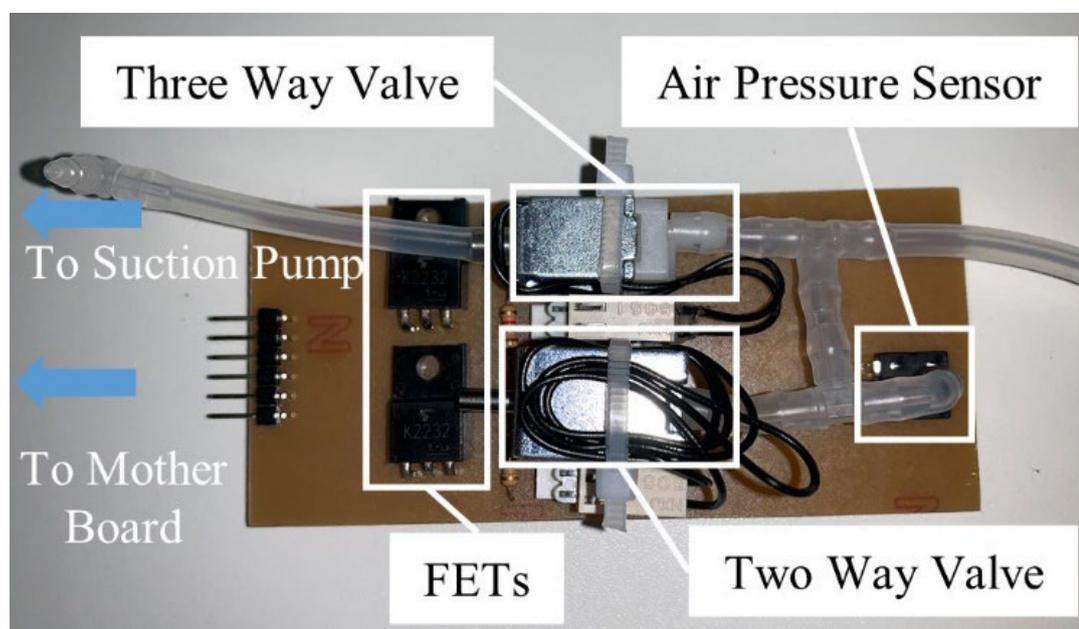


図 3.32 吸引気圧制御モジュールの写真。

モジュールは、2つのFET、3方向電磁弁、2方向電磁弁、気圧センサにより構成されており、マザー基板に接続することでマイクロコントローラーと接続する。

吸引気圧を制御する電磁弁は、信号を受けてから10ms以内に流路が切り替わる。図3.33に吸引気圧の変化と電磁弁への信号入力を示す。このシステムでは、目標圧力に到達するまでに約100msを要したが、気圧の立ち上がりのタイミングは信号入力とほぼ同時であった。また3.4節での圧覚知覚調査実験において吸引知覚気圧値を調査し、その気圧値を基準として6段階に分割し吸引刺激提示を行った。このとき最も気圧値が強かった被験者、すなわち最も鈍感であった被験者の吸引知覚気圧値は表3-4より-420hPaであった。さらに提示した気圧値の最低値は6分割していたため-70hPaであった。よって本気圧制御機構によって-70hPaに達するまでの時間応答性がどの程度であるかを見ることで本機構の妥当性を評価することができる。図3.33より定常状態の気圧値は-70hPaであるため、さらに-70hPa減圧した-140hPaに達するまでの時間を見ると

電磁バルブの動作開始時である FET への電圧印加時から約 10 ms ほど後に -140 hPa に到達している。映像と触覚の間に生じる時間遅延の許容範囲は Miyasato らによる調査[137]から 100 ms ほどとされているため、本機構による気圧制御機構は VR 体験における触覚提示装置として十分な時間応答性を備えていると判断した。

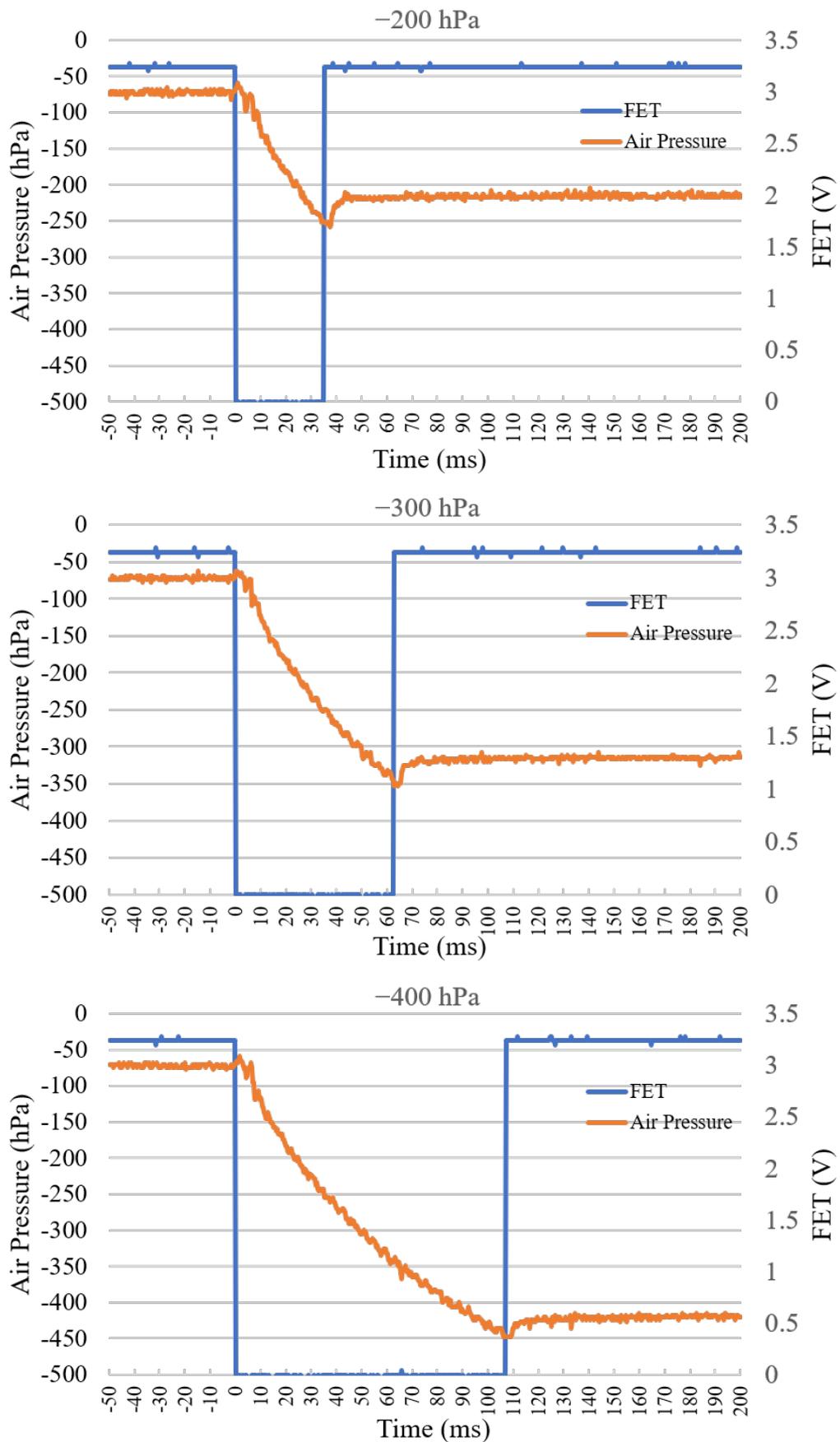


図 3.33 目標圧力（-200, -300, -400 hPa）に到達するまでの応答時間と FET 印加電圧。吸引開始時間を 0 ms として表示している。

### 3.6.3 吸引部のデザイン

これまでの実験にて用いていた 12 mm の吸引部では配置できる吸引孔の数が限られるため、HMD クッション部に装着可能な大きさかつ可能な限り大きな吸引部を作成した。吸引部は HMD に内蔵することを想定し同一面積の吸引部にて吸引孔を六方最密充填構造にて配置し、吸引直径を変更したものを作成した。吸引部の皮膚接触部は直径 25 mm の円に外接する正六角形とした。吸引孔は先の実験にて用いられていた直径 12 mm の単一吸引点と直径 10, 7, 4, 3, 2 mm の吸引孔をそれぞれ複数配置した多点吸引部を作成する。中間の 11, 9, 8, 6, 5 mm に関しては六方最密充填構造での配置を想定した場合に穴数が変化しないため除外した。また 2 mm より小さい吸引径については 1.5, 1 mm の吸引部を試作したが、十分な触覚強度が得られなかったため除外した。吸引部は光造形 3D プリンタ (Form3, FormLabs. inc) により作成し、材質は Elastic50A を使用した (図 3.34)。

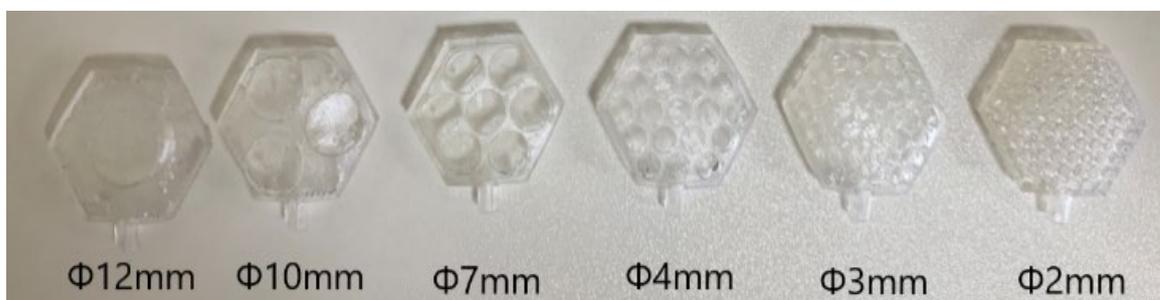


図 3.34 多点吸引部のパターン。

### 3.6.4 実験手法

吸引部形状の違いによりどのような感覚差が生じるか調査するため、各吸引部形状にて吸引触覚を感じ始める最小吸引気圧と、痛覚が生じ始める最大吸引気圧を調査した。最大吸引気圧値は吸引ポンプの制限から -500 hPa を最大とした。その後得られた吸引可能気圧範囲を 6 等分し吸引刺激を提示した。これは例えば最小吸引気圧が -50 hPa, 最大吸引気圧が -400 hPa であった場合、-50, -120, -190, -260, -330, -400 に分割するということである。それぞれの気圧値にて吸引触覚の質 (吸引と感ずるか圧覚と感ずるか) と吸引強度を回答させる。回答方法はリッカートスケールにて吸引の質 (-3: 吸引, +3 圧覚), 吸引強度 (1: とても弱い, 7: とても強い) として回答させる。

### 3.6.5 結果と考察

実験は研究室所属の 22~26 歳の男性 10 名に対して行った。実験結果を図 3.35, 表 3-5, 表 3-6 に示す。これらのデータは全被験者の平均である。図 3.35 より最小吸引気圧は吸引径によらず横ばいだが、最大吸引気圧は単一吸引点の 12 mm では -500 hPa となり装置の最大出力となった。

またこの値で痛覚が生じる被験者はほとんどいなかったため、12 mm 単一吸引部の最大吸引気圧は-500 hPa より強いと考えられる。10, 7, 4, 3 mm までは-250~-300 hPa と横ばいであるが、2 mm のときは-227 hPa と最も小さくなった。

表 3-5 より吸引気圧が弱いほど圧覚を感じやすいことがわかる。また吸引径が 12 mm の単一吸引点であるときがもっとも圧覚を感じやすいことがわかる。多点吸引の中では吸引径 2 mm が圧覚を感じやすい傾向にある。

表 3-6 より吸引気圧が強くなるほど触覚強度が上がることをわかる。ただし 12 mm の単一吸引点では最大触覚強度が 3.1 であり、他の条件と比較して弱い。これは装置が提示可能な最大吸引気圧が-500 hPa であったために十分な触覚強度が出せなかった可能性が考えられるが、より強い触覚強度を出すために吸引を強めると皮膚へ痕が残ってしまうなどのデメリットも存在する。多点吸引間で結果を比較すると、大きな違いは見られない。

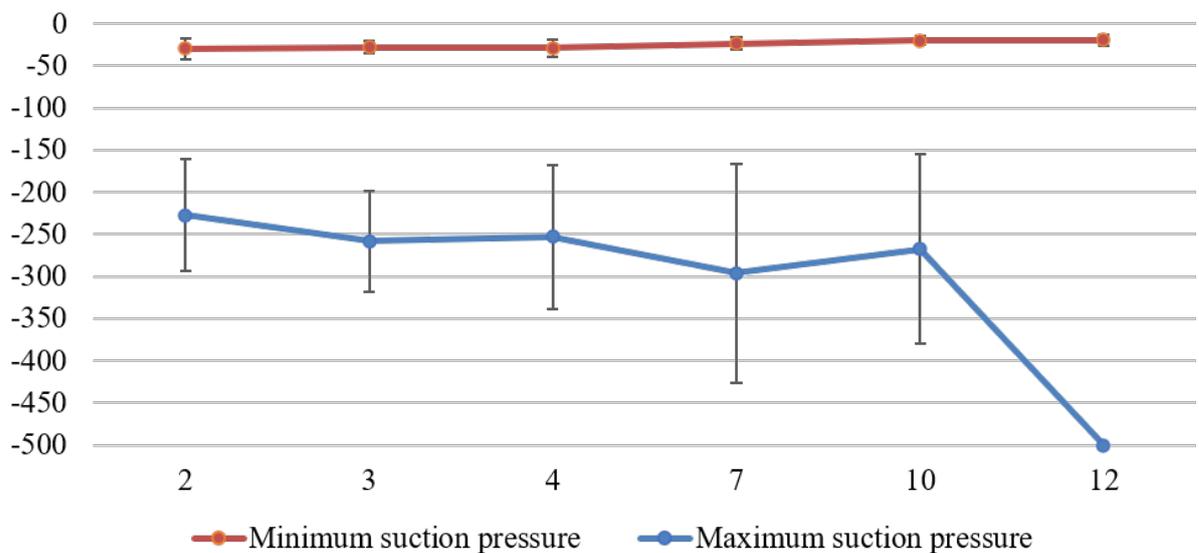


図 3.35 吸引孔の直径を変えた場合の吸引気圧の最大値と最小値。  
エラーバーは標準偏差を示す。

表 3-5 吸引径と圧力の違いによる吸引感覚と圧覚の感じ方.  
 スコアは、吸引が-3, 圧力の知覚が+3. 表中の緑色の部分が圧力の感覚, 赤色の部分が吸引  
 の感覚を表す.

		Suction pressure level					
		1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
Suction diameters (mm)	12	1.1	0.9	0.1	0	-1.1	-0.5
	10	0.9	0.3	0.3	-1	-1.2	-2.3
	7	1.2	0.9	-0.5	-1.5	-1.2	-2.3
	4	1.1	0.6	-0.3	-1.1	-1.3	-2.2
	3	0.6	0.3	-0.2	-1.5	-1.2	-1.7
	2	0.9	0.7	-0.5	-0.9	-1.5	-0.8

表 3-6 吸引径と吸引圧の違いによる触覚強度の変化.

		Suction pressure level					
		1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
Suction diameters (mm)	12	1.6	2.4	2.6	3	3.1	2.8
	10	1.4	2.9	3.4	4.5	4.8	4.4
	7	2	2.9	4	4.2	4.9	5.2
	4	1.6	2.7	3.7	4.2	4.6	5.3
	3	1.8	2.8	3.3	4.2	4.6	5.3
	2	2	2.8	3.7	3.9	4.5	5.3

表 3-5 と表 3-6 の結果より吸引の質と触覚強度の相関をグラフにすると図 3.36 のようになる.  
 この図を見ると吸引形状に依らず吸引強度が強まるにつれ吸引を感じやすくなっていることがわ  
 かる. 吸引触覚提示による VR 環境における指先触覚情報の質感提示を行うため, VR オブジェク  
 トとの接触感覚, 特に圧覚を感じやすく, 十分な触覚強度を持つ直径 2 mm の吸引径が最も適し  
 ていると考える.

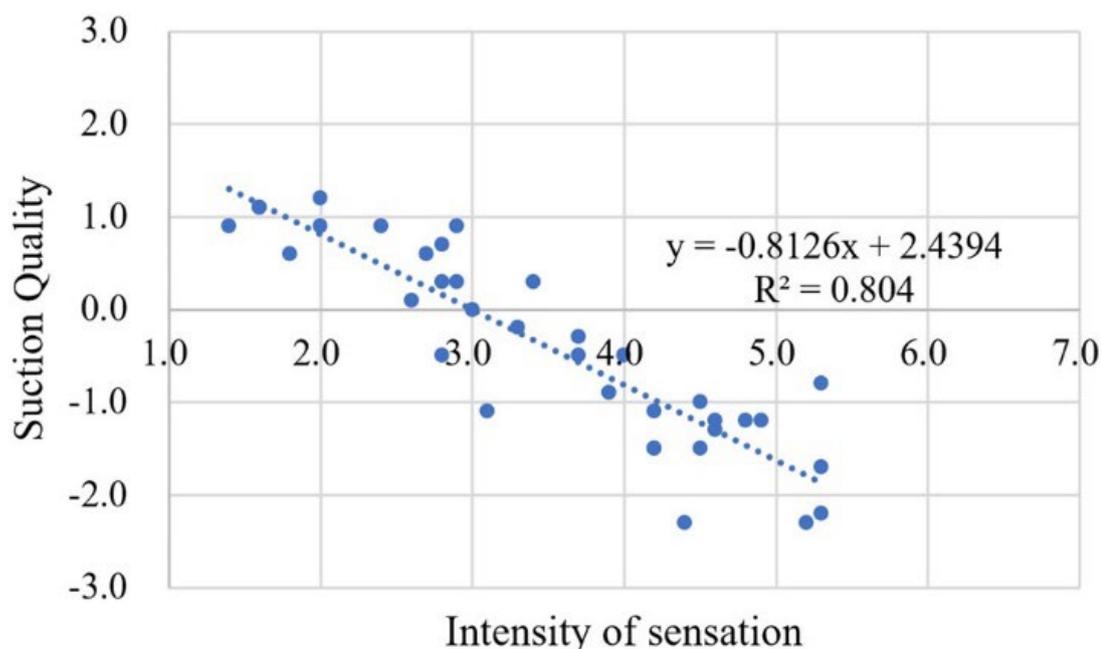


図 3.36 触覚の質（-3：吸引，+3：圧覚）と主観的触覚強度の関係。

また実験後に被験者からコメントを得たところ、「圧覚を感じる時は弱く触れられるような感覚を感じた」、「痛覚を感じる際は皮膚が小さくつままれるような感覚であった」という回答を得た。実験結果と被験者の回答を統合して考えると吸引触覚による圧覚知覚はタップ感、接触感のような弱い圧覚を提示可能であるが、より強い圧覚を提示しようとするとは明確に吸引であると知覚することがわかる。また痛覚に関しては皮膚が吸引孔に吸い込まれるため、小さくつままれるような感覚を感じることは容易に理解できる。さらに本稿で採用した吸引部素材は柔軟性に優れているため吸引により吸引部自体が変形し、皮膚に吸着し、さらに皮膚に食い込むような形状に変化したと考えられる。

### 3.7 有限要素法による皮膚構造シミュレーション

前述の実験では、どの吸引部形状においても吸引圧に応じて触覚強度が増加することが示された。その一方で 12 mm 単一孔は他の多点吸引孔と異なり、圧覚を生じやすい一方で吸引気圧を強くしても触覚強度が上昇しなかった。このように吸引部形状によって触覚の質感、強度に変化が生じるため、吸引気圧のみを調整する手法では安定して触覚提示を行うことが困難である。そこで吸引時の皮膚の様子を観測することで吸引気圧に依存せず安定した触覚提示を行うことができると考えられる。しかしながら皮膚吸引時の皮膚変形を観測するためには Saito らのように吸引部内部に皮膚の変形を観測する装置を組み込む必要がある[138]。しかしながら HMD に内蔵するという制約上、皮膚変形計測装置を組み込むことは困難である。そこで本実験では FEM シミュレーションを用いて吸引時の皮膚内部に生じる力学的エネルギー分布を解析することで吸引部形状と皮膚変形の間関係を明らかにする。またシミュレーションの結果と主観評価の結果を比較することで皮膚内部に生じる力学的エネルギー分布と触覚知覚の間関係を見出し、吸引触覚提示に最適な吸引部の作成を目指す。

### 3.7.1 シミュレーション条件

本実験ではシミュレーションソフトとして ANSYS 2020 R2 Mechanical (ANSYS, Inc.) を用いた。頬の構造は、これまでに報告されたヒトの皮膚データ[139]に基づき、表皮と真皮の厚さは、それぞれ  $45.73\ \mu\text{m}$  と  $1,040.46\ \mu\text{m}$  とした。皮下組織の厚さは仮に  $5000\ \mu\text{m}$  とし、骨との接触面は固定とした (図 3.37)。皮膚の物理パラメータは、Maeno らの研究[126]より指先の情報を引用した。密度は  $1.1 \times 10^{-6}\ \text{kg}/\text{mm}^3$ 、ポアソン比は 0.48、ヤング率は表 3-7 の通りであった。表皮の断面は、吸引部が収まる縦横  $3000\ \mu\text{m}$  の正方形とした。吸引部の形状は、主観評価実験 (3.6 節) で使用したのと同じである。吸引気圧は、これまでの実験にて用いた気圧調整機構の最大吸引気圧が  $-600 \sim -500\ \text{hPa}$  であったことから  $-600$ ,  $-500$ ,  $-400$ ,  $-300$ ,  $-200$ ,  $-100$ ,  $-50$ ,  $-10\ \text{hPa}$  と設定した。

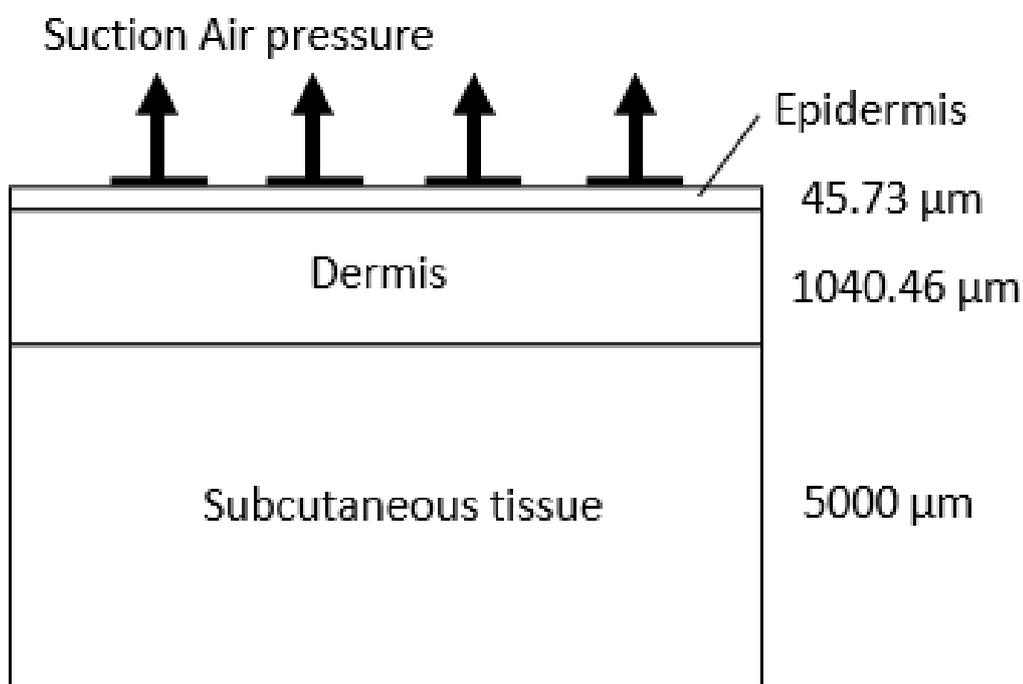


図 3.37 皮膚構造モデルの模式図。

表皮、真皮、皮下組織の厚みを示している。各組織は互いに接着しているものと定義した。シミュレーション時には表皮表面へ吸引領域の形状に基づき吸引方向へ圧力を加えた。

表 3-7 表皮、真皮、皮下組織のヤング率。

	epidermis	dermis	subcutaneous tissue
Young's modulus [MPa]	0.136	0.080	0.034

### 3.7.2 結果

図 3.38 は、各吸引形状におけるシミュレーション結果である。圧力知覚に大きな役割を果たす

メルケル細胞は皮膚の真皮に存在するため、真皮のモデルのみを示している。

図 3.39 は、各吸引形状にて観測された真皮における最大ひずみエネルギーの結果を示したものである。この結果から、一般的に吸引孔の直径が大きいくほど、同じ吸引圧でも最大ひずみエネルギーが大きくなることがわかる。しかし、吸引径が 12 mm の場合、最大歪みエネルギーは 10 mm の場合よりも小さくなっている。

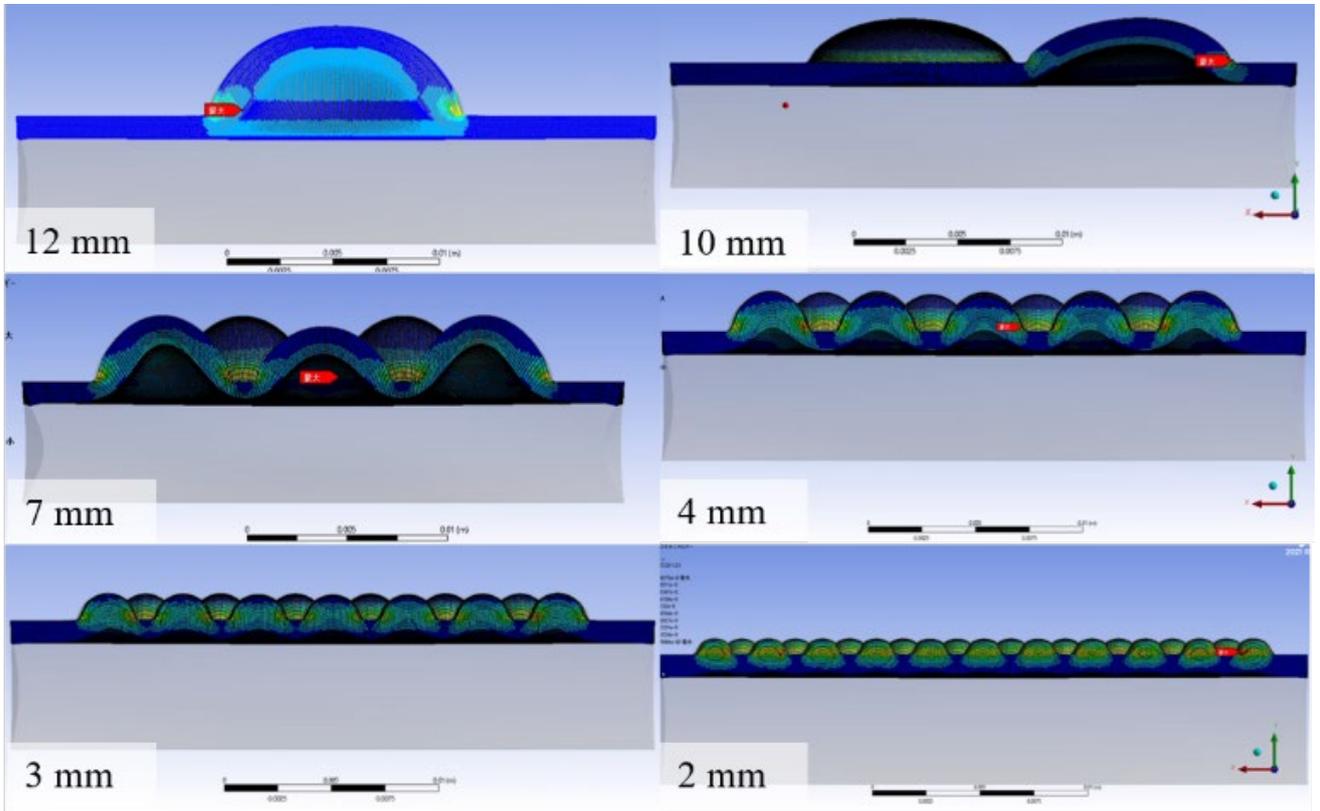


図 3.38 各吸引径における歪みエネルギーシミュレーション結果の断面図。皮膚表面の吸引点には  $-600$  hPa の圧力をかけた。図は真皮部分のみを示す。

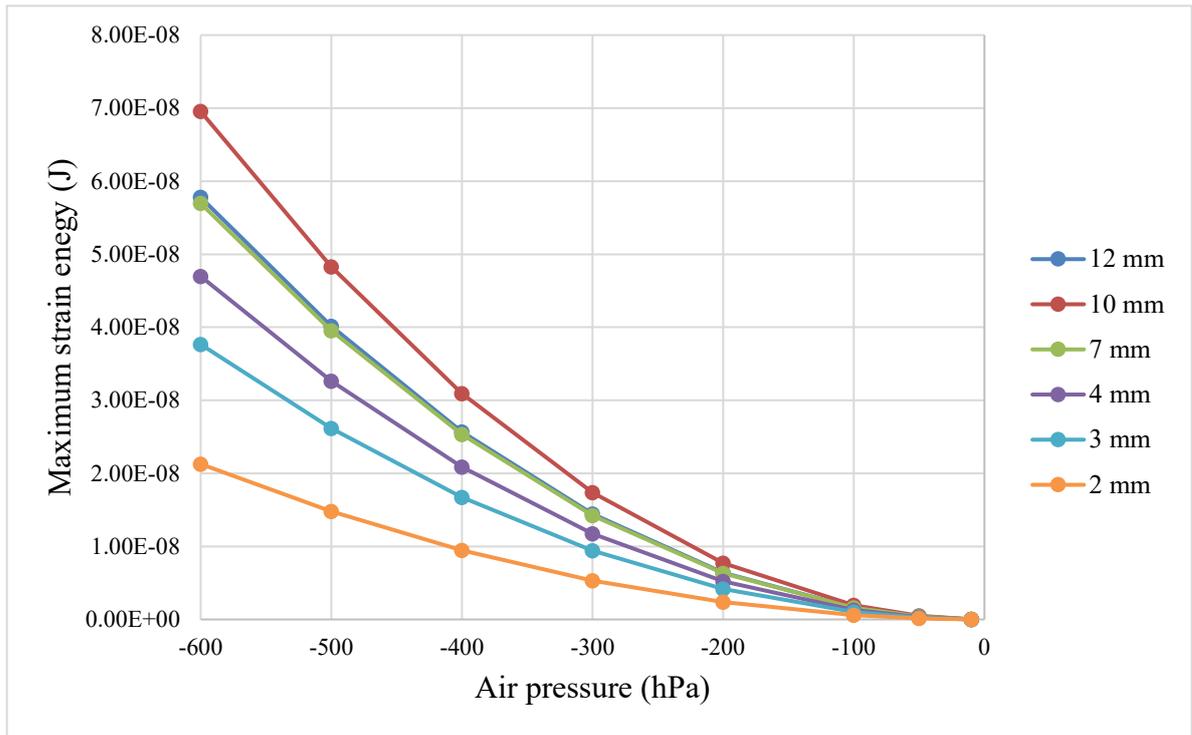


図 3.39 各吸引孔及び吸引気圧あたりの最大ひずみエネルギー。

### 3.7.3 考察

図 3.36 から、吸引孔の直径に関係なく、弱い負圧では圧迫感を、強い負圧では吸引感を与えることがわかる。このことは、皮膚吸引刺激により強い圧覚を提示することはできないという大きな制約を生む。また図 3.39 は、メルケル細胞領域（真皮）に加わる最大歪みエネルギーが、吸引径 10 mm までの範囲で、吸引径が大きくなるにつれて増加することを示している。これは、吸引孔が隣接することで表皮の変形が大きくなり、ひずみエネルギーが増加した（図 3.40 (B)）のに対し、12 mm の場合は吸引孔が 1 つであるため、変形が小さくなった（図 3.40 (A)）ためと考えることができる。

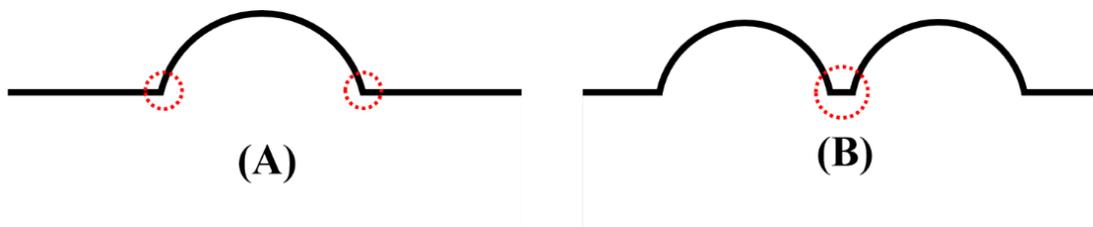


図 3.40 皮膚吸引時の変形概念図。

(A)では、穴は 1 つしかなく、吸引穴の端の変形は小さい。(B)では、吸引孔が 2 つ隣接しており、皮膚の変形が大きくなっている。

また最大ひずみエネルギーと触覚強度の間には明確な関係はない。したがって、最大ひずみエネルギーは主観的な触覚強度を説明できないようである。そこで、最大ひずみエネルギーではなく、ひずみエネルギーの分布（積分値）が触覚強度に影響を与えているのではないかと推論した。吸引孔が小さいと、穴の数だけ皮膚と接触する円周の長さが全体的に大きくなる。例えば、直径 2

mm の吸引孔では 91 個の穴が開いているのに対し、直径 10 mm の吸引孔では 3 個の穴しか開いていない。穴径 2 mm の場合の周長の合計は 571 mm ( $2.0 \times 3.14 \times 91$ ) であるのに対し、穴径 10 mm の場合は 94.2 mm ( $10.0 \times 3.14 \times 3$ ) である。最大ひずみエネルギーは 10 mm 穴の方が 3~4 倍大きいにもかかわらず、主観的な強さは同程度であった。円周付近、すなわち吸引孔の縁において最も皮膚の変形が大きくなることを踏まえると円周の長さが長いほど触覚強度が強まると考えられる。このことは 12 mm の吸引孔で主観的強度が小さかった理由として説明できる。12 mm の吸引孔は穴が 1 つしかなく、円周の総和は 18.84 mm ( $6.0 \times 3.14 \times 1$ ) である。ひずみエネルギーの最大値と各吸引孔の総円周長をかけ合わせたグラフを図 3.41 に示す。この結果を見ると直径 12 mm の吸引孔の場合に最もひずみエネルギーの総量は小さくなっており主観評価結果と一致する。

なお、直径 1mm の吸引部ではより高密度に吸引孔を配置可能ではあるが、実際には十分な触覚強度を提示することができなかった。これは直径が小さすぎたため吸引時に生じる皮膚の変形量が小さく、十分なひずみエネルギーが生じなかったためではないかと考えられる。またこのことから、触覚知覚の閾値として最低限必要な皮膚変形量、すなわちひずみエネルギーの閾値が存在しており、1mm 直径の場合はその閾値を超えることができなかったと考えられる。これは他の吸引径の場合にも同様であり、皮膚内部に生じたひずみエネルギーのうち触覚知覚に反映されるひずみエネルギー量とそうでない大きさのエネルギーが分布していると推察される。よって、より詳細に触覚知覚強度とひずみエネルギーの関係性を導き出すためには、機械受容器が反応する最低ひずみエネルギー量を明らかにし、触覚知覚に影響しているひずみエネルギーの総量を計測することが重要であると考えられる。

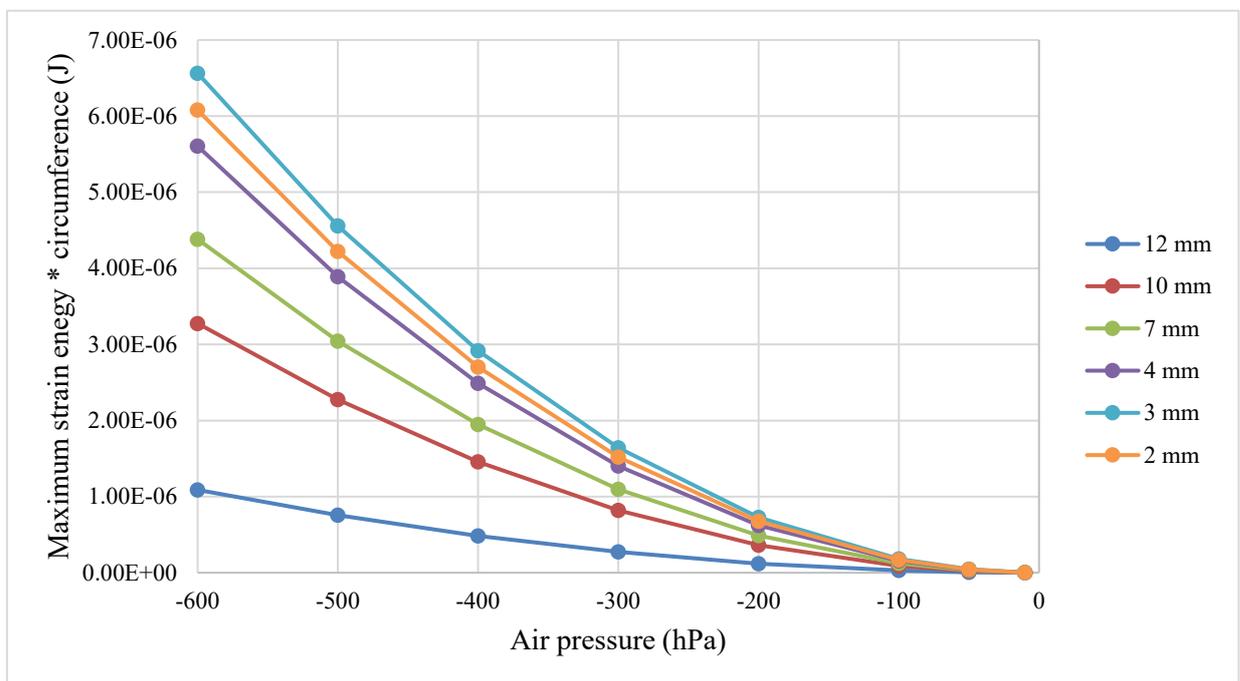


図 3.41 各吸引孔及び吸引気圧あたりの最大ひずみエネルギーと円周長の積。

### 3.7.4 結論

本節及び前節において吸引部に多数の吸引孔を開けることで吸引触覚提示手法に適した吸引部の設計が行えるのではないかと仮定し、異なる直径の吸引孔から構成された吸引部と異なる吸引

気圧の組み合わせによる触覚の質及び触覚強度を調査した。本節では FEM シミュレーションを用いて皮膚に生じる力学的エネルギーの解析を行い、多点吸引孔では単孔よりも最大ひずみエネルギーが大きくなることが示唆された。これは吸引孔が隣接することにより皮膚変形量が大きくなり同じ吸引気圧でも強い触覚知覚を生じさせることができると考えられる。

さらに吸引孔の縁が最も皮膚変形が大きくなり、ひずみエネルギーも大きくなることから吸引孔の縁の長さに着目した。その結果、吸引孔の総円周長と最大ひずみエネルギーの積に主観的触覚強度との関連が示唆された。一方圧覚錯覚に関しては触覚強度に依存することがわかり、吸引部形状との相関はわずかであった。しかしながら本研究では VR 環境における接触情報の提示を目的としており、より強力な圧覚提示は対象外とするため微弱な圧覚提示であっても十分 VR 体験に貢献できると考えられる。

これらより吸引触覚提示のための吸引部形状の設計において隣接する吸引孔の中心間距離は重要な設計パラメータの 1 つであることが明らかになった。さらに、穴の直径が小さい場合、最大ひずみエネルギーは小さくなるが複数の吸引孔を設け、総円周長を確保することで十分な触覚強度を提示可能であることがわかった。これらより多数の吸引孔を密集して配置した場合、単孔の場合に比べ吸引気圧が弱くとも十分な触覚強度が期待され、皮膚を傷つけずに主観的触覚強度を保つことができるほか、吸引気圧制御装置の開発においても小型軽量の吸引源を採用できるなどの利点が見いだせる。

## 3.8 試作したアプリケーションおよびデモ展示

本提案は HMD を用いた VR 体験への触覚情報の付与を目的としており既存 VR 体験への応用が期待される。そこで本提案を用いたデモコンテンツを試作し、体験のフィードバックを得ることで応用への可能性を評価する。

### 3.8.1 10 箇所吸引点を持つ Haptopus の展示

インタラクション 2018 にて 10 点の吸引刺激点を内蔵した Haptopus を展示した。Haptopus とは Haptic (触覚) と Octopus (蛸) を組み合わせた私の造語であり、蛸の吸盤による吸引と空気吸引による吸引をかけた名前となっている。以下本提案システムを用いたコンテンツを Haptopus と呼称する。

本展示においては吸引気圧の調整は行わず、吸引源と吸引部を 3 方向バルブにて接続し吸引のオンとオフのみを切り替える仕組みであった。この際に用意したコンテンツは VR 空間にて自由にオブジェクトに触れることができ、机やノートパソコン、筆記具やサボテンなどを用意した 3D 空間を Unity にて作成し、使用した。

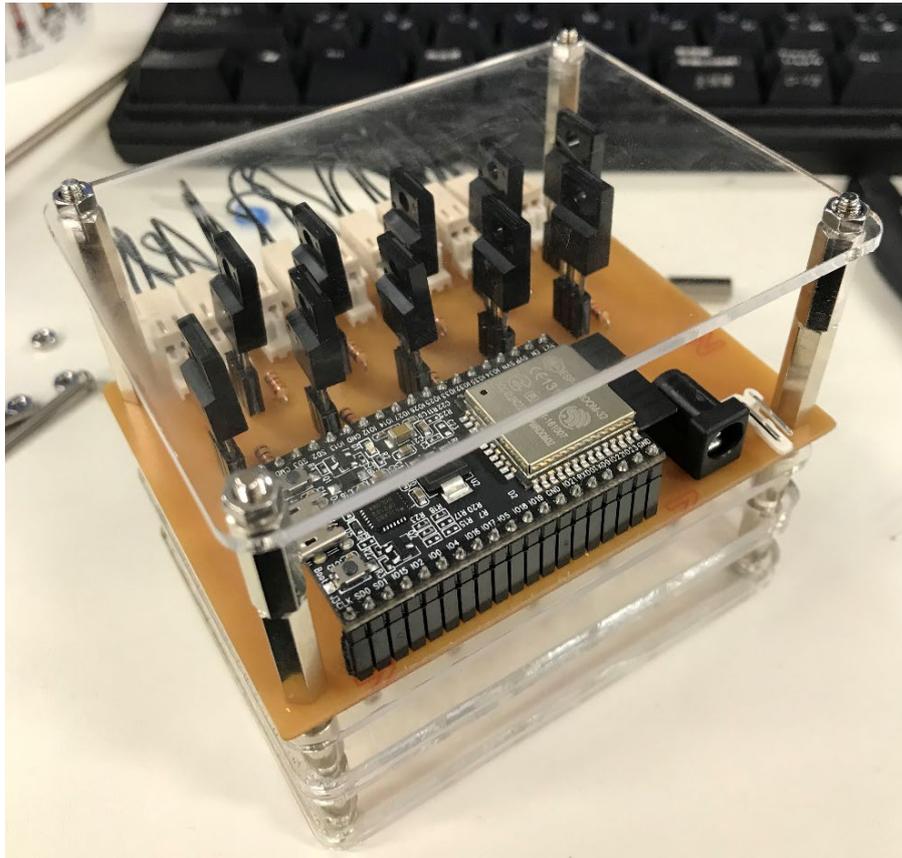


図 3.42 10点吸引刺激制御基板.

FET と電磁弁をそれぞれ10個使用し吸引のタイミングをPCより受け取りマイコンで制御する。

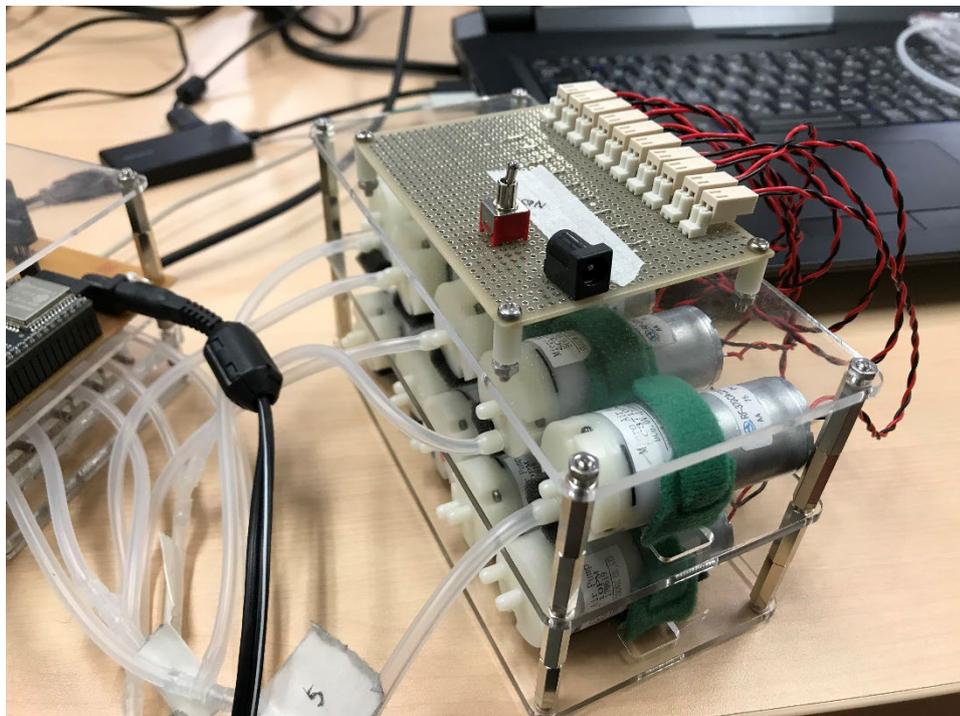


図 3.43 吸引ポンプ.

10点の吸引を行うために10個の吸引ポンプを用意した。



図 3.44 インタラクション 2018 における Haptopus 体験の様子。

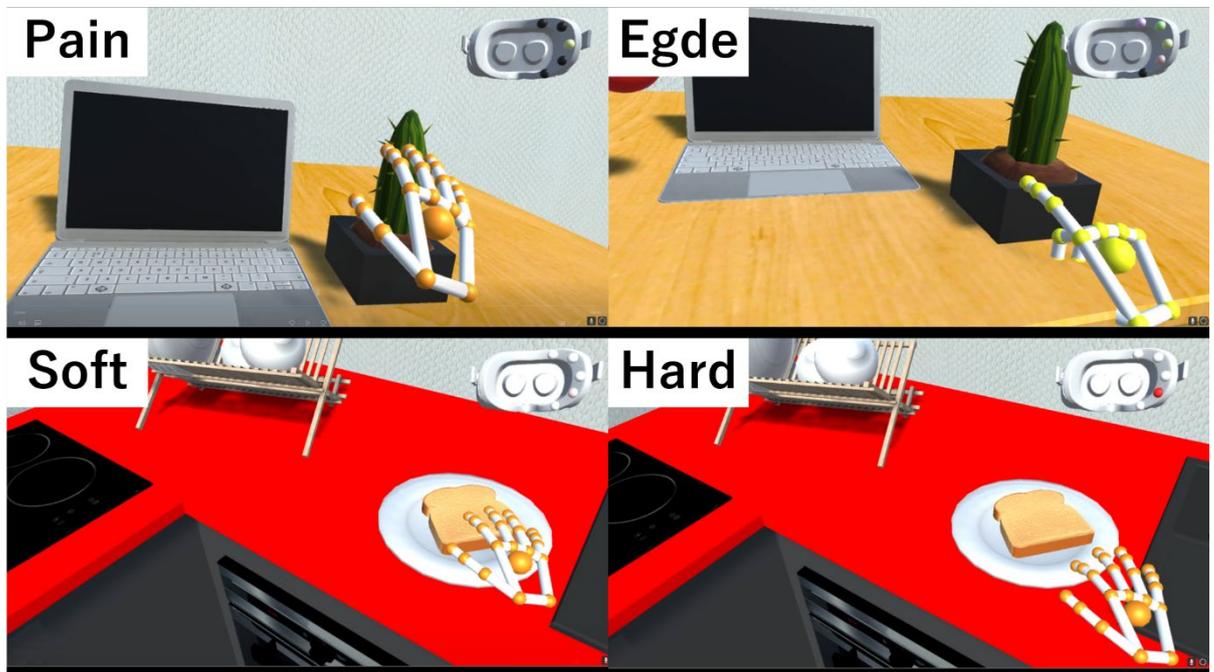


図 3.45 デモコンテンツの例。

(左上：強い吸引による痛覚提示，右上：指先触覚反応点と顔の吸引箇所のマッピングを調整することで細かいエッジ提示，左下および右下：吸引気圧を調整することで接触物体の硬軟感を提示，実際の展示では接触感の提示のみ行った。)

体験の結果、接触感があるといった感想が多く得られた。一方で10本指の触覚をすべて感じることができる人はおらず、吸引接触部の密着が完璧でなく空気が漏れてしまうことが原因であった。これは頭部形状に個人差があるためHMDのクッション部と皮膚との間に隙間ができてしまう人がいることに起因した。また吸引気圧の調整を実装していなかったため赤く吸引跡が残ってしまう人がいた。本展示時点における装置は3.2.1項における実験後に開発したものである。

### 3.8.2 吸引箇所限定と改良したコンテンツの展示

UIST2018, AsiaHaptics2018, SIGGRAPH Asia2018にて改良を行ったHaptopusの展示を行った。改良点として吸引箇所を4点に限定し密着性を向上させ、体験するVRコンテンツの種類を増やした。インタラクション2018時点ではVR空間の物体に触れるだけであったが、触れることで音や映像が変化するインタラクティブ性をもたせ、接触のタイミングをより強く認識させたほか、バーチャルオブジェクトを把持できるようにするなどユーザーの行動可能な動作を増やした。

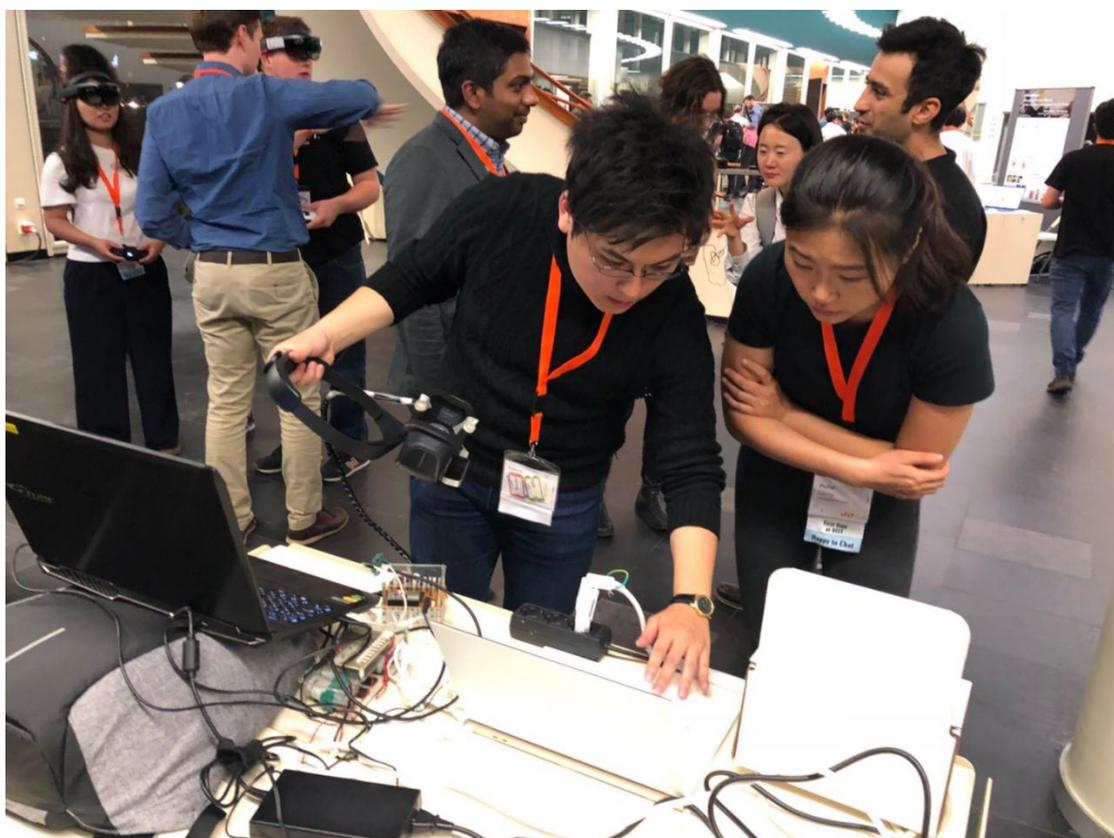


図 3.46 UIST2018におけるHaptopus展示の様子。



図 3.47 改良した様々な物体に触れることができるコンテンツ。



図 3.48 バーチャル空間内で楽器の演奏が可能なコンテンツ。  
鍵盤をたたく感覚が触覚として感じられる。



図 3.49 バーチャル空間内でピアノの打鍵が楽しめるコンテンツ。  
指で鍵盤を叩くと鍵盤が動き、音が鳴る。

体験後の感想として接触感が感じられるというものの他に純粋なコンテンツの面白さを評価する意見が得られた。また、10箇所吸引点を搭載していたものより吸引を感じられない、という意見が少なくなった。本展示時点における装置は3.3節における実験後に開発したものである。

### 3.8.3 複数吸引点と吸引気圧調整を実装した Haptopus の展示

第24回VR学会大会にて複数の吸引点をもつ接触部を試作し、展示を行った。複数吸引点を使った吸引は先行研究にて用いられており、単一の吸引点よりも低い吸引気圧で触覚の知覚が可能で圧覚の生起もしやすい。また、吸引気圧の調整を行ったことでこれまで課題であった吸引跡が残る問題もある程度解決できた。本展示時点における装置は3.5節での実験後に開発したものである。



図 3.50 複数吸引点を持つ接触部を搭載した Haptopus.  
実際の展示では吸引箇所は両眼の上と下の4箇所制限した。

体験後の感想として圧覚を感じた、という意見が従来の展示より多く見られた。また吸引気圧が適切であったという意見を得られた。

### 3.9 結論

本章では HMD に内蔵し、目元周辺の皮膚へ吸引触覚を提示する装置開発を行った。そのために必要な吸引気圧、吸引径の調査を行い多点吸引部が主観的評価においてより弱いポンプでも十分な触覚強度を生じさせることができることが明らかになった。また吸引気圧の調整により吸引のみならず圧覚の感覚や、ユーザーの動きに合わせて動的に気圧を制御することでバーチャルオブジェクトの硬柔感といった映像ではわからない材質感を提示可能であることが示唆された。

これらの結果は実験の都合上、視覚、聴覚刺激による影響を極力排したため触覚の解釈がユーザーに委ねられており個人差が大きい結果でもあった。特に硬柔感においては記号的な吸引触覚強度を手がかりに回答した被験者もありユーザーの認識を誘導するため複数の感覚を統合し触覚を明示的に知覚させる手法が有効であると考えられる。

さらに多点吸引孔をもつ吸引部を設計し、単一吸引径の場合との触覚知覚の変化を調査した。調査には主観評価による触覚刺激が吸引か圧覚かの評価と触覚強度の評価を実施した。その結果多点吸引孔では吸引気圧が弱くとも強い触覚を提示することが可能であることが示された。またこの結果を皮膚構造と触覚受容器の配置の観点から考察することで最適な吸引部設計を行うために有限要素法によるシミュレーションを行った。シミュレーションでは皮膚変形に敏感に反応するメルケル細胞が存在する領域にて生じるひずみエネルギーを観測することで主観的触覚強度との関連を見出し、吸引孔の縁の総長を考慮した設計をすることで吸引気圧制御の観点から効率的に触覚を提示できることを明らかにした。

これらの結果から，VR 体験における指先触覚情報を吸引触覚刺激にて顔面に提示する際は吸引孔の縁の総長が大きくなるように吸引部を設計し，軽く触れる，タップするような触覚表現を実装することが効果的であると結論付ける．

本章では特に VR 環境における指先触覚情報を提示するため接触感を知覚するために必要な圧覚を提示すること，指先の微細な感覚を提示するための高密度な触覚提示を行うことを目的とし顔面における吸引触覚提示機構の開発を行った．その結果圧覚を伴う触覚提示を HMD 内部に実装することに成功した．一方で高密度な触覚提示の実現には至っていないが，微小な吸引孔を持つ吸引部の設計に成功しており，吸引部内の各吸引孔にて独立して気圧を制御可能な制御機構を開発することで高密度化は容易である．そのため本研究においては吸引触覚提示による接触感提示に必要な圧覚提示及び高密度化の原理検証を終えたとして目的を達成したとする．

## 第4章

# 異部位触覚提示による VR 体験の質的向上

本章では VR 環境における指先触覚情報を顔面へ提示することで VR 体験にどのような影響を与えるか調査する。第 3 章にて HMD に内蔵する触覚提示手法として吸引触覚提示手法が確立されたため提案システムを用いて異部位触覚提示が VR 体験の質を向上させるかどうか検証する。

そのためにまず異部位への触覚提示時における VR 体験への影響を調査する。すなわち、ユーザーが VR 環境にて指先でバーチャルオブジェクトに触れ、顔面に触覚を感じた場合、ユーザーはその触覚を自身の指が得た感覚だと解釈可能か調査する。ここで HMD を通して映像として得られた感覚と身体への触覚刺激により得られた感覚の一致性を確認する手法としてバーチャルハンド錯覚[140]-[143]が存在する。バーチャルハンド錯覚は VR 環境におけるバーチャルな腕を自身の腕だと感じる感覚を腕への所有感がある状態としており、この所有感の生起を確認することでユーザーの認識上の感覚と映像により得られた感覚の一致性を確認することができる。よって本章における実験ではバーチャルハンド錯覚を用いることで異部位触覚提示時にユーザーがその触覚を自身が得た感覚として認識しているかどうかを検証する。

続いて異部位触覚提示によって VR 体験の質の向上がなされたか調査する実験を行う。本章における VR 体験の質とは VR 体験中に生じるあらゆる感覚を総合した結果ユーザーが感じる体験の心地よさを指す。異部位への触覚提示は通常感じられる触覚情報とは矛盾した感覚であるためユーザーに混乱を生じさせ、VR 体験中の操作性やコンテンツに対する楽しさなど様々な要因に影響を及ぼすと考えられる。よって、これら種々の効果を考慮した結果の感覚として VR 体験の質をユーザー自身に評価させ、体験時のメリット、デメリットの両者を反映した総合的な主観評価指標として取り扱うことを目的としている。

### 4.1 異部位触覚提示によるバーチャルハンド錯覚の生起検証実験

#### 4.1.1 バーチャルハンド錯覚に関する関連研究

ラバーハンド錯覚とは仕切りにより自身の片腕を視界から遮蔽し、代わりにゴムの腕を見せながら自身の腕とゴムの腕に同時に触覚刺激を提示されると眼前のゴムの腕をまるで自身の腕のように感じる現象である[144], [145]。このような身体を自身のものであると感じる感覚は身体所有感と呼ばれ、特に VR 環境におけるバーチャルハンドに対して所有感を生起する現象は「バーチャルハンド錯覚」として区別される[140]-[143]。

バーチャルハンド錯覚を議論するにあたり物理環境における身体とバーチャル環境における身体の関係について整理する必要がある。Slater らはバーチャル環境に対する実在感を「そこに自身

が存在している感覚」という意味において presence（以下プレゼンス）と表現した[146]. プレゼンスは場所の錯覚（place illusion, PI）ともっともらしさの錯覚（plausibility illusion, Psi）により構成される. これらはバーチャル環境における空間的座標の整合性とバーチャル環境にて発生する事象と自身の行為の整合性である. 特に場所の錯覚はバーチャル環境における身体から影響を受け, 身体との整合性が損なわれることで実在感が低下する. バーチャルハンド錯覚はバーチャルな身体に対する整合性を所有感として感じており[147], [148], 実在感を保つ感覚の一つであると考えられる. すなわちバーチャルハンド錯覚の有無を確認することで実在感が維持されているか否かを判断することができる.

バーチャルハンド錯覚の計測において, バーチャルハンド錯覚の生起には運動の同期性や触覚刺激タイミングの同期が重要とされている. また表示するバーチャルハンドの自身の腕との類似性は形状や色が人体に近いものであるほどよいとされるが, 3D スキャン等を用いて自身の腕の特徴を持つバーチャル腕を利用した場合と 3D モデリングにより作成された平均的な腕ではバーチャルハンド錯覚の生起度合いに変化はなかった[149]. このことから本研究においても 3D モデリングにより生成された腕を利用してバーチャルハンド錯覚の生起を確認する.

#### 4.1.2 実験目的

本実験はバーチャル環境にて触覚提示部位を変化させることで所有感が変わるかどうかを確認し, 異部位触覚提示時における VR 体験のプレゼンスにあたる影響について考察する.

#### 4.1.3 実験装置と実験手法

触覚提示に使用する指先吸引部は縦 16 mm, 横 10 mm の長方形内に直径 2 mm の吸引孔を中心感距離 3 mm にて 15 個配置した. 第 3 章において複数吸引孔を持つ吸引部にて皮膚を吸引することで十分な触覚強度を提示できることが明らかになったため, この形状を採用した. 頬吸引部は直径 21 mm の円に外接する 6 角形内に直径 2 mm の孔を中心感距離 2.5 mm にて六方最密充填構造にて 37 個配置した. また密閉性を高めるため直径 18.5 mm, 幅 1 mm の円形のエッジを作成した. 吸引部の詳細な寸法と吸引孔の配置を図 4.1 に示す. 吸引気圧制御システムは 3.6 節にて用いたものを利用する.

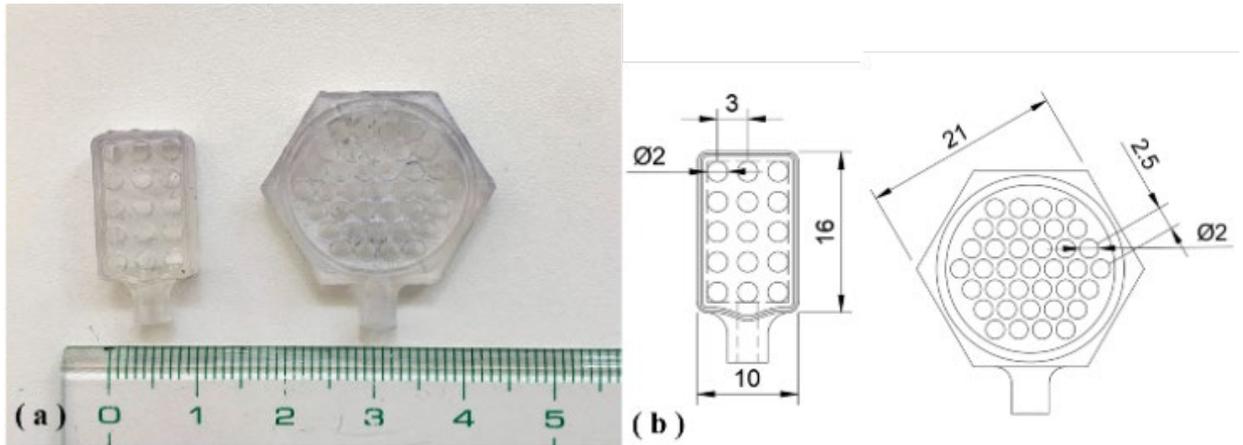


図 4.1 吸引部形状.

(a: 吸引部の写真, 左側は指先用, 右側は頬用), (b: 吸引部図面, 左側は指先用, 右側は頬用, 単位は mm)

実験環境として用いる 3D 環境を Unity にて作成した. 3D 環境には机が存在し, 被験者は机の前に座る. 被験者の正中線から右に 30 cm の位置にバーチャルな腕を配置した. 被験者は実際の椅子に座り, 実際の机の上にバーチャルな腕の位置に合うように自身の腕を置くよう指示された (図 4.2).

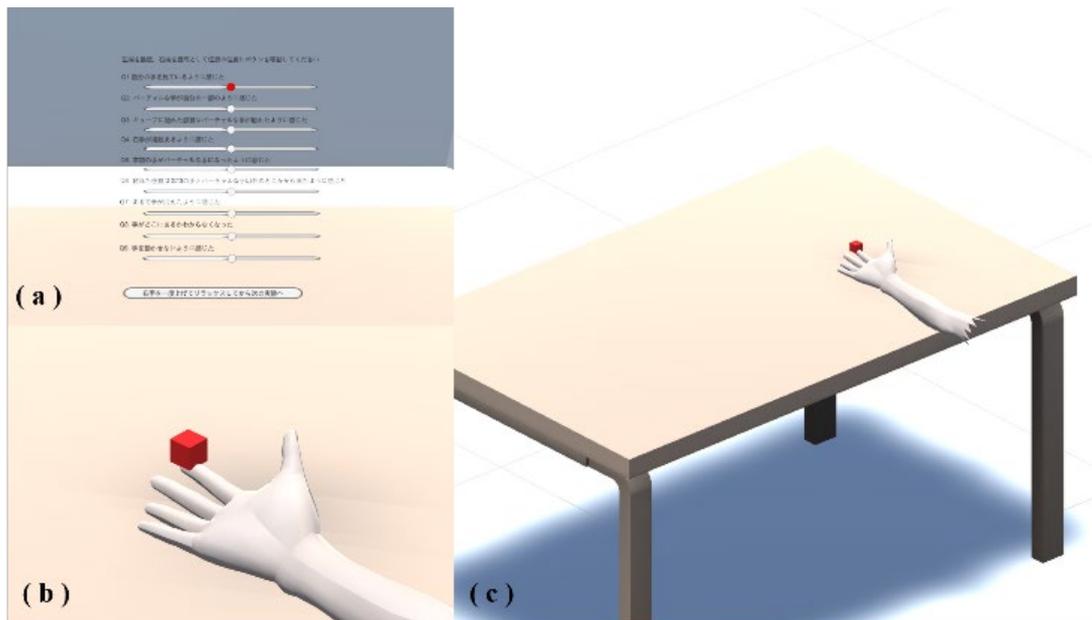


図 4.2 VR 環境の実験場.

(a) は質問項目の回答表. (b) は 2 秒毎に上下を繰り返し, 被験者の右手人差し指に触れる赤いキューブ. (c) は実験環境全体図を表す.

VR 環境を体験させるために HMD (Meta Quest 2, Meta. inc) を用いた. 指先と頬へ吸引部を装着し, 実験中は聴覚刺激を遮断するためノイズキャンセリングヘッドホン装着しピンクノイズを聞かせた (図 4.3).



図 4.3 バーチャルハンド実験の様子。

被験者は右手を机の上に置き、HMDにより見えているバーチャルハンドと同じ位置となるよう調整した。また左手でテンキーを操作することで回答を入力した。

実験条件は右手人差し指に吸引刺激を提示する場合、右頬に吸引刺激を提示する場合、触覚刺激を提示しない場合の3種類を用意し、それぞれの条件に対しバーチャルな腕への所有感を感じるか確認する質問を行った。各刺激は60秒間提示し、次の条件を実施する前に一度腕を上げ所有感をリセットさせた。所有感を確認する質問項目は過去の研究[143]を参照し、所有感を確認する3つの質問と比較対象とする意味のない質問を3つ、非所有感を確認する3つの質問を用意した[143] (表 4-1)。それぞれの質問をVAS (Visual Analog Scale) にてVR環境内にて回答させた。VASは-100から+100までの範囲で結果を取得した。なお±100という値はUnityを使った環境構築のしやすさから内部的に設定しているものであり、被験者に数値は表示していないため実験結果に影響はない。被験者には-100を「まったくない」、+100を「とてもそう感じる」として回答するよう指示した。被験者は左手でテンキーを使い回答を入力した。指先と頬に提示する吸引刺激は実験前に気圧の調整を被験者自身の手で行った。吸引強度の目安として最低限触覚を知覚可能な気圧から本人が快適だと思える気圧、特に指先に触れる赤いオブジェクトの映像として適当だと感じられる気圧を目安に設定させた。被験者は12人、年齢は21~27歳、平均23.7歳、標準偏差は1.65歳、男性が11名、女性が1名であった。各実験条件にて2回ずつ刺激を提示し、うち1回目は練習とし、2回目のデータのみ結果として使用した。

表 4-1 所有感および非所有感を確認する回答項目[143].

所有感	Q1. 自分の手を見ていると感じた Q2. バーチャルな手やオブジェクトが自分の一部のように感じた Q3. ボールに触れた感覚はバーチャルな手やオブジェクトに触れたように感じた
比較条件	Q4. 右手が複数あるように感じた Q5. 本物の手がバーチャルな手になったように感じた Q6. 触れた感覚は本物の手とバーチャルな手の間のどこかから来たように感じた
非所有感	Q7. まるで手が消えたように感じた Q8. 手がどこにあるかわからなくなった Q9. 手を動かさないように感じた

#### 4.1.4 実験結果

各被験者の吸引気圧値を表 4-2 に示す。また VAS の結果を図 4.4 に示す。図 4.4 において  $x$  は平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示す。VAS の結果を解析するため ART-ANOVA を使用した。多重比較の際にはボンフェローニ補正を行った。その結果 Q6 においての Stimulate 条件と Check 条件間 ( $p=0.019$ ) と Finger 条件と Check 条件間 ( $p=0.025$ ) に有意差がみられた。また所有感 (Ownership, Q1~Q3)、比較質問 (Control, Q4~Q6) を確認する質問を刺激条件ごとに比較することで各刺激において所有感を正しく確認することができたか確認した。ただし Q6 においては図 4.4 より有意に他の条件より高いスコアが得られたことがわかる。これは異部位触覚提示という性質上「触覚刺激はリアルハンドとバーチャルハンド以外のところから来た」という質問に対し回答しやすかったものと考えられる。通常のバーチャルハンド錯覚実験においては生じない感覚が生じていたため Q6 を除外し Q4 と Q5 の結果を平均したものを Control 質問とし、Q1~Q3 の結果を平均したものを Ownership として図 4.5 に示す。ART-ANOVA の後にボンフェローニの補正をかけた多重比較による解析の結果、すべての条件において有意差が確認され (No Haptics ( $p=0.0054$ ), Finger ( $p<0.001$ ), Check ( $p<0.001$ )), すべての刺激条件において所有感が生じていたことが確認された。

表 4-2 被験者ごとの頬と指先の吸引気圧.

Participants	Cheek (hPa)	Finger (hPa)
A	-276	-460
B	-285	-269
C	-117	-84
D	-145	-143
E	-110	-242
F	-487	-395
G	-177	-359
H	-247	-239
I	-485	-308
J	-326	-325
K	-364	-279
L	-172	-234

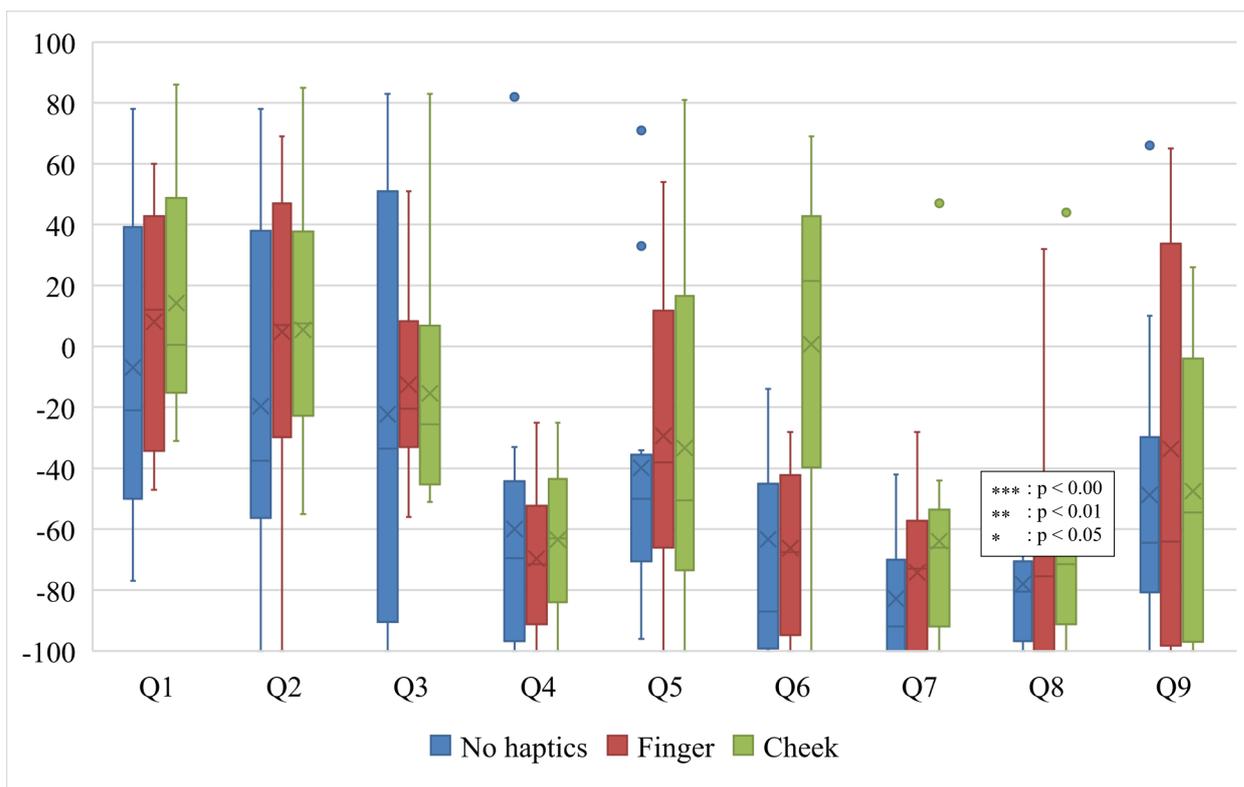


図 4.4 所有感に関するアンケートのスコア (-100/+100)。

箱ひげ図は第1四分位と第3四分位を表し、箱の中央の線は中央値を、下と上のひげは第1四分位マイナス1.5×IQRと第3四分位プラス1.5×IQRを表す。

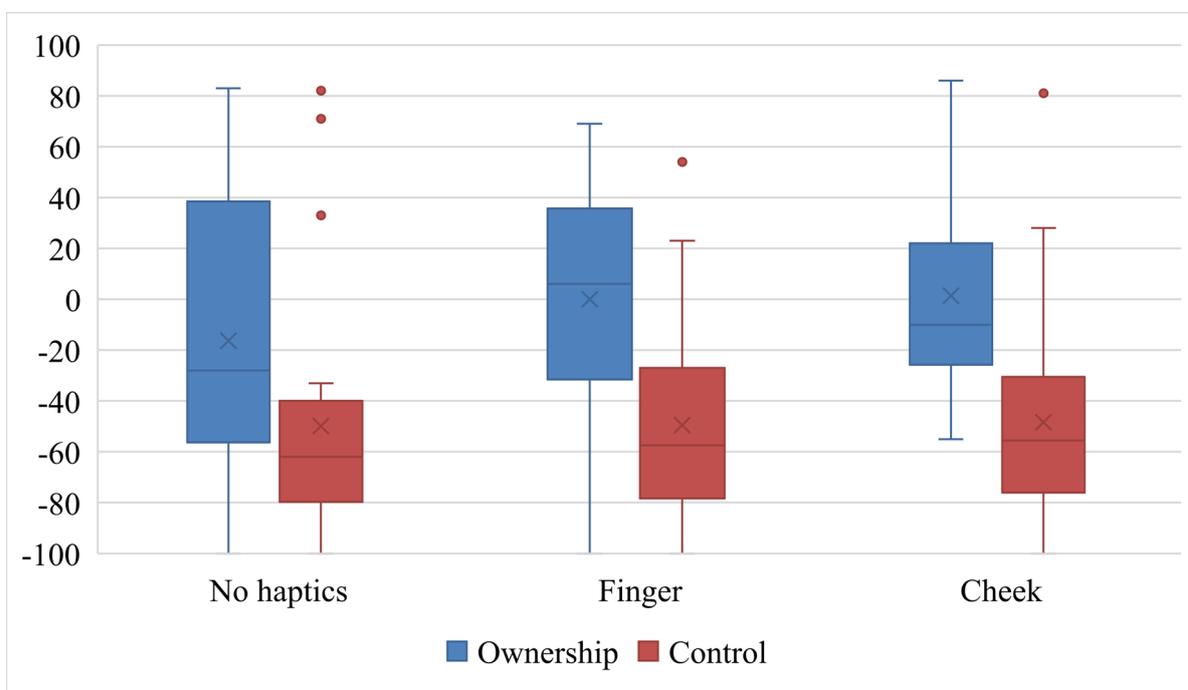


図 4.5 アンケートスコアのうち所有感と比較条件のスコア (-100/+100)。

所有感は Q1 から Q3 までの結果をまとめたスコア，比較条件は Q5 と Q6 の結果をまとめたスコアである。箱ひげ図は第1四分位と第3四分位を表し、箱の中央の線は中央値を，上下の線は第1四分位マイナス1.5×IQRと第3四分位プラス1.5×IQRを表している。

#### 4.1.5 考察

図 4.4 の分析より所有感を確認する Q1~Q3 の質問項目において刺激条件による有意差は確認できなかった。このことより腕を動かさない状態における腕に対する所有感は触覚刺激によらず生じ、また映像と異なる部位への触覚刺激は所有感を低減させないことが示唆される。

通常であれば指先へ触覚刺激を提示する映像を見ながら実際に指先へ触覚刺激を行う条件が最も理解しやすく、所有感を感じられるはずである。しかしながら Finger 条件の所有感と No Haptics 条件の所有感に有意差はなかった。従来のバーチャルハンド錯覚実験の条件においても物体が接触する映像に合わせ振動刺激を提示することで所有感が生起することが明らかになっているが [143]、今回用いた吸引触覚手法は明確に物体が触れる、つまり圧覚の感覚であったのに対し吸引という逆方向の力提示を感じてしまったため違和感が大きくなってしまったのではないかと考える。

一方 Check 条件にて所有感が低減しなかった要因を考察する。まずバーチャルハンド錯覚の生起条件として重要である時間同期性について考える。Finger 条件と Check 条件はどちらも映像と同期した刺激タイミング、刺激時間で吸引刺激を提示しており、時間同期性という観点からは条件を満たしていた。次に吸引刺激強度については頬と指先で被験者が理想的だと感じる強度を選択させたため知覚上等しいと考える。よって考察すべき要因は刺激提示部位が異なることのみである。ここで異部位への触覚刺激時に被験者からのコメントで「吸引感覚と指先に物体が押される感覚に違和感が生じた。むしろ頬への刺激は場所が違うので映像と異なる触覚であっても自然に感じた」というものがあつた。本実験ではバーチャルな指先に対しバーチャルオブジェクトが押し付けられる映像が提示されていたが実際に提示される触覚情報としては吸引刺激であったため映像より類推される触覚と実際に感じた触覚の間に大きな差が生じていたことが考えられる。また頬への吸引刺激の際に自然に感じた原因として本来触覚を感じるはずの指先ではなく頬への触覚提示であったため、「類推される触覚と実際に知覚される触覚の質感は異なるはずだ」というバイアスが被験者の中に生まれていたために自然に感じたのではないかと考えられる。その結果、条件の同じ刺激タイミングを主な手がかりとして所有感を感じた場合に Check 条件の方が Finger 条件より所有感を感じやすかったのではないかと考えられる。

また触覚刺激を行わなかった No Haptics 条件においても所有感が生じた原因としてバーチャルな腕と本来の腕の位置が一致していたため所有感を生じやすかったものと考えられる。これは触覚刺激のない映像のみからでも所有感が生じるという過去の研究結果とも一致する [140]。

本研究のリミテーションとして頬への刺激と同じ触覚刺激を指に対しても提示することを優先したため指への触覚情報が不自然なものになってしまったことは考慮する必要がある。しかしながら今回の実験により異部位触覚提示により大幅に所有感が下がるということはない。これにより VR 体験においてユーザーがアバターを操作し、環境とのインタラクションを行うにあたり異部位触覚提示はユーザーの操作感を低下させることはないと考えられる。

## 4.2 能動条件下における異部位触覚提示がバーチャルハンド錯覚の生起に与える影響調査実験

### 4.2.1 実験目的

4.1 節にてバーチャルハンド錯覚が生じるかどうかを古典的なラバーバンド条件同様に動かない腕に対して所有感が生じるか調査した。この際に異部位触覚提示を行った結果、指先に触覚を提示した条件と変わらない所有感が生じており、異部位触覚提示によりアバターに対する自己身体感は損なわれないことが明らかになった。しかしながら通常の VR 体験では能動的に身体を用いてバーチャルオブジェクトとのインタラクションを行う。そこで能動的に腕を動かし VR 体験を行った際の触覚提示部位の差による VR 体験の質的变化を調査する。

### 4.2.2 実験装置と実験手法

4.1 節におけるバーチャルハンドの実験では VR 環境における右手人差し指の触覚情報のみを反映させたが、より自然な VR 体験の利用状況を想定し右手 2 本指での触覚情報を提示する。右手人差し指及び親指の指腹に対し吸引部を配置し、顔面には頬及び額の 2 箇所に対し吸引部を配置する。顔面への触覚提示には 4.1 節にて作成した吸引部を引き続き用いた。指先用吸引部には能動的な動作を自然に行うため装着性を向上した新たな吸引部形状を用いた (図 4.6)。吸引部は 3D プリンタ (Form3, Formlabs. inc) により作成し、素材は引き続きゴムライクレジン (ElasticResin50A, Formlabs. inc) を用いた。吸引部に開けられた吸引孔形状は 4.1 節と同じ形状である。指腹への密着性を高めるため、スポンジをはさみ指腹と吸引部を圧迫した。この圧迫による感覚は弱く、体験への影響は軽微であると判断した。また吸引部の装着位置は能動的に物体を把持する際にとられる手の姿勢を考慮し親指を頬、人差し指を眉の上に配置した (図 4.7, 図 4.8)。これは眼前に存在する物体に触れる際に自然に手を持ち上げた場合人差し指から小指が上側を親指が下側に配置されることを想定し触覚転移時の違和感を最小限に抑えるため採用した (これは 3.8.1 項にて考案したデモンストレーション用アプリケーションと同様の位置である)。

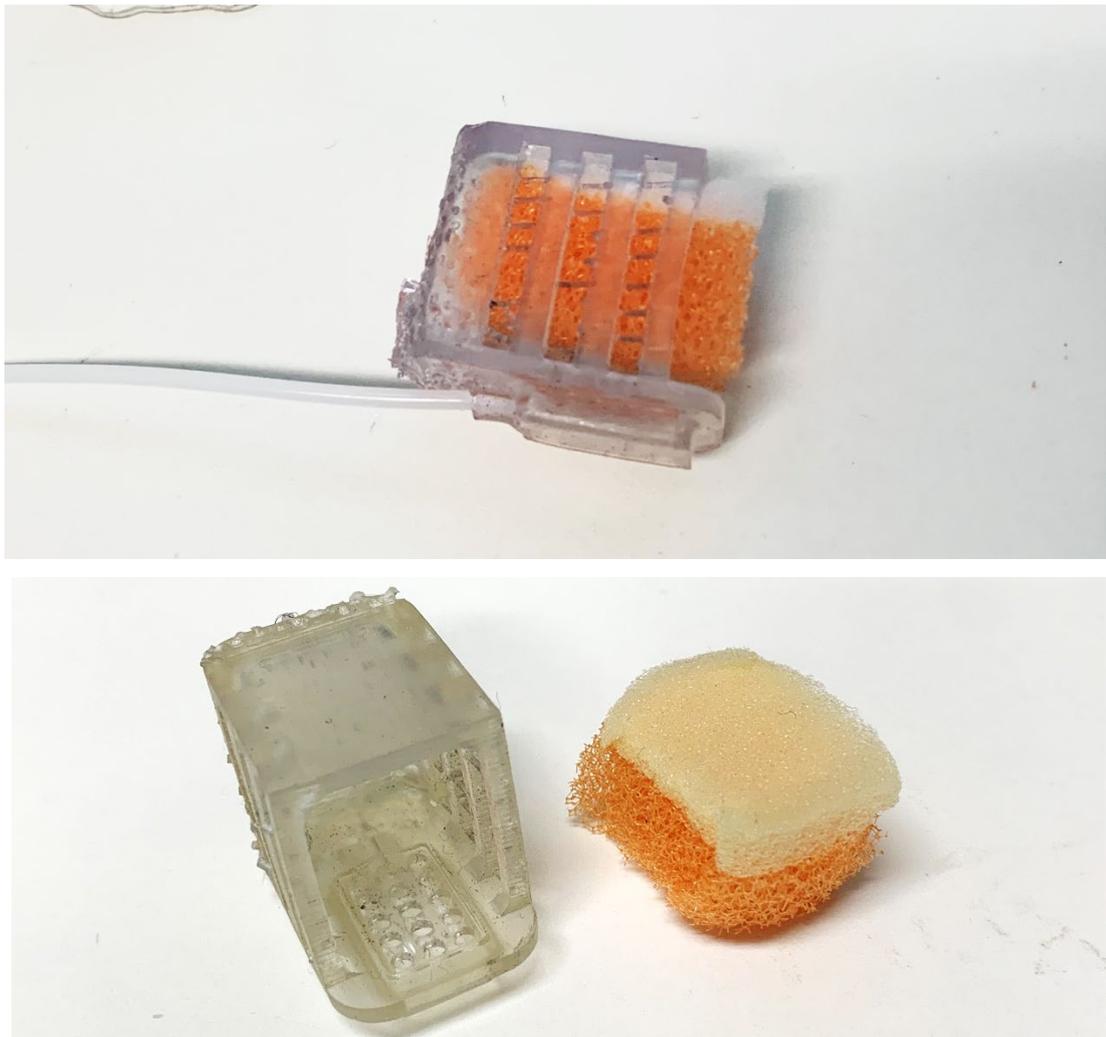


図 4.6 指先吸引部.

指先を圧迫するためのクッションを挟んでいる。上はクッションを吸引部に挿入した写真。下はクッションを吸引部から外した写真。

VR 体験の環境は Unity で作成し、HMD として Meta Quest 2 を用いた。手の形状習得には Meta Quest 2 のハンドトラッキング機能を利用した。VR 環境として被験者の前にバーチャルな机を設置し、50 mm×50 mm×50 mm のキューブを設置した (図 4.9)。キューブには重力が設定されており、被験者は 2 本指でつまむことで持ち上げることができた。



図 4.7 HMD のクッション部へ吸引部を取り付ける様子.



図 4.8 実験時の様子.

被験者は椅子に座り、右手でバーチャルキューブに触れた。左手でテンキーを操作し、回答を入力した。

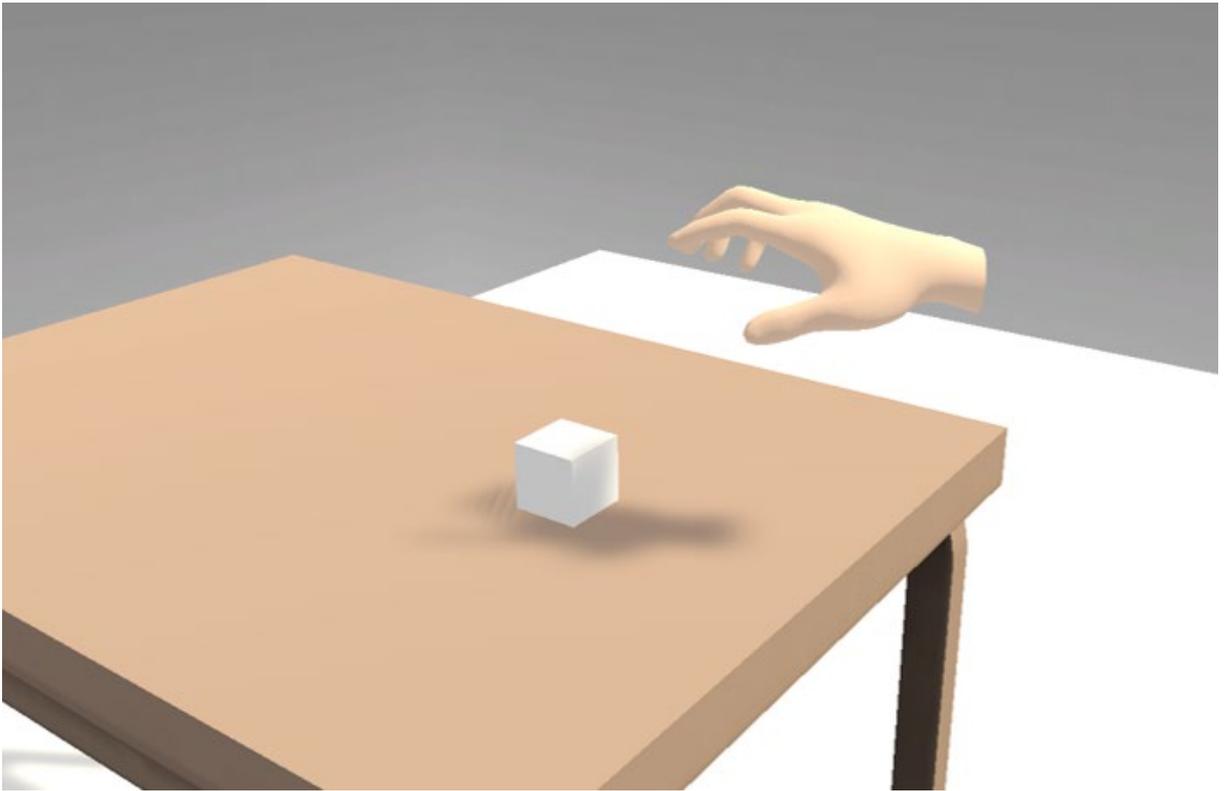


図 4.9 バーチャル環境の様子。

被験者の前に机と白いキューブを設置し、被験者は自由にキューブに触れることができる。

実験条件は人差し指及び親指に吸引刺激を提示する場合、右頬及び右額に吸引刺激を提示する場合、触覚刺激を提示しない場合の 3 種類を用意し、それぞれの条件に対しバーチャルな腕への所有感を感じるか確認する質問を行った。各刺激は 60 秒間提示し、次の条件を実施する前に一度視線を腕から外し所有感をリセットさせた。所有感を確認する質問項目は 4.1 節の実験結果を参照し、比較対象となる意味のない質問のうち Q6 を除外した合計 8 つの質問を用意した(表 4-1)。なお質問番号は 4.1 節の結果と比較しやすくするため変更しない。また 4.1 節の結果では触覚刺激がない場合にも触覚刺激条件と同等に所有感が生じており、異部位触覚刺激による体験の質の向上を確認することができなかった。そこで直接的に体験の質を評価するためキューブへのリアリティと VR 体験全体の質を 7 段階リッカートスケール (1:悪い~7:良い) にて回答させた (表 4-1)。

被験者は左手でテンキーを使い回答を入力した。指先と顔面に提示する吸引刺激は実験前に気圧の調整を被験者自身の手で行った。吸引強度の目安としてキューブに触れた感覚として適当である感覚を目指し、圧覚を感じる範囲内にて調整させた。これは 4.1 節の結果より接触により生じる感覚として明瞭に吸引を知覚してしまうと本来生じるはずとは逆方向の力が生じてしまい、違和感が大きくなることを避けるために指示を変更した。被験者は 10 人、年齢は 21~28 歳、平均 23.7 歳、標準偏差は $\pm 2.41$  歳、男性が 8 名、女性が 2 名であった。各実験条件を 1 回ずつ行い、試行ごとにアンケートに回答させた。

表 4-3 能動的条件下における所有感と VR 体験の質を確認する質問項目。

所有感	Q1. 自分の手を見ていると感じた Q2. バーチャルな手やオブジェクトが自分の一部のように感じた Q3. キューブに触れた感覚はバーチャルな手やオブジェクトに触れたように感じた
比較条件	Q4. 右手が複数あるように感じた Q5. 本物の手がバーチャルな手になったように感じた
非所有感	Q7. まるで手が消えたように感じた Q8. 手がどこにあるかわからなくなった Q9. 手を動かさないように感じた
体験の質	Q10. キューブに対するリアリティ (1: 悪い~7: 良い) Q11. 体験全体の質 (1: 悪い~7: 良い)

### 4.2.3 実験結果

各被験者の吸引気圧値を表 4-4 に示す。また VAS の結果を図 4.10 に示す。図 4.10 において  $x$  は平均値を示し、エラーバーは標準偏差を示す。VAS の結果を解析するため ART-ANOVA (Aligned Rank Transform-ANOVA, 整列ランク変換分散分析) を使用した。多重比較の際にはボンフェローニ補正を行った。その結果 Q1 において No haptics 条件と Check 条件間 ( $p=0.009$ ) と Q2 において No Haptics 条件と Finger 条件間 ( $p=0.012$ ) に有意差が見られた。また Q3 においての No Haptics 条件と Check 条件間 ( $p=0.019$ ) と No haptics 条件と Finger 条件間 ( $p=0.025$ ) に有意差がみられた。また所有感 (Ownership, Q1~Q3), 比較質問 (Control, Q4~Q5) を確認する質問を刺激条件ごとに比較することで各刺激において所有感を正しく確認することができたか確認した。同様に ART-ANOVA の後にボンフェローニの補正をかけた多重比較による解析の結果, Finger 条件 ( $p=0.0054$ ) と Check 条件 ( $p<0.001$ ) において有意差が確認された。このことから Finger 条件と Check 条件において所有感が生じていたことが確認された。

続けて体験の質を確認する項目に関して, Q10 のキューブのリアリティに関しては No haptics 条件と Finger 条件 ( $p=0.0012$ ), Check 条件 ( $p<0.001$ ) に有意差がそれぞれ見られた。また Q11 の VR 体験全体の質に関しても同様に No haptics 条件と Finger 条件 ( $p<0.001$ ), Check 条件 ( $p<0.001$ ) に有意差がそれぞれ見られた。

表 4-4 被験者ごとの頬と額, 人差し指, 親指の吸引気圧.

Participants	Cheek (hPa)	Over eye (hPa)	Thumb (hPa)	Index (hPa)
A	-259	-208	-202	-228
B	-54	-38	-86	-135
C	-154	-181	-244	-234
D	-64	-67	-128	-148
E	-110	-62	-156	-82
F	-89	-98	-202	-72
G	-130	-108	-251	-244
H	-98	-84	-132	-167
I	-227	-220	-311	-215
J	-174	-272	-213	-163

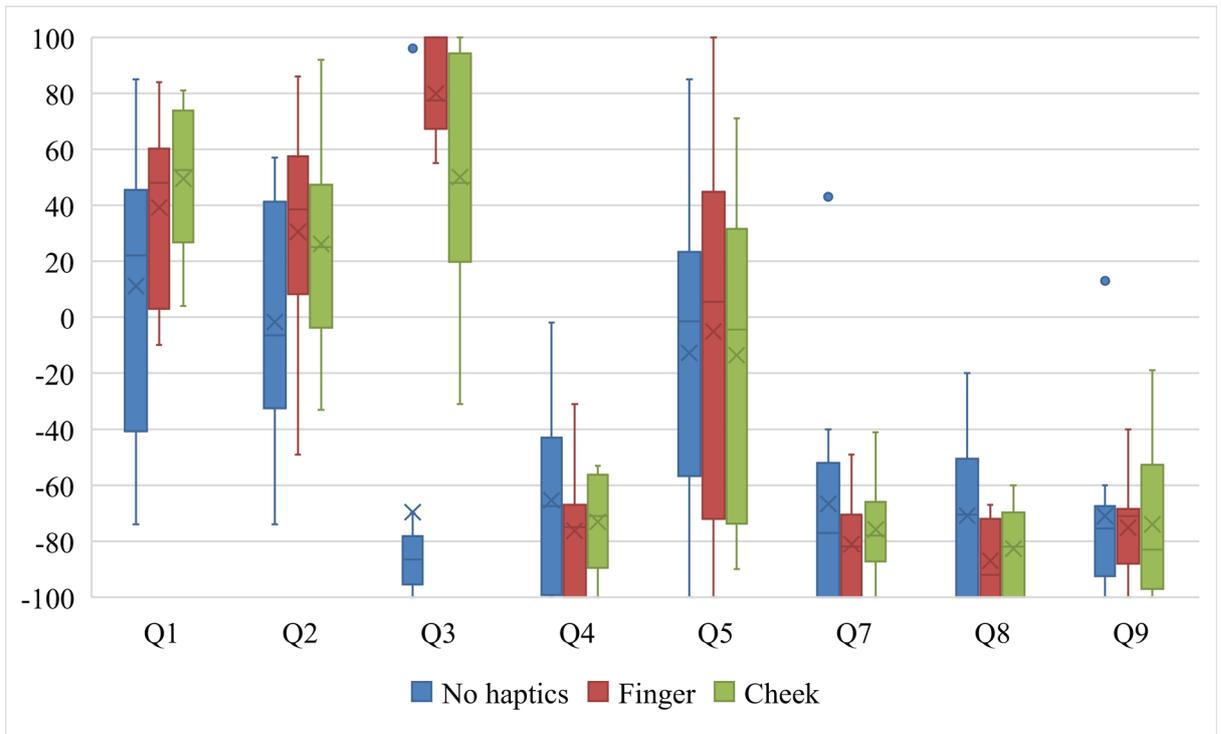


図 4.10 能動条件下における所有感に関するアンケートのスコア (-100/+100). 箱ひげ図は第1四分位と第3四分位を表し, 箱の中央の線は中央値を, 下と上のひげは第1四分位マイナス1.5×IQRと第3四分位プラス1.5×IQRを表す.

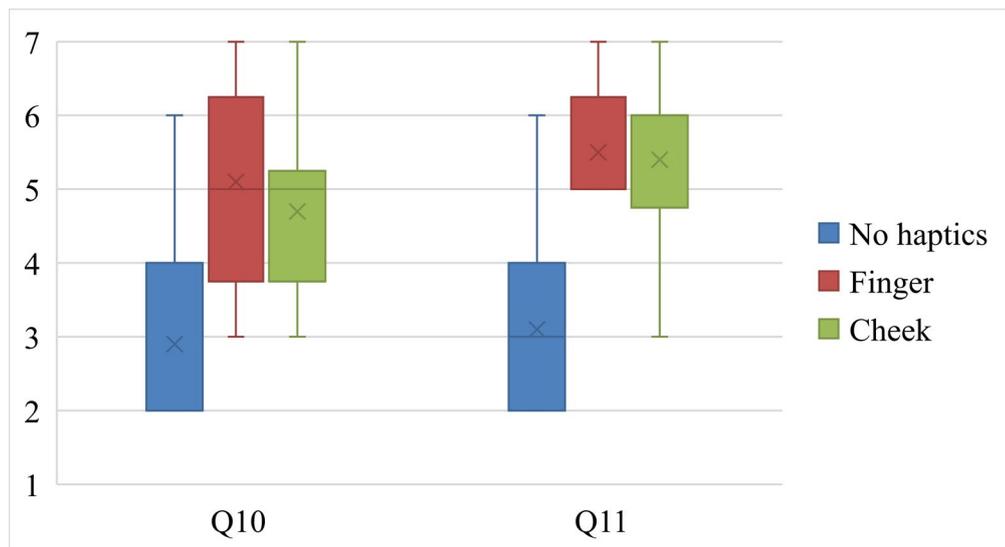


図 4.11 能動条件下における体験の質に関するアンケートのスコア。  
Q10 はキューブのリアリティ, Q11 は体験の質を表す。

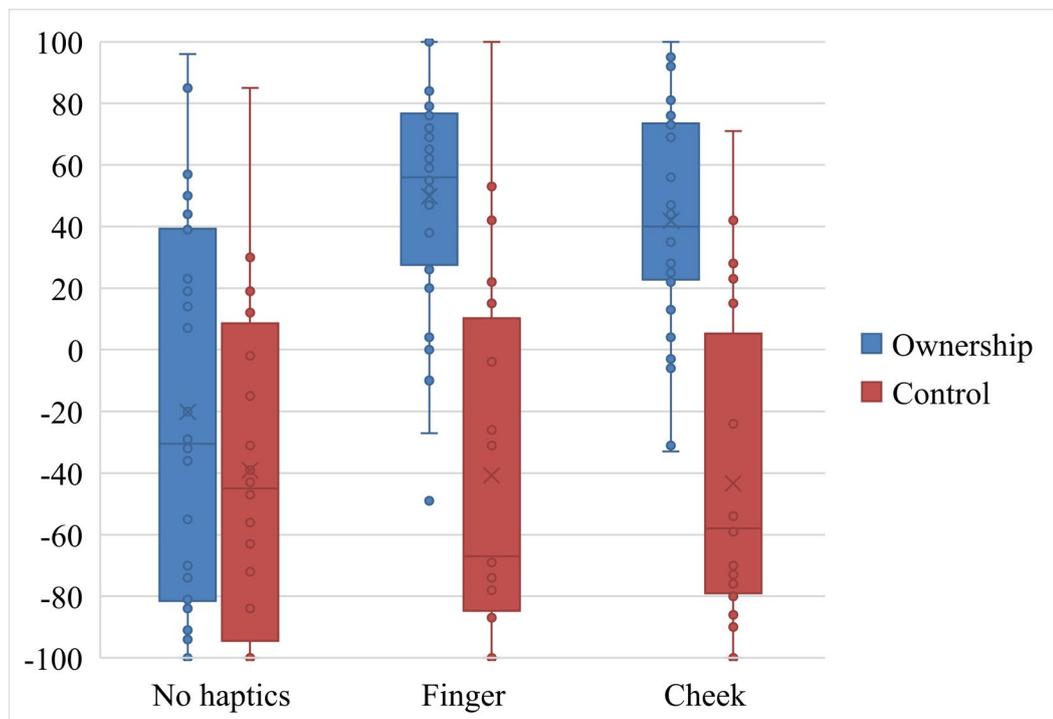


図 4.12 アンケートスコアのうち所有感と比較条件のスコア (-100/+100)。

所有感は Q1 から Q3 までの結果をまとめたスコア, 比較条件は Q5 と Q6 の結果をまとめたスコアである。箱ひげ図は第 1 四分位と第 3 四分位を表し, 箱の中央の線は中央値を, 上下の線は第 1 四分位マイナス  $1.5 \times IQR$  と第 3 四分位プラス  $1.5 \times IQR$  を表している。

#### 4.2.4 考察

図 4.10 の結果より, Q1~Q3 の所有感の評価において Finger 条件と Cheek 条件は No haptics 条件と比較しスコアが高い傾向があり, 触覚刺激によって所有感が増強されたことがわかった。特に Q3 において No haptics 条件で大きくスコアが下がっており, 腕を固定した条件におけるバーチ

ャルハンド錯覚の実験結果（図 4.4）の Q3 と比べても大きくスコアが下がっている。Q3 の質問内容は「キューブに触れた感覚はバーチャルな手やオブジェクトに触れたように感じた」というものであり、触覚刺激が生じない No haptics 条件ではスコアが低くなることは明らかである。特に能動条件下において大きくスコアが下がった原因は、能動的な動きにより接触のタイミングを予測しやすくなり、触覚刺激があることがより自然に感じられたことで相対的に触覚がないことへの違和感が強くなったのではないかと考えられる。このことから能動的に運動可能な VR 体験において所有感を維持するためには触覚刺激がより重要であることが示唆された。

図 4.11 は触覚提示条件において体験の質が向上していることを示している。Q10, Q11 両方の結果において Finger 条件と Cheek 条件に有意差はなく、同程度の質の向上が見込めることがわかった。体験後の被験者のコメントより Finger 条件の場合によりキューブへのリアリティがあるとの指摘があった。主な理由として能動的に腕を動作可能なことで指先への触覚情報の有無が強く認識されたものと考えられる。

### 4.3 多指吸引条件と異部位触覚提示時の比較

前節において指先への触覚刺激と顔への触覚刺激により VR 体験の質は大きく変わらないことが明らかになった。より実際の VR 体験の状況に近い場合にて比較するため能動的に指先を動作可能かつ指先 5 箇所へ刺激する。さらに顔の 5 箇所へも刺激を提示する。人差し指を最も左側（眉間側）とし、小指が右側（眉尻側）に来るように順に配置した。吸引気圧制御機構はこれまでの実験にて用いたものを利用した。

また顔面への触覚提示を安定的に行うため吸引部が 5 箇所を増えたことを踏まえ専用のクッションカバーを作成した（図 4.13）。クッションカバーには吸引部が 5 箇所取り付けられており、HMD とは独立して装着が可能である。

被験者は椅子に座り HMD を装着し、VR 体験を行う。VR 環境には空中に浮いた白い立方体が存在し、ユーザーがオブジェクトに触れたことを検出し対応した指の吸引触覚を提示する。バーチャルオブジェクトの大きさは 84 mm×96 mm×34 mm であった。バーチャルオブジェクトに触れた際の吸引気圧はオブジェクトごとに設定されており、それぞれ-10, -50, -100, -200, -300, -400 hPa であった。



図 4.13 吸引部を取り付けたフェイスマスク。

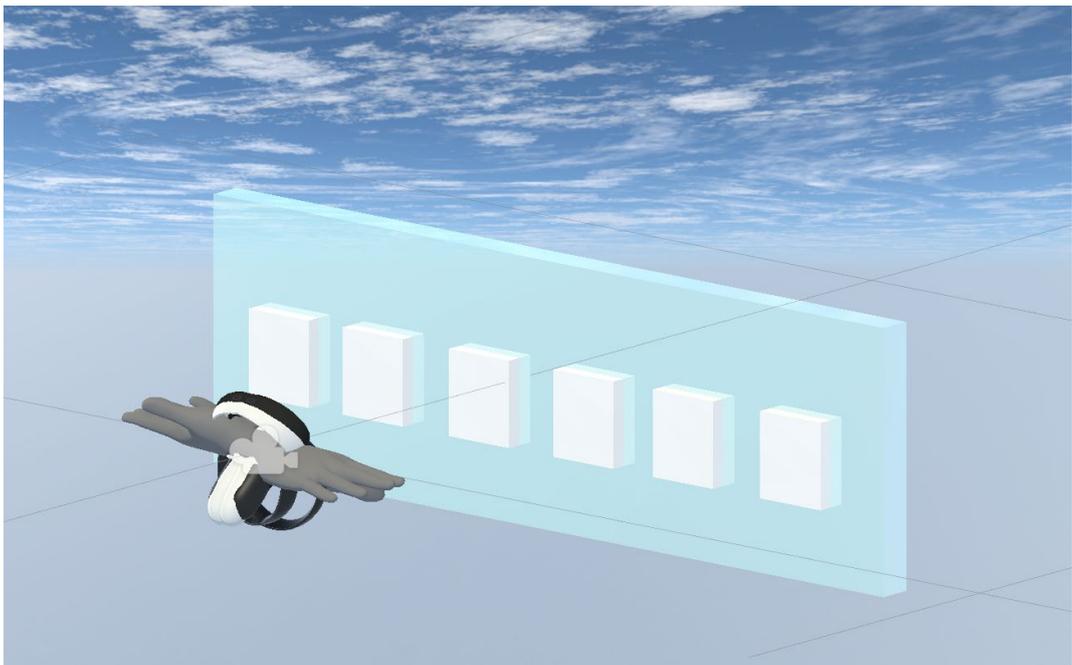


図 4.14 VR 環境にて表示した接触オブジェクト。

白いキューブが接触可能オブジェクトであり，触れると任意の気圧の吸引触覚が提示される。  
気圧は右から  $-10$ ，  $-50$ ，  $-100$ ，  $-200$ ，  $-300$ ，  $-400$  hPa である。



図 4.15 指先吸引部を 5 箇所装着し、VR 体験を行っている様子。

体験の結果、被験者からは「(指先, 顔面への刺激どちらでも) オブジェクトに触れている感覚がわかる」, 「指先吸引部が邪魔で手を握り込む, 人差し指で指すといった動作が難しい」といったコメントが得られた。吸引刺激は指先, 顔面どちらへも安定的に提示され, 被験者はバーチャルオブジェクトを指でつまむ, 掴む, つつく, 手を左右に振り複数のオブジェクトを連続的になぞるといった動作を行った。被験者ごとに適した吸引気圧は異なっていたが, 複数の吸引気圧にて吸引触覚が提示可能であったため被験者は自身に適した気圧にて体験を行った。

## 4.4 結論

本章では異部位触覚提示による VR 体験の質の向上が可能か確認することを目的とした実験を行った。実験では VR 体験において重要な自身のアバターに対する所有感を確認することで異部位触覚提示により VR 体験中のプレゼンスが低下するか否かを判断し, 触覚情報により得られるバーチャルオブジェクトとの接触情報を違和感なく受け取れるかどうかを検証した。

第 1 の実験ではラバーハンド錯覚生起条件を, HMD を用いた VR 環境にて再現し, バーチャルハンド錯覚を生起するかどうかを確認した。その結果指先にバーチャルオブジェクトが触れる映像を見せながら頬へ吸引刺激を提示することで腕への所有感が生起することが確認された。またこのとき生じた所有感は映像と合致する指先へ触覚提示した場合と同等かそれ以上に感じられる傾向が見られた。しかしながら本実験では頬への吸引触覚提示と同じ触覚刺激を指先に提示することを優先したことで映像により類推される指先への圧迫刺激と実際に指先へ提示される吸引刺

激が異なる刺激であるという認識が生じてしまい所有感を感じにくかった可能性がある。

第 2 の実験では能動的に手を動かせる条件にてバーチャルハンド錯覚の生起を調査した。第 1 の実験にて課題であったバーチャルオブジェクトとの接触感を吸引に提示してしまったことで違和感を生じてしまった点を改善するため被験者に圧覚を感じる範囲にて吸引気圧を調整するように指示した。その結果、指先、頬に触覚がある条件は触覚がない条件に比べ有意に所有感が高かった。また所有感を確認する質問項目のうち「バーチャルオブジェクトに触れた感覚が生じた」という回答項目において第 1 の実験と比べ触覚がある条件と触覚がない条件の差が広がっており、能動的に動作可能な場合において VR 環境の指先触覚情報の有無に対する認識の比重は大きくなっていることがわかった。またこれらの所有感に関する結果に対して指先触覚条件と頬触覚条件に有意な差はなく、同等の操作性を維持できると期待される。また VR 体験における質的評価に関して触覚がない条件と比較し指先触覚条件、頬触覚条件は有意に高く、触覚情報を追加することで総合的な体験の質を向上できることが明らかになった。

第 3 の体験では一般的な VR 体験として普及している能動的に腕を動かしバーチャルオブジェクトとのインタラクションを行う条件にて吸引触覚を提示した。また触覚刺激点を第 1 の実験の 1 点から 5 点に増やし、右手の全ての指に対して生じる触覚情報を再現した。被験者は VR 環境に設置されたバーチャルオブジェクトに自由に触れ、体験後に感想を回答した。その結果指先、顔面への吸引触覚提示どちらにおいても物体との接触を知覚することができた。

この実験結果により VR 環境における触覚インタラクションを異部位への触覚提示により代替することはユーザーの VR 体験の質を低下させずに触覚情報を伝えられる可能性が示された。

# 第5章

## 結論

### 5.1 本論文の成果

本論文の目的は HMD へ触覚提示装置を内蔵することで VR 体験へ簡便に触覚情報を付与することであった。本論文では触覚提示手法として吸引触覚提示を採用し、VR 空間におけるユーザーの手の触覚情報を顔へ提示することで VR 空間の知覚と体験の質の向上の有無を確認した。

VR 体験において触覚情報を提示する場合、通常であれば本来触覚を感じる部位へ直接触覚提示を行うが、HMD の使用を前提とした VR 体験であれば HMD に触覚提示装置を内蔵し、触覚提示部位を顔面に限定することで HMD 以外の装着ハードウェアを減らすことができると考えた。

まず吸引触覚提示に必要な吸引面積と吸引気圧を調査するために簡易的な吸引システムを用いて HMD と顔が接触する目元周辺に対し吸引を行い、刺激の心地よさを評価した。その結果、吸引箇所によって最適な吸引径と吸引気圧が異なることがわかり、また個人差の影響も大きいことがわかった。原因として吸引触覚知覚には皮膚変形が重要であることが推察され、皮膚の変形しやすさ、すなわち皮膚の柔らかさが影響していることが考えられた。実験全体を通して吸引径は 12 mm 程度、吸引気圧は -400 hPa 程度であれば触覚提示に十分であることが確認された。

続いて VR 空間において手に発生する触覚情報を顔に提示した場合に体験の質及び接触するオブジェクトのリアリティはどのように変化するか調査した。被験者は HMD と皮膚が接触する部位に吸引触覚を提示した場合、振動刺激を提示した場合、コントローラーを用いて手に触覚を提示した場合、触覚が全くない場合を比較し、VR 空間におけるバーチャルオブジェクトとの接触を主観評価により評価した。評価の項目として、ボールのリアリズム、体験全体の質、ボールの境界の明瞭さ、手で触った感覚の明瞭さの 4 つに回答した。その結果 HMD に内蔵した吸引刺激は総合的に体験の質、オブジェクトのリアリティ、境界の認識を向上させることが確認でき、吸引刺激が VR 体験の質の向上に有効であることを確認できた。

上記の実験において吸引触覚提示によりバーチャルオブジェクトとの接触感を向上できることが確認できたが、より強く接触感を生起させるためには吸引知覚ではなく圧覚知覚をコントロールすることが重要である。皮膚の吸引触覚知覚の特性を解明するため吸引気圧を調整した触覚提示を顔に行い、感覚が吸引と圧覚のどちらに感じるか、またそのときの感覚の強度を回答させる実験を行った。その結果、吸引気圧を弱めるにつれ圧覚と感じやすくなることが判明した。吸引触覚を知覚可能な閾吸引気圧値の 2/6 以下の吸引気圧にて圧覚が生起することが確認できたが、同時に感覚の強度も弱まり明確な圧迫感よりも接触感やタップ感に近い感覚であったことが実験後の被験者のコメントにより推察された。

圧迫提示の可能性が示されたためさらなる吸引刺激により提示可能な感覚の種類を増やすためバーチャルオブジェクトとの接触状況に応じた動的気圧制御を行い硬柔感の提示を試みた。VR 環境中に設置した変形しない 3D 球に対し自由に接触し、接触時の押し込み量に応じて吸引気圧を

変化させた。またこのときの変化率を変えることで硬柔感の段階的な提示が可能かを調査した。吸引刺激は頬に提示した。その結果、異なる変化率を感じ分けることができると明らかになったが、あくまで異なる感覚の違いを認識したにすぎず硬柔感の提示には至らなかった。さらなる感覚モダリティの提示のためには効果的な映像表現と組み合わせた触覚刺激が必要であることが示唆された。

上記の取り組みにより吸引触覚提示により十分 VR 体験に重要な物体との接触感の知覚、接触物体の物性判別が可能であることがわかったため効率的な触覚提示装置開発を目指し吸引部形状の最適化を行った。異なる吸引部を用いた主観評価実験と FEM を用いた皮膚変形シミュレーションを行い、皮膚吸引時に皮膚内部の機械受容器存在領域に生じる応力分布を調査した。その結果細かな吸引孔が密集した形状において皮膚を吸引することで皮膚変形を知覚するメルケル細胞存在領域においてひずみエネルギーが大きくなり、主観評価による触覚強度の増強と一致することがわかった。これにより吸引気圧が小さい場合でも十分な触覚強度を提示することができ、装置の小型化や低コスト化につながる可能性が示唆された。

これらの結果を踏まえ、一般的に利用される VR 体験状況において本提案システムの有用性を確認するため異部位触覚提示におけるアバターへの所有感を確認する実験を行った。その結果古典的ラバーハンド条件を模したバーチャルハンド条件において異部位触覚提示により所有感の低下は起きず、むしろ映像と刺激部位が一致した指先に触覚提示する条件よりも所有感を得やすい傾向が見られた。これは映像より類推される触覚情報が実際に提示した感覚（吸引触覚）と異なっていたため一致した部位への刺激では違和感が生じてしまい、異部位への触覚提示では異部位であるという点が期待される触覚提示と遜色なかったために違和感を生じにくかったからではないかと考えられる。これにより異部位触覚提示によりアバターとの一致感を損なわず VR 体験に触覚情報を上乘せすることが可能であると示唆された。

続けて能動的に動作可能な条件においてバーチャルハンド錯覚を生じるかどうかを調査した。そのために指先用の吸引触覚提示装置を開発し、バーチャルオブジェクトとバーチャルハンドの接触により生じる触覚を指先と頬へ提示し、所有感及び VR 体験の質評価を行った。その結果、静的条件におけるバーチャルハンド錯覚実験と同様に指先や頬への触覚刺激条件において同等の所有感を示しており、能動条件においても異部位触覚提示によりアバターの操作感は低下しないことがわかった。また VR 体験の質評価においても指先条件と頬条件で同等に高いスコアを得ており、異部位触覚提示が体験の質の向上に有効であることを明らかにした。

また多指触覚提示時における VR 体験の質的变化を定性的に検証するため片手 5 指に対する触覚提示を行う指先吸引装置及び顔面吸引装置を開発した。その結果、能動的な運動時においても異部位触覚提示によりバーチャルオブジェクトとの接触を知覚できる可能性が示唆された。

これらの実験のほか提案手法を用いた VR 体験を展示し、体験のフィードバックを回収した。多くの場合吸引触覚を知覚可能であったが、頭部の形状により吸引部と皮膚の密閉が十分でなく触覚を知覚できない体験者がいるなど改善点も発見された。

以上より本論文にて研究課題としていた HMD に内蔵可能な触覚提示装置の開発と異部位触覚提示による VR 体験の質的向上を達成することができたと結論づける。

## 5.2 今後の展望

### 5.2.1 安定した吸引刺激提示の実現

本提案システムにより VR 環境の指先触覚情報を顔面に提示することで VR 体験の質を損なわず触覚情報を認識することが可能となった。しかしながら HMD のクッション部に吸引部を内蔵したことで体験者の頭部形状によっては吸引部と皮膚の密閉が十分でなく触覚を知覚できない体験者がいた。この問題を解決するため 4.3 節においては HMD とは別にフェイスマスク型の装着装置を開発し、頭部形状によらず吸引部が皮膚と接することのできる構造を考案した。しかしながら装着の煩雑さを軽減するためには触覚提示部が HMD と一体となっていることが望ましく、さらに本論文においては吸引気圧制御部を吸引部と分離し机の上においた状態で実験や体験を行っていた。1.2.1 項にて述べた通り HMD の利用範囲は拡大しており、より小型かつ軽量のウェアラブルデバイスが要求されることを考えると吸引気圧制御部も HMD と一体となる必要がある。

まず吸引部の安定的な皮膚との密着についてはクッション部の素材を改良することやバネなどの圧迫機構を用いることで解決可能である。吸引気圧制御部の内蔵に関しては吸引部形状の設計によりこれまで利用していた吸引源よりも弱い吸引源でも十分な触覚強度を提示可能であることが示されたため大幅な小型軽量化が期待される。また、安定した気圧制御のため気圧制御部と吸引源の間に減圧室を挟むことで強力な負圧を用意でき、目標気圧までの時間応答性が良くなることが期待される。ほか制御基板の小型化、気圧制御機構の最適化を行うことで軽量化を行い、HMD への組み込みが実現される。

さらに本論文では被験者が 20~30 歳の男性に偏っていたため、特定の皮膚の物性に対する調査にとどまっている。これはより幅広いユーザーに対応した触覚提示機構の開発を目指す上で考慮すべき事項である。皮膚吸引触覚提示は本論の実験において被験者内であっても額と頬で適した吸引気圧が異なることが明らかになっていたため、さらに皮膚の特性が異なる要因として考えられる性差や年齢差を考慮した吸引実験を実施し安定して触覚提示可能な吸引部形状や吸引径を調査する。

また、実用上の課題として皮膚を吸引するために素肌への装着が必須となっている。現在普及している HMD も同様に皮膚への直接接触が必要であるが、フェイスカバーや使い捨てのフェイスマスクを使用するなど直接皮膚と触れ合わないようにする工夫がなされている。このような状況にも対応する必要があるため、吸引部に衛生的な素材の使用を検討するほか、使い捨てやユーザー専用の吸引部カバーを使う構造などを検討していく。

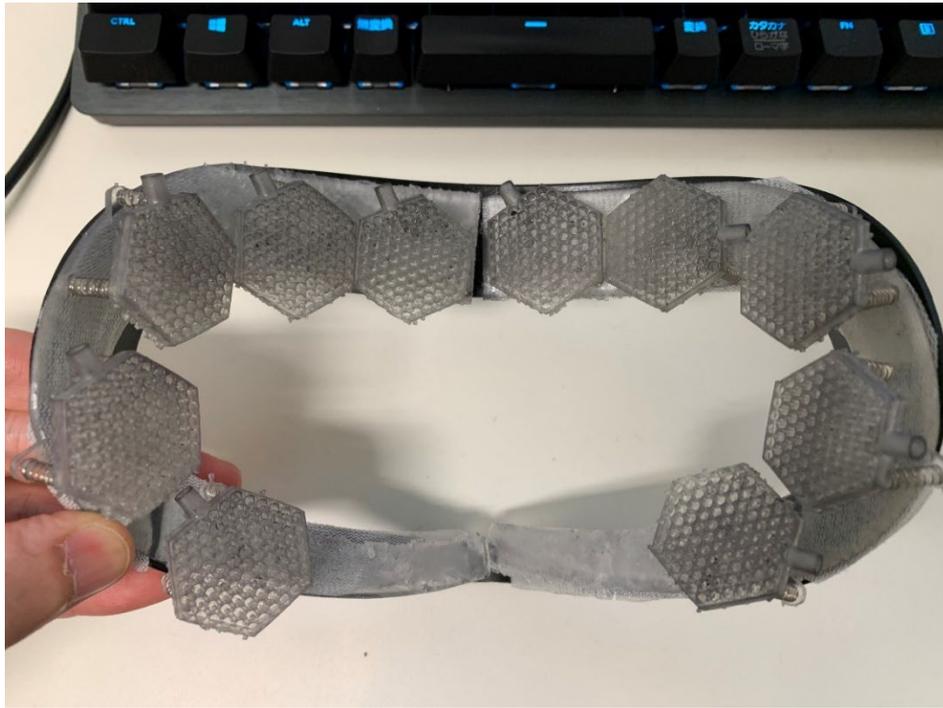


図 5.1 バネにより固定された吸引部の試作。

### 5.2.2 異部位触覚転移知覚の学習

本論文においては VR 環境の指先触覚情報を顔面へ提示するためにバーチャルオブジェクトと指先の接触を判定し触覚提示を行った。しかしながら異部位への触覚提示を指先に生じた感覚として解釈するためにはある程度の訓練が必要だと思われる。これまでの実験や体験会の様子の観察の結果から概ね数十分の体験を通して指先触覚情報と顔面触覚情報との関連を理解し、VR 体験を行えるようであった。この数十分の間にどのような認知プロセスを経て指先触覚情報と顔面触覚との関連性を構築しているのかを解明することができれば、効果的に異部位触覚提示を学習するトレーニングプランの構築や異部位触覚のメカニズムについても理解することが可能となる。

特に、本研究では広く HMD が普及した末に屋外における利用やコンシューマ向けに気軽に扱えることが重要となる場面にて触覚体験を簡便に提示することを目的としている。よって短時間（5～10分程度）にて学習が完了するか、一度学習を行えば効果が継続するような認知トレーニング手法やチュートリアル確立を目指す。

このような認知機能の解明には体験時のユーザーの行動解析やインタビューといったフィールドワークと fMRI や NIRS など用いた高精度の脳機能計測が必要である。ユーザー行動解析においてはより多くの被験者や行動計測が可能な空間が必要となる。そこで本提案システムの量産及びソーシャル VR 環境を利用することで継続的な提案システムの利用及び一般的な HMD 利用環境における異部位触覚体験の学習過程について広く情報を回収する。合わせて異部位触覚知覚に適性のある被験者を対象として脳機能の計測を行うことで異部位触覚知覚の発達プロセスを解明する。

### 5.2.3 多感覚統合による触覚情報の増強

本提案では皮膚吸引手法を用いて触覚提示を行った。これにより触覚知覚において重要な接触

感の提示を実現できたが、現状の手法では皮膚感覚のみの提示にとどまっており力覚や熱感覚など多様な質感提示がなされていない。このような複数感覚を再現提示するために新たな提示装置の導入や、HMDを用いることを前提としたバーチャル環境における映像、音と触覚の認知的相互作用を用いて触覚情報の増強を行う必要がある。まず本論文においても取り組んだ硬柔感の提示において Pseudo Haptics の知見から映像による硬柔感提示が挙げられる。また吸引刺激により提示可能な純粋な圧覚に加え分布的触覚分解能に優れる皮膚電気刺激手法を組み合わせることで微細な接触感覚提示を実現できると考える。

# 博士論文関連業績

## 査読付きジャーナル論文

**Takayuki kameoka**, Hiroyuki Kajimoto, “Design of Suction-type Tactile Presentation Mechanism to be Embedded in HMD”, *Frontiers in Virtual Reality Haptics*, 2022, 10 pages (第3章に対応)

## 査読付き国際会議

**Takayuki Kameoka**, Yuki Kon, Takuto Nakamura, Hiroyuki 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, pp. 11-15, 2018.10. Park Inn By Radisson Alexanderplatz Berlin.

**Takayuki Kameoka**, Yuki Kon, Takuto Nakamura, Hiroyuki Kajimoto, Haptopus: Haptic VR Experience Using Suction Mechanism Embedded in Head-Mounted Display, 31st ACM User Interface Software and Technology Symposium, pp. 154–156, 2018.10. bcc Berlin Congress Center.

**Takayuki Kameoka**, Yuki Kon, Takuto Nakamura, Hiroyuki Kajimoto, Haptopus: HMD with Built-in Pressure Sense Presentation Device by Suction Stimulus, *Asia Haptics*, 6 pages, 2018.11 14-16. Songdo Convensia Incheon.

**Takayuki Kameoka**, Yuki Kon, Takuto Nakamura, Hiroyuki Kajimoto, Haptopus: Haptic VR Experience Using Suction Mechanism Embedded in Head-Mounted Display, SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality, pp. 1–2, 2018.12 4-7. Tokyo International Forum. Tokyo, Japan.

**Takayuki Kameoka**, Hiroyuki Kajimoto, Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs, *IEEE World Haptics Conference 2021*, July 6-9, 2021, pp. 949-954, Virtual Conference, Online.

## 国内会議

**亀岡嵩幸**, 今悠気, 梶本裕之, 吸引圧触覚提示装置を内蔵したHMDの開発, インタラクシオン2018 第22回一般社団法人情報処理学会シンポジウム 2018.3. 学術総合センター

**亀岡嵩幸**, 今悠気, 梶本裕之, 顔面への吸引触覚提示における感覚提示手法の検討, 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2019.9 11-13, 東京大学 東京 日本.

**亀岡嵩幸**, 梶本裕之, Haptopus : HMD への吸引触覚提示機構の内蔵—気圧変調による硬軟感提示—, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会 2020, 2020.5 27-29. 金沢 (COVID-19の影響でオンライン開催) .

**亀岡嵩幸**, 梶本裕之, 顔面への皮膚吸引刺激における吸引孔形状の違いによる感覚変化, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会 2021, 2020.6-8. 大阪 (COVID-19の影響でオンライン開催)

亀岡嵩幸, 梶本裕之, 顔面での皮膚吸引触覚刺激における有限要素解析, 第26回 日本バーチャルリアリティ学会大会, 2021.9 12-14. 大阪 (COVID-19の影響でオンライン開催)

# 謝辞

本論文を執筆するにあたりまず9年という長い学生生活を暖かく見守っていただいた姉、両親、亡き祖父母に感謝いたします。

思えば私がバーチャルリアリティの研究を志したのは高校2年生の夏でした。周囲の流れに合わせ大学受験への意識が高まる中、明確な志望校の決まらぬままオープンキャンパスの資料や大学HPを漁っていた折に僕自身何をしたいのだろう、何に興味があるのだろうと自問自答しておりました。そのときに思い付いたのが遊戯王デュエルモンスターズに登場するデュエルディスクを作りたいというものでした。このデュエルディスクというものはカードゲームをサポートする架空のガジェットなのですが、質量のある立体映像と呼ぶべき映像によりまるで目の前に本物のモンスターが登場するという代物です。もともと遊戯王シリーズが大好きだった自分はこれを実現するためにはどのような技術が必要なのだろうと調べた際にバーチャルリアリティ、HMDという技術があることを知りました。これが今では非常に有名なOculus Rift DK1でした。当時はまだキックスターターにて支援を募っている段階でしたが、公開されている映像はまさに未来を感じさせるものであり、ここからバーチャルリアリティについて調べ、単に映像技術を指す言葉ではないこと、人間を対象とした壮大な技術領域を指す広い言葉であることなどを知りました。徐々にバーチャルリアリティに魅せられていき改めて大学進学を検討する際にはバーチャルリアリティの研究ができる研究室はどこかという基準が出来上がっていました。そこで真っ先に目に止まったのが、現在私が所属しております梶本裕之先生が運営されている梶本研究室でした。はじめはその独特な研究テーマや面白い開発を行っている、という程度の認識しか抱けませんでした。元来ものづくりが好きだった私はそれで十分でした。結果的にこの選択は私の人生を決定する上で最上の選択だったと認識しております。その後難なく、とは行きませんでした。なんとか電気通信大学に入学し、かけがえのない友人や経験を積むことができました。これまでの私であれば想像もできないような経験や出来事に出会い大学の自由さと人生の楽しさを謳歌しておりました（もちろんそれなりに大変なこともありました）。その後いよいよ梶本研究室に配属される、という際にもあまり勉強が得意でなかった自分は苦労し、通常のルートとは異なるアルバイト経由での配属となりました。ようやく研究ができる！と思った後はただひたすらに楽しい日々でした（もちろんそれなりに大変なことも以下略）。はじめはおもしろガジェットのような研究を期待していましたが最初に梶本先生よりご提案いただいた研究テーマは人の粘着感知覚メカニズムを明らかにするための計測装置の開発というもので正直「もっとHMDとかVRっぽい研究がしたかったな…」と思っており同期の宮上くんにも話したりしていました。結果から言うところの研究は私に見事にハマりこの内容で日本学術振興会特別研究員の申請書を書くほどに研究を進めました。ここで研究の楽しさに目覚めてしまい、このように博士論文を書くまでに至りました。

その後も様々なことが起きましたがここで書きすぎてもこれを読んだ後輩や先輩方とお会いした際に使う話のタネが尽きてしまいますのでこのあたりにしておこうと思います。最後にここまで研究生活だけでなく失禁研究会など様々なプロジェクトとともに歩んできた同期の宮上くん、先輩として暖かくアドバイス頂いた高橋さん、今さん、中村さん、金子さん、修士時代に同期として仲良くしていただいた小林くん、村田さん、山口くん、佐野さん、バーチャルの世界におい

て仲良くしていただいた海の皆様，様々な刺激とインスピレーションを与えていただいた松浦さん，ときに友人として，ときにライバルとして，しかし大部分は先輩として暖かく接していただいた森山さん，そして何よりここまでご指導いただいた梶本先生，小泉先生，研究室の事務から支えていただいた生田さん，松井さん，学外ながら暖かく見守っていただいた稲見先生，長谷川先生，白井先生，南澤先生ほか VR 研究者の皆様方，忙しい時期にサポートいただいたバーチャル学会のメンバーの皆様，ほかにも数え切れない方々のご支援によりここまで走り切ることができました。

これからも僕のあらゆる熱意が途切れることはないでしょう。またどこかで皆様にお会いできることを楽しみにしております。またその際にはさらに高みに立ってられるよう努力する所存でございます。ここで改めて皆様へ感謝申し上げ謝辞と致します。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝, バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2010.
- [2] 谷卓生, “VR=バーチャルリアリティーは、‘仮想’現実か ‘virtual’の訳語からVRの本質を考える,” 放送研究と調査, 2020, vol. 70, no. 1, pp. 46–58.
- [3] J. Steuer, “Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence,” *Journal of Communication*, Dec. 1992, vol. 42, no. 4, pp. 73–93.
- [4] J. Q. Coburn, I. Freeman, and J. L. Salmon, “A Review of the Capabilities of Current Low-Cost Virtual Reality Technology and Its Potential to Enhance the Design Process,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Sep. 2017, vol. 17, no. 3.
- [5] “THE MARÉORAMA AT THE PARIS EXPOSITION on JSTOR.” <https://www.jstor.org/stable/24981205> (accessed Oct. 04, 2022).
- [6] T. Hilfert and M. König, “Low-cost virtual reality environment for engineering and construction,” *Visualization in Engineering*, Dec. 2016, vol. 4, no. 1, pp. 1–18.
- [7] L. Chittaro and F. Buttussi, “Assessing Knowledge Retention of an Immersive Serious Game vs. a Traditional Education Method in Aviation Safety,” *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Apr. 2015, vol. 21, no. 4, pp. 529–538.
- [8] F. Buttussi and L. Chittaro, “Effects of Different Types of Virtual Reality Display on Presence and Learning in a Safety Training Scenario,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Feb. 2018, vol. 24, no. 2, pp. 1063–1076.
- [9] P. J. Standen, K. Threapleton, A. Richardson, L. Connell, D. J. Brown, S. Battersby, F. Platts, and A. Burton, “A low cost virtual reality system for home based rehabilitation of the arm following stroke: a randomised controlled feasibility trial,” *Clinical rehabilitation*, Mar. 2017, vol. 31, no. 3, pp. 340–350.
- [10] D. T. Nicholson, C. Chalk, W. R. J. Funnell, and S. J. Daniel, “Can virtual reality improve anatomy education? A randomised controlled study of a computer-generated three-dimensional anatomical ear model,” *Medical education*, Nov. 2006, vol. 40, no. 11, pp. 1081–1087.
- [11] N. Foreman, S. Boyd-Davis, M. Moar, L. Korralo, and E. Chappell, “Can virtual environments enhance the learning of historical chronology?,” *Instructional Science* 2007 36:2, Apr. 2007, vol. 36, no. 2, pp. 155–173.
- [12] G. Makransky, T. S. Terkildsen, and R. E. Mayer, “Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning,” *Learning and Instruction*, Apr. 2019, vol. 60, pp. 225–236.
- [13] J. Parong and R. E. Mayer, “Learning science in immersive virtual reality,” *Journal of Educational Psychology*, Aug. 2018, vol. 110, no. 6, pp. 785–797.
- [14] H. Hauptman, “Enhancement of spatial thinking with Virtual Spaces 1.0,” *Computers & Education*, Jan. 2010, vol. 54, no. 1, pp. 123–135.
- [15] Z. Merchant, E. T. Goetz, L. Cifuentes, W. Keeney-Kennicutt, and T. J. Davis, “Effectiveness of virtual reality-based instruction on students’ learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis,” *Computers & Education*, Jan. 2014, vol. 70, pp. 29–40.
- [16] “Virtual Reality and Passive Simulators: The Future of Fun: Diana Gagnon Hawkins,” *Communication in the Age of Virtual Reality*, Mar. 1995, pp. 163–193.

- [17] C. Youngblut, “Educational Uses of Virtual Reality Technology,” *Technical Report IDA Document*, 1998.
- [18] V. Holzwarth, V. H. Li, J. Gisler, E. Zurich, S. Christian, H. Eth, Z. Switzerland, A. Kunz, C. Hirt, and A. 2021 Kunz, “Comparing the Accuracy and Precision of SteamVR Tracking 2.0 and Oculus Quest 2 in a Room Scale Setup,” *International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, 2021, pp. 42–46.
- [19] D. Schneider, V. Biener, A. Otte, T. Gesslein, P. Gagel, C. Campos, K. Copic Pucihar, M. Kljun, E. Ofek, M. Pahud, P. O. Kristensson, and J. Grubert, “Accuracy Evaluation of Touch Tasks in Commodity Virtual and Augmented Reality Head-Mounted Displays,” *ACM Spatial User Interaction*, Nov. 2021, pp. 1–11.
- [20] Y. Bar-Cohen and C. Breazeal, “Biologically Inspired Intelligent Robots,” *Biologically Inspired Intelligent Robots*, 2003.
- [21] D. C. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib, “The haptic display of complex graphical environments,” *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1997*, Aug. 1997, pp. 345–352.
- [22] T. Iberall, “Nature of human prehension: three dextrous hands in one.,” 1987, pp. 396–401.
- [23] M. Iosifyan and O. Korolkova, “Emotions associated with different textures during touch,” *Consciousness and Cognition*, May 2019, vol. 71, pp. 79–85.
- [24] S. A. MacDonald, E. Freeman, S. Brewster, and F. Pollick, “User Preferences for Calming Affective Haptic Stimuli in Social Settings,” *ICMI 2021 - Proceedings of the 2021 International Conference on Multimodal Interaction*, Oct. 2021, pp. 387–396.
- [25] R. K. Eric, *カンデル神経科学*. 2014.
- [26] U. Proske and S. C. Gandevia, “The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force,” *Physiological reviews*, Oct. 2012, vol. 92, no. 4, pp. 1651–1697.
- [27] L. Jami, “Golgi tendon organs in mammalian skeletal muscle: functional properties and central actions,” *Physiological reviews*, 1992, vol. 72, no. 3, pp. 623–666.
- [28] R. S. Johansson and Å. B. Vallbo, “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” *Trends in Neurosciences*, Jan. 1983, vol. 6, no. C, pp. 27–32.
- [29] A. Patapoutian, A. M. Peier, G. M. Story, and V. Viswanath, “ThermoTRP channels and beyond: mechanisms of temperature sensation,” *Nature Reviews Neuroscience 2003 4:7*, 2003, vol. 4, no. 7, pp. 529–539.
- [30] J. Bolton, D. Lirette, M. Lambert, and B. Unsworth, “PaperDude: A virtual reality cycling exergame,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2014, pp. 475–478.
- [31] M. Rheiner, “Birdly an Attempt to Fly,” *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies on - SIGGRAPH '14*, 2014.
- [32] “MX4D Theatres | MediaMation.” <https://www.mediamation.com/mx4d-theatres/> (accessed Oct. 09, 2022).
- [33] “4DX | 4DX VR.” [https://www.cj4dx.com/jp/attraction/attraction.php#\\_4dxVr](https://www.cj4dx.com/jp/attraction/attraction.php#_4dxVr) (accessed Oct. 09, 2022).
- [34] R. Sakuragi, S. Ikeno, R. Okazaki, and H. Kajimoto, “CollarBeat | Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 20th Eurographics Symposium on Virtual Environments,” *In Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and 20th Eurographics Symposium on Virtual Environments*

- (*ICAT - EGVE '15*), 2015, pp. 141–146.
- [35] Y. Yamazaki, H. Mitake, M. Takekoshi, Y. Tsukamoto, T. Baba, and S. Hasegawa, “Hapbeat: Tension-based wearable vibroacoustic device,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2016, vol. 432, pp. 387–392.
- [36] A. Delazio, K. Nakagaki, R. L. Klatzky, S. E. Hudson, J. F. Lehman, and A. P. Sample, “Force Jacket,” in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2018, vol. 2018-April, pp. 1–12.
- [37] Y. Konishi, N. Hanamitsu, B. Outram, K. Minamizawa, T. Mizuguchi, and A. Sato, “Synesthesia suit: the full body immersive experience,” *SIGGRAPH*, Jul. 2016, pp. 1–1.
- [38] P. Lopes, S. You, L. P. Cheng, S. Marwecki, and P. Baudisch, “Providing haptics to walls & heavy objects in virtual reality by means of electrical muscle stimulation,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, May 2017, vol. 2017-May, pp. 1471–1482.
- [39] A. al Maimani and A. Roudaut, “Frozen suit: Toward a changeable stiffness suit and its application for haptic games,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, May 2017, vol. 2017-May, pp. 2440–2448.
- [40] “Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit.” <https://www.bhaptics.com/tactsuit> (accessed Oct. 09, 2022).
- [41] “Full Body VR Haptic Suit with Motion Capture | TESLASUIT.” <https://teslasuit.io/products/teslasuit-4/> (accessed Oct. 09, 2022).
- [42] V. R. Mercado, M. Marchal, and A. Lecuyer, “‘Haptics On-Demand’: A Survey on Encountered-Type Haptic Displays,” *IEEE Transactions on Haptics*, Jul. 2021, vol. 14, no. 3, pp. 449–464.
- [43] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, “Gravity grabber,” in *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, Aug. 2007, p. 8.
- [44] S. B. Schorr and 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*, Jul. 2017, vol. 10, no. 3, pp. 418–430.
- [45] H. In, B. B. Kang, M. K. Sin, and K. J. Cho, “Exo-Glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Mar. 2015, vol. 22, no. 1, pp. 97–105.
- [46] 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,” *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 2014, pp. 307–312.
- [47] T. Koyama, I. Yamano, K. Takemura, and T. Maeno, “Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, vol. 3, pp. 2905–2910.
- [48] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo, “Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 580–600.
- [49] T. Moriyama, A. Nishi, T. Nakamura, V. Yem, H. Kajimoto, N. Ayaka, T. Nakamura, V. Yem, and H. Kajimoto, “Hap-Link: Wearable Haptic Device on the Forearm That Presents Haptics Sensations Corresponding to the Fingers,” in *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, Dec. 2018, pp. 1–2.
- [50] T. Okano, K. Hiki, K. Hirota, T. Nojima, M. Kitazaki, and Y. Ikei, “Development of a sole pressure display,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Nov. 2018, vol. 432, pp. 175–179.

- [51] T. Moriyama, H. Asazu, A. Takahashi, and H. Kajimoto, “Simple is vest: High-density tactile vest that realizes tactile transfer of fingers,” in *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, SA 2019*, Nov. 2019, pp. 42–43.
- [52] E. Pezent, A. Israr, M. Samad, S. Robinson, P. Agarwal, H. Benko, and N. Colonnese, “Tasbi: Multisensory Squeeze and Vibrotactile Wrist Haptics for Augmented and Virtual Reality,” *2019 IEEE World Haptics Conference, WHC 2019*, Jul. 2019, pp. 1–6.
- [53] 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 Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, Aug. 2018, vol. 6, pp. 1–11.
- [54] C. Antfolk, A. Björkman, S.-O. O. Frank, F. Sebelius, G. Lundborg, B. Rosén, and B. Rosen, “Sensory feedback from a prosthetic hand based on air-mediated pressure from the hand to the forearm skin,” *Journal of Rehabilitation Medicine*, 2012, vol. 44, no. 8, pp. 702–707.
- [55] M. C. Jimenez and J. A. Fishel, “Evaluation of force, vibration and thermal tactile feedback in prosthetic limbs,” in *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 2014, pp. 437–441.
- [56] 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,” *Science Translational Medicine*, Mar. 2018, vol. 10, no. 432, p. ea06990.
- [57] A. J. Lynette and J. L. Susan, *Human Hand Function*. Oxford University Press, 2006.
- [58] 大山正, 今井省吾, 和気典二, 新編 感覚・知覚心理ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [59] 内川恵二, 講座〈感覚・知覚の科学〉 3 聴覚・触覚・前庭感覚. 朝倉書店, 2008.
- [60] 吉晃岩村, タッチ. 医学書院, 2001.
- [61] N. Ranasinghe *et al.*, “Season Traveller: Multisensory Narration for Enhancing the Virtual Reality Experience,” in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, Apr. 2018, vol. 2018-April, pp. 1–13.
- [62] Y. Luo, J. Wang, R. Shi, H. N. Liang, and S. Luo, “In-Device Feedback in Immersive Head-Mounted Displays for Distance Perception During Teleoperation of Unmanned Ground Vehicles,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 79–84.
- [63] K. Aoyama, D. Higuchi, K. Sakurai, T. Maeda, and H. Ando, “GVS RIDE: Providing a novel experience using a head mounted display and four-pole galvanic vestibular stimulation,” in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2017*, Jul. 2017, pp. 1–2.
- [64] O. B. Kaul and M. Rohs, “HapticHead: A spherical vibrotactile grid around the head for 3D guidance in virtual and augmented reality,” in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 3729–3740.
- [65] “PlayStation VR2 | PS5で実現する次世代のVRゲームがここに | PlayStation (日本).” <https://www.playstation.com/ja-jp/ps-vr2/> (accessed Oct. 09, 2022).
- [66] V. A. de Jesus Oliveira, L. Brayda, L. Nedel, and A. Maciel, “Designing a Vibrotactile Head-Mounted Display for Spatial Awareness in 3D Spaces,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Apr. 2017, vol. 23, no. 4, pp. 1340–1348.
- [67] D. Valkov and L. Linsen, “Vibro-tactile Feedback for Real-world Awareness in Immersive Virtual Environments,” in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Mar. 2019, pp. 340–349.

- [68] S. Y. Chu, Y. T. Cheng, S. C. Lin, Y. W. Huang, Y. Chen, and M. Y. Chen, "MotionRing: Creating Illusory Tactile Motion around the Head using 360° Vibrotactile Headbands," *UIST 2021 - Proceedings of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2021, pp. 724–731.
- [69] Y. Kon, T. Nakamura, and H. Kajimoto, "HangerOVER: HMD-embedded haptics display with hanger reflex," in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2017*, Jul. 2017, pp. 1–2.
- [70] H.-Y. Chang, W.-J. Tseng, C.-E. Tsai, H.-Y. Chen, R. L. Peiris, and L. Chan, "FacePush: Introducing Normal Force on Face with Head-Mounted Displays," in *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2018, pp. 927–935.
- [71] W.-J. Tseng, Y.-C. Lee, R. L. Peiris, and L. Chan, "A Skin-Stroke Display on the Eye-Ring Through Head-Mounted Displays," in *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2020, pp. 1–13.
- [72] V. Shen, C. Shultz, and C. Harrison, "Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array," *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2022, pp. 1–14.
- [73] A. Wilberz, D. Leschtschow, C. Trepkowski, J. Maiero, E. Kruijff, and B. Riecke, "FaceHaptics: Robot Arm based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments," in *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, pp. 1–14.
- [74] F. Nakamura, A. Verhulst, K. Sakurada, M. Fukuoka, and M. Sugimoto, "Evaluation of Spatial Directional Guidance Using Cheek Haptic Stimulation in a Virtual Environment," *Frontiers in Computer Science*, May 2022, vol. 4, p. 57.
- [75] 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*, 2019, pp. 439–451.
- [76] J. Gugenheimer, D. Wolf, E. R. Eiriksson, P. Maes, and E. Rukzio, "GyroVR: Simulating inertia in virtual reality using head worn flywheels," in *UIST 2016 - Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2016, pp. 227–232.
- [77] H. R. Tsai and B. Y. Chen, "ElastImpact: 2.5D multilevel instant impact using elasticity on head-mounted displays," *UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2019, pp. 429–437.
- [78] S. H. Liu, P. C. Yen, Y. H. Mao, Y. H. Lin, E. Chandra, and M. Y. Chen, "HeadBlaster: A Wearable Approach to Simulating Motion Perception Using Head-Mounted AirPropulsion Jets," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Jul. 2020, vol. 39, no. 4.
- [79] T. Teo, F. Nakamura, M. Sugimoto, A. Verhulst, G. A. Lee, M. Billinghurst, and M. Adcock, "Feel it: Using Proprioceptive and Haptic Feedback for Interaction with Virtual Embodiment," *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2020*, Aug. 2020.
- [80] R. L. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan, and K. Minamizawa, "ThermoVR: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays," in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, May 2017, vol. 2017-May, pp. 5452–5456.
- [81] Z. Chen, "ThermoReality : Thermally Enriched Head Mounted Displays for Virtual Reality," *Association for Computing Machinery, Inc*, 2017, vol. 1, pp. 1–2.
- [82] R. L. Peiris, L. Chan, and K. Minamizawa, "LiquidReality: Wetness Sensations on the Face for Virtual Reality," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 10894 LNCS, pp. 366–378.
- [83] Y.-Y. Liao, Y.-F. Hong, P.-H. Han, and J.-C. Ko, "LiquidMask: utilizing liquid-based haptic for

- multiple tactile sensation in immersive virtual reality,” *ACM SIGGRAPH*, Jul. 2019, pp. 1–1.
- [84] D. Wolf, M. Rietzler, L. Hnatek, and E. Rukzio, “Face/On: Multi-Modal Haptic Feedback for Head-Mounted Displays in Virtual Reality,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Nov. 2019, vol. 25, no. 11, pp. 3169–3177.
- [85] D. Wolf, L. Hnatek, and E. Rukzio, “Face/On: Actuating the facial contact area of a head-mounted display for increased immersion,” in *UIST 2018 Adjunct - Adjunct Publication of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2018, pp. 146–148.
- [86] B. G. Green, “Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat,” *Perception & Psychophysics* 1977 22:4, Jul. 1977, vol. 22, no. 4, pp. 331–337.
- [87] B. G. Green, “Thermo-Tactile Interactions: Effects of Touch on Thermal Localization,” *Sensory Functions of the Skin of Humans*, 1979, pp. 223–240.
- [88] J. Brooks, S. Nagels, and P. Lopes, “Trigeminal-based Temperature Illusions,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Apr. 2020.
- [89] T. Saito, J. Zhang, T. Kameoka, and H. Kajimoto, “Thermal sensation presentation to the forehead using electrical stimulation: Comparison with other tactile modalities,” *2021 IEEE World Haptics Conference, WHC 2021*, Jul. 2021, pp. 888–893.
- [90] Feelreal, “FEELREAL Multisensory VR Mask,” 2018. <https://feelreal.com/> (accessed Jun. 12, 2020).
- [91] “Wellness - OVR Technology.” <https://ovrtechnology.com/wellness/> (accessed Oct. 09, 2022).
- [92] Y.-S. Chen, P.-H. Han, K.-C. Lee, C.-E. Hsieh, J.-C. Hsiao, C.-J. Hsu, K.-W. Chen, C.-H. Chou, and Y.-P. Hung, “Lotus: Enhancing the immersive experience in virtual environment with mist-based olfactory display,” in *SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality on - SA ’18*, Dec. 2018, pp. 1–2.
- [93] M. Rietzler, K. Plaumann, T. Kräenzle, M. Erath, A. Stahl, and E. Rukzio, “VaiR: Simulating 3D airflows in virtual reality,” in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, May 2017, vol. 2017-May, pp. 5669–5677.
- [94] C. H. Wang, C. Y. Hsieh, N. H. Yu, A. Bianchi, and L. Chan, “HapticSphere: Physical support to enable precision touch interaction in mobile mixed-reality,” in *26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2019 - Proceedings*, Mar. 2019, pp. 331–339.
- [95] T. Ooshima, R. Osaki, S. Matsukiyo, M. Sato, T. Yamaguchi, and T. Harada, “An HMD-Integrated Haptic Device for Force, Friction, and Thermal Sensations of Fingertip,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2021, vol. 13095 LNCS, pp. 106–114.
- [96] W. J. Tseng, L. Y. Wang, and L. Chan, “FaceWidgets: Exploring tangible interaction on face with head-mounted displays,” in *UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2019, pp. 417–427.
- [97] W. Hutama, H. Harashima, H. Ishikawa, and H. Manabe, “HMK: Head-Mounted-Keyboard for Text Input in Virtual or Augmented Reality,” *Adjunct Publication of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST 2021*, Oct. 2021, pp. 115–117.
- [98] 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*, Jan. 2013, vol. 21, no. 1, pp. 112–120.
- [99] M. A. Garenfeld, C. K. Mortensen, M. Strbac, J. L. Dideriksen, and S. Dosen, “Amplitude

versus spatially modulated electrotactile feedback for myoelectric control of two degrees of freedom,” *Journal of Neural Engineering*, Aug. 2020, vol. 17, no. 4, p. 046034.

- [100] G. Liu, L. Wang, J. Wang -, M. A. Garenfeld, C. K. Mortensen, M. Strbac, al -, J. He, M. Vijay Joshi, and J. Chang, “Myoelectric control with abstract decoders,” *Journal of Neural Engineering*, Jul. 2018, vol. 15, no. 5, p. 056003.
- [101] E. Battaglia, J. P. Clark, M. Bianchi, M. G. Catalano, A. Bicchi, M. K. O. Malley, and M. K. O’malley, “Skin Stretch Haptic Feedback to Convey Closure Information in Anthropomorphic, Under-Actuated Upper Limb Soft Prostheses,” *IEEE Transactions on Haptics*, Oct. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 508–520.
- [102] 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-tactile stimulation of normal and tangential skin forces,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Dec. 2015, vol. 2015-December, pp. 1186–1193.
- [103] G. Shi *et al.*, “Fluidic Haptic Interface for Mechano-Tactile Feedback,” *IEEE Transactions on Haptics*, Jan. 2020, vol. 13, no. 1, pp. 204–210.
- [104] J. W. Sensinger and S. Dosen, “A Review of Sensory Feedback in Upper-Limb Prostheses From the Perspective of Human Motor Control,” *Frontiers in Neuroscience*, Jun. 2020, vol. 14, p. 345.
- [105] T. Maeda, K. Tsuchiya, R. Peiris, Y. Tanaka, and K. Minamizawa, “HapticAid: Haptic experiences system using mobile platform,” *TEI 2017 - Proceedings of the 11th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, Mar. 2017, pp. 397–402.
- [106] T. Maeda, R. Peiris, M. Nakatani, Y. Tanaka, and K. Minamizawa, “Wearable haptic augmentation system using skin vibration sensor,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, Mar. 2016, pp. 1–4.
- [107] K. Saichi, K. Yasuda, Y. Kitaji, N. Kaibuki, and H. Iwata, “Development and pilot clinical evaluation of a haptic-based perception-empathy biofeedback device for gait rehabilitation,” *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference*, Oct. 2016, vol. 2016, pp. 6158–6161.
- [108] A. Ichinose, Y. Sano, M. Osumi, M. Sumitani, S.-I. I. Kumagaya, and Y. Kuniyoshi, “Somatosensory Feedback to the Cheek During Virtual Visual Feedback Therapy Enhances Pain Alleviation for Phantom Arms,” *Neurorehabilitation and neural repair*, Aug. 2017, vol. 31, no. 8, pp. 717–725.
- [109] V. Ramachandran, “The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture,” *Brain*, Sep. 1998, vol. 121, no. 9, pp. 1603–1630.
- [110] V. S. Ramachandran and D. Rogers-Ramachandran, “Phantom Limbs and Neural Plasticity,” *Archives of Neurology*, Mar. 2000, vol. 57, no. 3, pp. 317–320.
- [111] S. D. Pourrier, W. Nieuwstraten, B. van Cranenburgh, T. A. R. Schreuders, H. J. Stam, and R. W. Selles, “Three cases of referred sensation in traumatic nerve injury of the hand: implications for understanding central nervous system reorganization,” *Journal of rehabilitation medicine*, Apr. 2010, vol. 42, no. 4, pp. 357–361.
- [112] C. Dietrich, S. Nehrdich, A. Zimmer, A. Ritter, G. O. Hofmann, W. H. R. Miltner, and T. Weiss, “Referred cramping phantom hand pain elicited in the face and eliminated by peripheral nerve block,” *Experimental Brain Research*, Jun. 2018, vol. 236, no. 6, pp. 1815–1824.
- [113] C. S. McCabe, R. C. Haigh, P. W. Halligan, and D. R. Blake, “Referred sensations in patients with complex regional pain syndrome type 1,” *Rheumatology*, Sep. 2003, vol. 42, no. 9, pp. 1067–1073.
- [114] H. Flor, L. Nikolajsen, and T. S. Jensen, “Phantom limb pain: a case of maladaptive CNS

- plasticity?,” *Nature Reviews Neuroscience* 2006 7:11, Nov. 2006, vol. 7, no. 11, pp. 873–881.
- [115] S. Knecht, H. Henningsen, C. Höhling, T. Elbert, H. Flor, C. Pantev, and E. Taub, “Plasticity of plasticity? Changes in the pattern of perceptual correlates of reorganization after amputation.,” *Brain*, Apr. 1998, vol. 121, no. 4, pp. 717–724.
- [116] W. Penfield and T. Rasmussen, “The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function,” *Journal of the American Medical Association*, Dec. 1950, vol. 144, no. 16, pp. 1412–1412.
- [117] M. Schaefer, N. Noennig, H.-J. Heinze, and M. Rotte, “Fooling your feelings: Artificially induced referred sensations are linked to a modulation of the primary somatosensory cortex,” *NeuroImage*, Jan. 2006, vol. 29, no. 1, pp. 67–73.
- [118] T. Rasmussen and W. Penfield, “Further studies of the sensory and motor cerebral cortex of man.,” *undefined*, 1947.
- [119] W. Penfield and E. Boldrey, “SOMATIC MOTOR AND SENSORY REPRESENTATION IN THE CEREBRAL CORTEX OF MAN AS STUDIED BY ELECTRICAL STIMULATION,” *Brain*, Dec. 1937, vol. 60, no. 4, pp. 389–443.
- [120] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, and B. Henson, “Exploring relationships between touch perception and surface physical properties,” *International Journal of Design*, Aug. 2009, vol. 3, no. 2, pp. 67–76.
- [121] N. Asamura, T. Shinohara, N. Koshida, and E. Engineering, “Necessary spatial resolution for realistic tactile feeling display,” 2001, pp. 1851–1856.
- [122] H. Shirado and T. Maeno, “Modeling of human texture perception for tactile displays and sensors,” *Proceedings - 1st Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems; World Haptics Conference, WHC 2005*, 2005, pp. 629–630.
- [123] H. Nagano, K. Sase, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad,” *2019 IEEE World Haptics Conference, WHC 2019*, Jul. 2019, pp. 389–394.
- [124] M. A. Srinivasan and K. Dandekar, “An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip,” *Journal of Biomechanical Engineering*, Feb. 1996, vol. 118, no. 1, pp. 48–55.
- [125] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda, “Multi primitive tactile display based on suction pressure control,” in *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS '04. Proceedings.*, 2004, pp. 90–96.
- [126] T. Maeno, K. Kobayashi, and N. Yamazaki, “Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors,” *JSME International Journal Series C*, Mar. 1998, vol. 41, no. 1, pp. 94–100.
- [127] H. P. Saal, B. P. Delhay, B. C. Rayhaun, and S. J. Bensmaia, “Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jul. 2017, vol. 114, no. 28, pp. E5693–E5702.
- [128] K. O. Johnson, “The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors,” *Current Opinion in Neurobiology*, Aug. 2001, vol. 11, no. 4, pp. 455–461.
- [129] Y. Hashimoto, S. Nakata, and H. Kajimoto, “Novel tactile display for emotional tactile experience,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2009, pp. 124–131.
- [130] T. Hachisu and M. Fukumoto, “VacuumTouch: Attractive force feedback interface for haptic interactive surface using air suction,” in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 2014, pp. 411–420.

- [131] T. Hachisu and M. Fukumoto, “SpiroSurface: A Repulsive and Attractive Force Display for Interactive Tabletops Using a Pneumatic System,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Jul. 2018, vol. 38, no. 4, pp. 54–70.
- [132] L. ben Porquis, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Enhancement of human force perception by multi-point tactile stimulation,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Dec. 2011, pp. 3488–3493.
- [133] L. B. C. Porquis, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Tactile-based torque illusion controlled by strain distributions on multi-finger contact,” in *Haptics Symposium 2012, HAPTICS 2012 - Proceedings*, 2012, pp. 393–398.
- [134] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte, “Tactual discrimination of softness,” <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.88>, 1995, vol. 73, no. 1, pp. 88–101.
- [135] T. Kawabe, “Mid-Air Action Contributes to Pseudo-Haptic Stiffness Effects,” *IEEE Transactions on Haptics*, Jan. 2020, vol. 13, no. 1, pp. 18–24.
- [136] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda, “A whole palm tactile display using suction pressure,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 2004, no. 2, pp. 1524–1529.
- [137] T. Miyasato, H. Noma, and F. Kishino, “視覚情報と触覚情報の中の遅延知覚に関する主観評価,” *テレビジョン学会誌*, Oct. 1995, vol. 49, no. 10, pp. 1353–1356.
- [138] K. Saito, M. Konyo, H. Nagano, S. Sakaguchi, and N. Arakawa, “Simultaneous Measurement of Skin Deformation and Perceptual Sensitivity Using Suction Pressure,” in *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Jul. 2019, pp. 265–270.
- [139] K. Chopra, D. Calva, M. Sosin, K. K. Tadisina, A. Banda, C. de La Cruz, M. R. Chaudhry, T. Legesse, C. B. Drachenberg, P. N. Manson, and M. R. Christy, “A Comprehensive Examination of Topographic Thickness of Skin in the Human Face,” *Aesthetic Surgery Journal*, Oct. 2015, vol. 35, no. 8, pp. 1007–1013.
- [140] L. Lin and S. Jörg, “Need a hand? How appearance affects the virtual hand illusion,” *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception, SAP 2016*, Jul. 2016, pp. 69–76.
- [141] M. Slater, D. Perez-Marcos, H. H. Ehrsson, and M. v. Sanchez-Vives, “Towards a digital body: The virtual arm illusion,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Aug. 2008, vol. 2, no. AUG, p. 6.
- [142] K. Ma and B. Hommel, “The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion,” *Consciousness and Cognition*, Nov. 2015, vol. 36, pp. 277–288.
- [143] M. Pyasik, G. Tieri, and L. Pia, “Visual appearance of the virtual hand affects embodiment in the virtual hand illusion,” *Scientific Reports 2020 10:1*, Mar. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–11.
- [144] M. Costantini and P. Haggard, “The rubber hand illusion: sensitivity and reference frame for body ownership,” *Consciousness and Cognition*, Jun. 2007, vol. 16, no. 2, pp. 229–240.
- [145] M. Botvinick and J. Cohen, “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, Feb. 1998, vol. 391, no. 6669, p. 756.
- [146] M. Slater, “Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Dec. 2009, vol. 364, no. 1535, p. 3549.
- [147] S. Jung, G. Bruder, P. J. Wisniewski, C. Sandor, and C. E. Hughes, “Over my hand: Using a personalized hand in VR to improve object size estimation, body ownership, and presence,” *SUI 2018 - Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*, Oct. 2018, pp. 60–68.
- [148] K. Kilteni, R. Groten, and M. Slater, “The Sense of Embodiment in Virtual Reality,” *Presence:*

*Teleoperators and Virtual Environments*, Nov. 2012, vol. 21, no. 4, pp. 373–387.

- [149] G. Tieri, A. Gioia, M. Scandola, E. F. Pavone, and S. M. Aglioti, “Visual appearance of a virtual upper limb modulates the temperature of the real hand: a thermal imaging study in Immersive Virtual Reality,” *European Journal of Neuroscience*, May 2017, vol. 45, no. 9, pp. 1141–1151.