

Title	実空間とデジタル空間における人の身体的インタラクションを拡張するデジタルスキンの提案
Sub Title	Digital skin that extends human embodied interaction in real space and digital space
Author	谷地, 卓(Tanichi, Taku) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2020
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2020年度メディアデザイン学 第845号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002020-0845

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2020年度

実空間とデジタル空間における
人の身体的インタラクションを拡張する
デジタルスキンの提案



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

谷地 卓

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

谷地 卓

研究指導コミッティ:

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

加藤 朗 教授 (副指導教員)

論文審査委員会:

南澤 孝太 教授 (主査)

加藤 朗 教授 (副査)

大川 恵子 教授 (副査)

修士論文 2020 年度

実空間とデジタル空間における
人の身体的インタラクションを拡張する
デジタルスキンの提案

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

近年、情報通信技術の発展により、デジタル空間の利用は我々の生活に必要な不可欠である。今後は人工知能技術や無線通信技術、ロボット技術などの発展によりデジタル空間の重要性はより増加すると考えられる。このような実空間とデジタル空間が融合した空間で、我々の身体感覚は実空間だけでなくデジタル空間の情報も受け取る必要がある。そこで本研究では、実空間とデジタル空間に対して一体感のあるインタラクションを実現するために、実空間とデジタル空間を知覚可能な感覚器官としてはたらきをもつインタフェースの実現を目的とした。このインタフェースのコンセプトとして、セカンドスキンとして皮膚上に重なり、実空間に対する皮膚感覚と並列的にデジタル空間から身体感覚を得る器官であるデジタルスキンを提案した。本論文ではデジタルスキンの機能として、皮膚上に電子回路機能や触覚提示機能をもった人工皮膚を開発し評価を行った。また、これらを組み合わせアプリケーションを開発し、デジタルスキンを使用したインタラクションによってコンセプトの有効性や使用者の認知に与える影響について検討した。

キーワード：

触覚, 触覚伝送, ウェアラブルデバイス, 身体拡張, 身体性メディア

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

谷地 卓

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2020

Digital Skin that Extends Human Embodied Interaction
in Real Space and Digital Space

Category: Science / Engineering

Summary

In recent years, the use of digital space has become an integral part of our lives. In the future, the importance of digital space is expected to increase with the development of artificial intelligence, wireless communication, and robotics technologies. In such a space where real space and digital space are fused, our senses need to receive information not only from real space but also from digital space. In this study, we aimed to realize an interface that can perceive both real and digital space as a sensory organ in order to realize interaction with a sense of unity between real and digital space. As a concept to realize this interface, we proposed a digital skin as a second skin to obtain body sensation from the digital space on the skin. In this paper, we developed and evaluated an artificial skin with electronic circuits and tactile sensation presentation functions on the skin as elemental functions of the digital skin. In addition, we developed an application by combining these functions, and examined the effectiveness of the concept and the influence on the user's cognition by interaction using the digital skin.

Keywords:

haptics, haptic transmission, wearable device, augmented human, embodied media

Keio University Graduate School of Media Design

Taku Tanichi

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. デジタル空間を介した情報のやりとり	1
1.2. 融合する実空間とデジタル空間	2
1.2.1 視覚によるデジタル空間認知	2
1.2.2 聴覚によるデジタル空間認知	4
1.3. 人間拡張	7
1.4. 本研究の目的	7
1.5. 本論文の構成	7
第 2 章 関連研究	9
2.1. 触覚の原理と認知	9
2.1.1 皮膚の構造と触覚受容器	9
2.1.2 触覚による知覚	11
2.1.3 触覚による認知	11
2.1.4 触覚が与える生理学的影響	13
2.2. 触覚ディスプレイとその応用	14
2.2.1 設置型触覚ディスプレイ	14
2.2.2 ウェアラブル触覚ディスプレイ	15
2.2.3 インターネットを介した触覚の共有	17
2.3. 皮膚上インタフェース	19
第 3 章 コンセプト	21
3.1. XR 空間での理想的なインタラクション	21
3.2. 新たな認知の獲得	22

3.3.	現在のインタラクションの問題点	27
3.4.	デジタルスキンのコンセプト	28
3.5.	デジタルスキンの装着方法	30
3.6.	FineFiber	31
3.7.	デジタルスキン機能の設計	34
3.7.1	外界から皮膚への接触の取得	34
3.7.2	皮膚感覚への介入	36
3.7.3	生体信号の取得	37
3.7.4	皮膚の視覚的表現	39
3.7.5	皮膚を通じた情報システムとのやりとり	40
3.8.	本章のまとめ	40
第4章	実装	41
4.1.	電子回路要素機能の実装	42
4.1.1	導電性を持った人工皮膚の実現	42
4.1.2	絶縁性を持った人工皮膚の実現	49
4.2.	電子回路機能の実装	51
4.2.1	LEDを用いた視覚ディスプレイの実装	51
4.2.2	肌上タッチセンサの実装	54
4.3.	振動触覚提示	56
4.3.1	プロトタイピング	56
4.3.2	セカンドプロトタイプ	61
4.3.3	振動知覚実験	64
4.3.4	触覚知覚実験考察	67
4.3.5	振動触覚提示まとめ	69
4.4.	本章のまとめ	69
第5章	Proof of Concept	70
5.1.	デジタルスキンによる人-モノ間インタラクション	70
5.1.1	システム構成	71

5.1.2	皮膚上への RFID タグと磁石の取り付け	73
5.1.3	システムの利用とフィードバック	74
5.1.4	考察	75
5.2.	デジタルスキンによる人-人 間インタラクション	76
5.2.1	システムの概要	76
5.2.2	使用者への装着	78
5.2.3	システムの利用とフィードバック	78
5.2.4	考察	79
第 6 章	結論	80
	謝辞	83
	参考文献	85

目 次

1.1	Vive Pro のステレオカメラ用 SDK 「VIVE SRWorks SDK」 に収録された AR アプリケーションのデモ ¹	3
1.2	Magic Leap 1 の使用例のイメージ ²	3
1.3	5.1ch サラウンドのスピーカー配置 ³	4
1.4	バイノーラルステレオマイク KU100 ⁴	5
1.5	Bose Frames ⁵	5
1.6	AirPods Pro ⁷	6
1.7	SpatialAudio による音の定位感 ⁸	6
2.1	無毛皮膚下の組織と触覚受容器 ([1] より抜粋)	10
2.2	各受容器の周波数閾値 ([1] より抜粋)	10
2.3	シースルーディスプレイを通して物体に触れている様子 ([2] より抜粋)	12
2.4	Unlimited Corridor のコンセプト ([3] より抜粋)	13
2.5	PHANToM([4] より抜粋)	14
2.6	SPIDAR([5] より抜粋)	14
2.7	Gravity Grabber([6] より抜粋)	15
2.8	Altered Touch([7] より抜粋)	15
2.9	HAPTIC PLASTeR([8] より抜粋)	16
2.10	Synestasia Wear([9] より抜粋)	16
2.11	TWECH([10] より抜粋)	17
2.12	試合会場 (左) と観戦会場 (右)([11] より抜粋)	18
2.13	公衆触覚伝話 ([33] より抜粋)	18

2.14	SkinWire([12] より抜粋)	19
2.15	Duoskin([13] より抜粋)	19
2.16	Skinmarks([14] より抜粋)	20
2.17	Physioskin([15] より抜粋)	20
2.18	bodyPrinter([16] より抜粋)	20
2.19	オンスキンセンサー ([17] より抜粋)	20
3.1	XR 空間での理想的なインタラクションのイメージ	21
3.2	日常生活で触覚提示によって知覚される情報のイメージ	22
3.3	触覚の常時共有による認知のイメージ. 長時間提示されることによ って情報が違和感として知覚される.	23
3.4	デジタル空間を用いたふれあい	24
3.5	知覚が共有された身体による協調タスクのイメージ	25
3.6	触覚のミキシング. 実空間とデジタル空間からの触覚を同時に受 け取ることで新たな触覚体験が可能になる.	26
3.7	現在の実空間とデジタル空間に対するインタラクション	27
3.8	生来の皮膚感覚と並列的にデジタル空間の身体感覚を与えるデジ タルスキンのコンセプト	28
3.9	皮膚上にセカンドスキンとして実装されるデジタルスキン	29
3.10	デジタルスキンの使用イメージ. 化粧品のようにさまざまな機能 を肌に拡張できる.	30
3.11	バイオミメシス ヴェール ⁶ 美容液 (左) 高性能小型機器 (中央) 化粧液 (右)	31
3.12	ファインファイバーを使用した様子 ⁷	32
3.13	静電容量タッチセンサの構造	35
3.14	皮膚上タッチセンサの構造	35
3.15	生体信号計測用電極パッド ⁸	37
3.16	電極とケーブルによる配線の断面図	38
3.17	肌上に実装された電極と配線の断面図	38

4.1	化粧用スポンジ	43
4.2	Electric Paint ⁹	44
4.3	抵抗値測定用電極	45
4.4	導電性をもった人工皮膚（塩化ナトリウム水溶液添加浸透液）	46
4.5	導電性をもった人工皮膚（導電性インク）	46
4.6	ファイファイバー単体での人工皮膚（浸透液なし）	46
4.7	導電層抵抗値の変化（塩化ナトリウム水溶液添加浸透液，導電性インク）	47
4.8	導電層抵抗値の変化（浸透液なし）	48
4.9	ワセリンを使用して実装された絶縁性を持った人工皮膚	49
4.10	絶縁層の抵抗値の測定	50
4.11	ワイヤ電極	51
4.12	絶縁層	52
4.13	皮膚上に実装した LED 点灯回路	52
4.14	皮膚上に実装した LED 点灯回路：オフ状態	53
4.15	皮膚上に実装した LED 点灯回路：オン状態	53
4.16	肌上タッチセンサ	54
4.17	タッチセンサの値	55
4.18	作成したコイル	57
4.19	筐体に設置した電磁石	57
4.20	砂鉄を使用した人工皮膚	58
4.21	砂鉄を包み込んだ人工皮膚に永久磁石を近づけた様子	59
4.22	永久磁石を使用した磁性をもった人工皮膚	59
4.23	振動の受け取り	60
4.24	複数の磁石によって振動を受け取る際の磁力エネルギー	61
4.25	複数のコイルによって出力される磁力	62
4.26	複数の電磁石を制御する max パッチ	63
4.27	コイルアレイ	64
4.28	永久磁石の取り付け方法	65

4.29	掌に取り付けた磁石（左）と触覚を受け取っているときの様子（右）	65
4.30	前腕部に取り付けた磁石（左）と触覚を受け取っているときの様子（右）	65
4.31	各条件での正答率（エラーバーは標準偏差）	67
4.32	正しい振動位置（左）と誤った回答（右）の例	68
4.33	振動の移動方向が正しい回答の正答率（エラーバーは標準偏差）	68
5.1	システム概要図	71
5.2	触覚生成ソフトウェアのパッチ	72
5.3	RFID リーダと電磁石が組み込まれた筐体	72
5.4	筐体を取り付けた様子	73
5.5	RFID タグ	73
5.6	手首から手の甲にかけて貼り付けたネオジム磁石と RFID タグ	74
5.7	使用している様子	74
5.8	システム概要図	76
5.9	触覚生成ソフトウェアのパッチ	77
5.10	皮膚を押し込んだ際の触覚信号	77
5.11	ウェアラブル化した電磁石	78
5.12	装着した電磁石とタッチセンサ	79

第 1 章 序

論

1.1. デジタル空間を介した情報のやりとり

現在，私たちは非常に多くの情報をやりとりしながら生活を送っている．この情報のやり取りに利用されるインターネットは 1990 年代に接続サービスの提供が開始し，それ以降情報通信技術の発展によるデバイスの小型化・低価格化・高性能化と通信サービスの低価格化により，広く普及した [18]．現在では，LINE や Twitter，Facebook をはじめとしたソーシャルネットワーキングサービスを通して友人間や家族間での会話や，仕事上のやりとりなどにも利用されている．また，2020 年には新型コロナウイルスの発生により物理的な対面に感染のリスクが生まれ，多くの活動がインターネットを介して行われた．このようにインターネットを使用し，デジタル空間を介した情報のやりとりは我々の生活に不可欠なものとなっている．

また，端末を通して人同士が繋がるシーンに対して，“モノ”がインターネットに接続される IoT という概念が生まれている．この概念では，多くの”モノ”の情報がインターネットを通して接続され，モニタリング・リモート制御・連携することにより利便性や効率性の向上が期待されている [19]．このように物理空間の環境をインターネットを通してデジタル空間に再現した空間はデジタルツインと呼ばれ，実空間の環境はデジタル空間によって制御され，デジタル空間は実空間に大きな影響を与えている．

今後は人工知能技術などの情報処理技術，無線通信技術，ロボット技術などの発展に伴い，デジタル空間内で処理された情報が実空間に対してより様々な影響を与えることが可能となり，デジタル空間の存在はより重要性を増すと考えられる．

1.2. 融合する実空間とデジタル空間

かつて、コンピュータ内に構築されたデジタル空間は、我々が物理的に存在する実空間から独立した空間として存在していた。空間をデータとして生成したデジタル空間での行動はデジタル空間内でのみ適用され、実空間で体験することが難しい体験が可能である。このデジタル空間はバーチャルリアリティ(Virtual Reality:VR)空間とも呼ばれ、我々が日常を過ごす実空間と切り離して存在しており、VR空間に対する没入感を向上させる取り組みが行われていた。しかし、コンピュータの高性能化や実空間でのデジタル機器の普及により、VR空間の実空間に対する影響が増加することで、独立していたそれぞれの空間は相互作用し合い、重なり合うような状態になりはじめている。このような空間は複合現実(Mixed Reality:MR)空間と呼ばれており、このように様々な現実(リアリティ)が存在するクロスリアリティ(XR)空間という概念が生まれ始めている。我々はこのような空間内で生活し、我々が持つ感覚を通して環境を認知し、行動している。

1.2.1 視覚によるデジタル空間認知

ヘッドマウントディスプレイ(HMD)は頭部に装着して使用する映像出力装置であり、デジタル空間を視覚を用いて知覚できる装置である。HMDでは搭載されたジャイロセンサやマーカーなどにより頭部の動きの取得が可能である。取得された身体の動きに合わせて映像を空間的に変化させ描画することで、使用者は実空間を見回すようにデジタル空間の知覚が可能である。

HMDでは、ディスプレイのみの映像が表示されるため、体験者は仮想現実空間への高い没入感を得ることが出来る一方で、実空間の情報は知覚することができない。そこで、視覚によって複合現実を体験できる製品としてHTC社のVive Proがあげられる。この製品では搭載したフロントカメラから取得した映像に対し画像の合成を行うことで、現実の空間とデジタル空間が複合した空間を知覚することが出来る(図1.1)。また、Magic Leap社のMagic Leap1はシースルー型のディスプレイを用いたヘッドマウントディスプレイである。この製品ではディスプレイ越しに透過して実際に見える実空間とディスプレイに表示される画像を

同時に知覚することが出来る（図 1.2）．これらの AR/MR ヘッドセットを利用することによって実空間とデジタル空間を複合した空間を視覚を通して認知することができる．

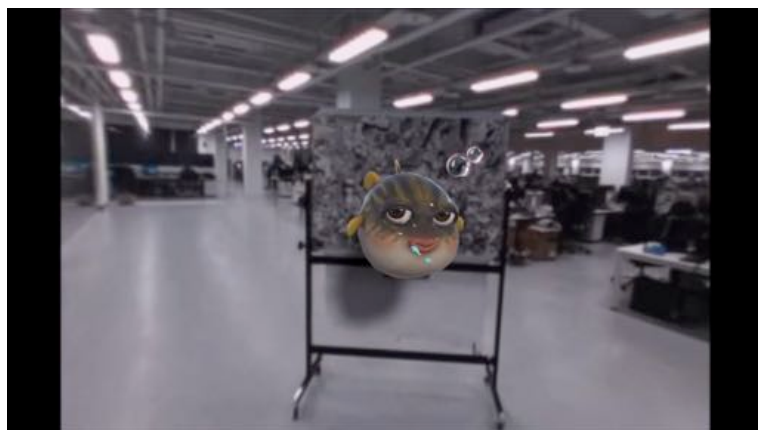


図 1.1 Vive Pro のステレオカメラ用 SDK 「VIVE SRWorks SDK」に収録された AR アプリケーションのデモ²．



図 1.2 Magic Leap 1 の使用例のイメージ³

2 出典：Interaction and Occlusion - YouTube, 2021/01/06 アクセス, <https://www.youtube.com/watch?v=ORVWz03MOHI>

3 出典:Magic Leap 1 — Magic Leap, 2021/01/06 アクセス, <https://www.magicleap.com/ja-jp/magic-leap-1>

1.2.2 聴覚によるデジタル空間認知

視覚以外の感覚においても空間の知覚は可能である。聴覚は、我々の音に対する感覚である。音は空気を通して伝えられ、音源からの距離や方向、空間の広さや障害物の有無などによって変化し、我々は2つの耳で聞き取れる音の違いによって空間を認知することができる。この特長を生かし、複数のスピーカーを視聴者を囲むように配置し、臨場感を与えるサラウンドスピーカーシステム（図1.3）や、人間の頭部に近い形状を持ったダミーヘッドマイク（図1.4）によって定位感のある音源を録音するバイノーラル録音などの技術が存在している。これらの技術により、我々はデジタル空間を聴覚によって知覚することが出来る。



図 1.3 5.1ch サラウンドのスピーカー配置⁴

近年では、聴覚を利用し実空間とデジタル空間からの知覚を同時に行えるインタフェースが提案されている。Bose Frames（図1.5）は音響機器メーカーのBoseが発売したサングラス型のウェアラブルスピーカーである。この商品ではサングラスのフレーム部にスピーカーが内蔵されており、サングラスをかけるとこのス

4 出典:5.1 チャンネルスピーカー配置ガイド, 2021/01/06 アクセス, <https://www.dolby.com/jp/ja/guide/surround-sound-speaker-setup/5-1-setup.html>

5 出典:ノイマン総合サイト-ゼンハイザージャパン StartPage, 2021/01/06 アクセス, <http://neumannjapan.com/neumann.user.ItemDetail/id/29.html>



図 1.4 バイノーラルステレオマイク KU100⁵

ピーカーが使用者の耳の上に位置するように設計されている。この製品では、従来のイヤホンやヘッドホンのように耳を占有し音楽などに没頭するのではなく、他人との会話や周囲の音も聞きながら音楽を楽しむような使用シーンが想定されている。



図 1.5 Bose Frames⁶

また、Appleが発売したイヤホン AirPods Pro（図 1.6）には、イヤホン外の音

6 出典:Bluetooth オーディオサングラス — ボーズ, 2021/01/06 アクセス, https://www.bose.co.jp/ja_jp/products/frames.html

を遮断するアクティブノイズキャンセリング機能に加え、マイクによって周囲の音を取得し音楽などとミックスして出力する外音取り込みモードが搭載されている。この製品においてもイヤホンを装着し、音楽を楽しみながら現実空間での会話をするような使用シーンが想定されている。また、このイヤホンにはジャイロセンサや加速度センサが搭載されており、このイヤホンはこれらのセンサを利用して Spatial Audio 機能を提供している。Spatial Audio はデバイスでイヤホンを使用しながら映画を視聴する際に頭部の動きや再生しているデバイスの位置などによって定位感を変化させる機能である。この機能は映画館で映画を見ているかのような定位感を与えている。

図 1.6 AirPods Pro ⁷図 1.7 SpatialAudio による音の定位感 ⁸

このように、実空間に対する知覚と共存しデジタル空間に対する知覚も与えることで、現実空間とデジタル空間が重なり合った空間を聴覚によって知覚可能なデバイスが提案されている。

7 出典：AirPods Pro - Apple (日本), 2021/01/06 アクセス, <https://www.apple.com/jp/airpods-pro/>

8 出典：WWDC 2020 Special Event Keynote — Apple - YouTube, 2021/01/06 アクセス, <https://www.youtube.com/watch?v=GEZhD3J89ZE>

1.3. 人間拡張

XRの普及によって技術の適用対象は現実空間における人間自身になってきており、人間拡張という概念が浸透しつつある。人間拡張とは人間の能力をテクノロジーによって自由に増強・拡張させる概念である [20]。人間拡張は4つの拡張対象があり、外骨格・義手義足・ウェアラブルなどによって構造的に身体能力を増強・補綴する身体の拡張、テレプレゼンスやレイグジスタンスのように遠隔地でも物理的な存在と同様に作業が可能な存在の拡張、知覚できない情報を他の感覚によって知覚する感覚の拡張、能力の習得や理解をたすける認知の拡張に分類される。これらの技術は単体で拡張されるだけでなく、複数の拡張を組み合わせることによって人間に新たな能力を提供している。今後は人間の身体そのものがデジタル空間に適応していくと予想できる。

1.4. 本研究の目的

このように、我々はデジタル空間を利用しながら生活しており、今後はよりデジタル空間の重要性が増すことが予想され、我々の身体も技術によって変化していくと考えられる。クロスリアリティ空間に存在する人間の身体感覚は実空間とデジタル空間とのインタラクションを行うため、それぞれの空間の情報を知覚可能な感覚器官へ拡張が必要となる。そこで本研究では実空間とデジタル空間を身体感覚によって知覚可能な感覚器官としてはたらくインタフェースの開発を目的とし、このインタフェースを通じたインタラクションを実現する。

1.5. 本論文の構成

第1章では情報通信技術の普及により、実空間とデジタル空間が混ざりあったXR空間で我々は生活していることについて述べ、身体感覚による実空間およびデジタル空間の知覚を行うインタフェースの実現を本研究の目的とした。第2章では、我々の身体感覚である触覚の原理や触覚によって得られる認知について述べる。また、デジタル技術によって触覚の再現を行う触覚ディスプレイ、触覚の記録

と再現による共有，皮膚上インタフェースについて述べる．第3章では，本研究で提案するインタフェースによって我々はどのような認知を得ることができるか整理し，開発のコンセプトと具体的な設計についてまとめる．第4章では，提案手法のそれぞれの機能を実装について述べる．第5章では提案するインタフェースを用いアプリケーションを開発し，コンセプトの確認を行う．第6章では，本研究のまとめと今後の展望を述べる．

第 2 章

関 連 研 究

本章ではまず身体感覚の一つである触覚について、皮膚の構造と受容器による知覚原理を述べ、触覚が与える認知や錯覚、また、触覚が与える生理的影響についてまとめる。さらにデジタル空間内で身体感覚を実現する方法として取り組まれてきた触覚ディスプレイとその応用について述べる。加えて、ウェアラブルデバイス分野において近年提案が行われている皮膚上インタフェースについて述べる。

2.1. 触覚の原理と認知

2.1.1 皮膚の構造と触覚受容器

ヒトの触覚は皮膚表面の感覚である皮膚感覚と内部の感覚である深部感覚に分類できる。この皮膚感覚では圧力・振動・温度や痛みなどの情報を得ることが可能であるのに対し、深部感覚では身体各部の位置や運動などの感覚が得られる。皮膚はその構造から2つに大別でき、それぞれの皮膚では構造の違いから知覚できる情報も異なる。1つ目は手のひらや足の裏などの体毛が生えない皮膚であり、無毛部と呼ばれる。無毛部に対して毛が生えた皮膚は有毛部と呼ばれ、人間の多くの皮膚はこの有毛部である。

皮膚の物理的変形に対して無毛部の皮膚感覚には、マイスナー小体、メルケル小体、パチニ小体、ルフィニ終末の4種類の触覚受容器が存在しており、皮膚から図 2.1 のように構成されている [1]。これらの受容器はそれぞれ特定の周波数の振動に対して応答する特性をもっており (図 2.2)、これらの受容器が複合的に反応することでヒトは 1000Hz ほどまでの振動に対する触覚受容器を持っている。

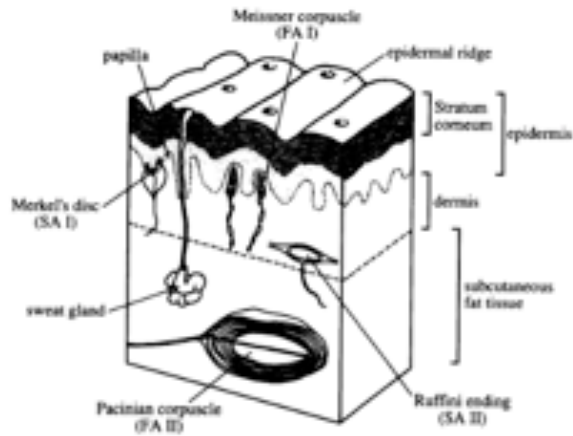


図 2.1 無毛皮膚下の組織と触覚受容器 ([1] より抜粋)

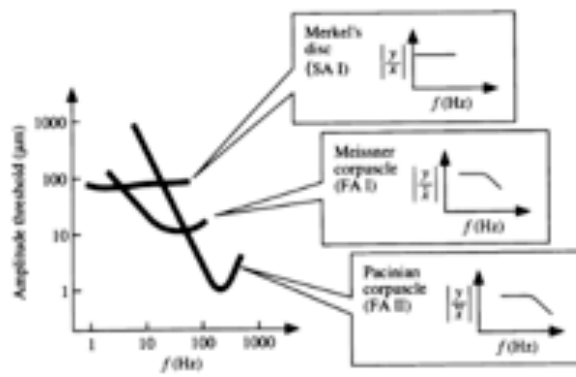


図 2.2 各受容器の周波数閾値 ([1] より抜粋)

一方、有毛部は毛根に毛包受容器をもっており、毛の動きに対する感覚がある。しかし、マイスナー小体とメルケル触盤が存在しないため、振動に対してはパチニ小体しか受容器が存在しない [21]。そのため無毛部と比較して精密な振動の知覚はできず、有毛部に対して振動を与える携帯電話の通知などでは 250Hz 前後の振動が用いられることが多い。

2.1.2 触覚による知覚

触覚による知覚は身体の動きによって静止した物体に接触した時に起こるものと、外部から物体が皮膚に触れることで起こるものに分類することが出来る。前者の知覚は、能動的触知覚、アクティブタッチと呼ばれ自由に手で触れることで得られる知覚である [22]。この知覚では物体に触れた際の皮膚感覚とともに自由に手を動かすことで運動感覚などの深部感覚が同時に知覚される。これに対して後者の知覚は触られる感覚であり、受動的触知覚、パッシブタッチと呼ばれる。Katz は受動的触知覚では、圧力や振動、温度受容器を個別に刺激することは可能であるが、このような知覚は日常生活内では起こらないことを主張した [23]。また、粗さの知覚において、表面を受動的ではなく能動的に触れたときに弁別がよくなることを示した。

Gibson はアリストテレスが行った感覚を視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚の五感への分類は不十分であるとした [24]。また、受動的に与えられる刺激の不自然さを指摘した。能動的な触覚では抽象化された対象を皮膚の外側に感じ、知覚が刺激されている身体ではなく対象に向かうという点で、受動的な刺激とは全く異なる感覚であると主張した。このように皮膚感覚は深部感覚と複合的に得られることで人は皮膚感覚単体とは異なった知覚を得ることが出来る。

2.1.3 触覚による認知

Pseudo-haptics とは視覚情報によって擬似的な触力覚を与える現象である [25]。この現象は、人間の実際に触れなくてもこれまでの経験や記憶に基づき音や見た目などから対象の質感を推測できる能力によって生じる。この仕組みを利用した

作品として、安室奈美恵の楽曲「Golden Touch」のミュージックビデオが挙げられる。この動画では、動画再生を行う画面中央に指を当てることで、ゼリーに触れる映像や触れた風船が割れる映像、金魚につつかれる映像から実際に柔らかさや風船が割れる触力覚を得ることが出来る。

Botvinickらは実験参加者の手とラバー製の手を机上に並べ、参加者から参加者の手を隠した状態で双方の手に触覚を与えると実験参加者はラバー製の手を自分の手の用に感じてしまうラバーバンドイリュージョンを発見した [26]。触覚は視覚など他の感覚と組み合わせて知覚することで自分の身体であるという認知(身体所有感)を与える。

伴らは Pseudo-haptics を応用し、視覚情報によって触覚を通した物体に対する知覚を変化させている。この研究ではシースルーディスプレイを用いて視覚情報を編集し、ユーザーが触れている物体の形状を変化させ、実際には別の形状に触れているが、視覚情報で得られた物体の形状に触れている触覚を与えている (図 2.3) [2] [27]。



図 2.3 シースルーディスプレイを通して物体に触れている様子 ([2] より抜粋)

さらに、松本らは視覚情報を変化させ触覚情報とともに得ることで、空間の認知をさせている [3]。この Unlimited Corridor では現実空間内にカーブした壁を設置し、体験者はこの壁を手で触れながら歩く (図 2.4)。このとき、ヘッドマウントディスプレイを通して直線的な空間を視覚情報によって提示すると、体験者は直線的に歩いているような空間の知覚を得る。

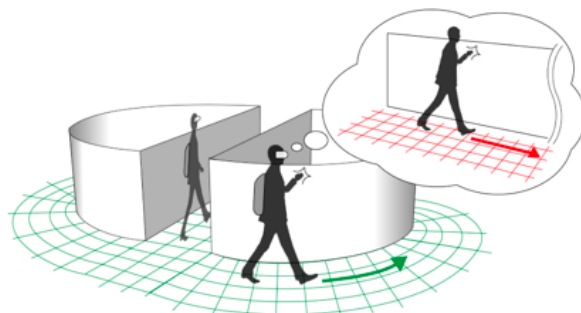


図 2.4 Unlimited Corridor のコンセプト ([3] より抜粋)

このように触覚は物体形状の知覚や空間の認知に対して大きな影響を与えている。

2.1.4 触覚が与える生理学的影響

触覚は我々に空間認知だけをもたらしているのではなく、ふれあいという言葉があるように心理的な影響をもっていると考えられる。タッチケアとは、新生児や乳児に対して行われるマッサージであり、施術することによって生理機能を高める効果があると経験知として知られている [28]。また、母子間での相互作用や愛着形成、新生児のストレス緩和などの効果があるといわれており生理学領域において科学的な原理解明が進められている。また、触覚により柔らかさや心地よさを知覚することで唾液のオキシトシンが増加するという報告などもある [29]。触れることを通して我々は物体や空間の認知を行うだけではなく、生理的にも影響を受けている。

2.2. 触覚ディスプレイとその応用

触原色原理とは、視覚における光の三原色では我々がもつ受容器それぞれに対して刺激の提示を行うように、皮膚感覚を生理的な知覚原理から分解・計測し、それぞれを提示することで触覚を再現する技術概念である。触原色原理では、皮膚感覚を「力」、「振動」、「温度」の3種類の物理量を基底とし、それぞれが複合的に知覚されることで触感が認知される [30]。この触原色原理に基づいた触覚ディスプレイは数多く提案されている。

2.2.1 設置型触覚ディスプレイ

VR環境と組み合わされた触覚ディスプレイは1990年前後から開発されている。図2.5の [4] [5] これらのデバイスでは設置された機械によって使用者の身体に対して力をレンダリングすることによって、触覚提示を行っている。これらのインタフェースによって、デジタル空間内のコンピュータグラフィックスオブジェクトを身体感覚によって知覚することを可能としている。



図 2.5 PHANTOM([4] より抜粋)

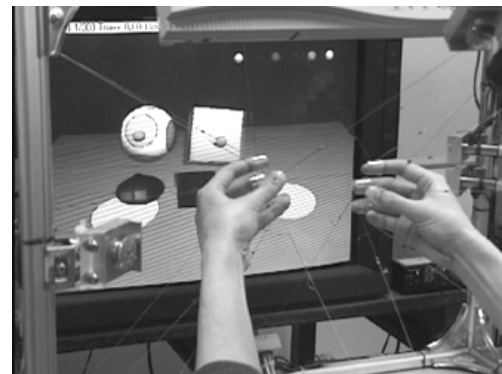


図 2.6 SPIDAR([5] より抜粋)

2.2.2 ウェアラブル触覚ディスプレイ

近年では複合現実などの概念の浸透に伴い、触覚ディスプレイの使用シーンが多様化する背景から、身体に装着可能なウェアラブル触覚デバイスも提案されている。南澤らは2つのモーターを指に配置し、この軸間にベルトを取り付け、モーターによってこのベルトを駆動させ、使用者の指に対して触覚提示を行う Gravity Grabber を提案した(図 2.7) [6]。この触覚ディスプレイでは、モーターの制御方法によってユーザの指に対して垂直力とせん断力の提示を可能にしている。村上らの Altered Touch は Gravity Grabber の触覚提示機能に振動提示機能と温度提示機能を追加した触覚ディスプレイである(図 2.8) [7]。この研究では、レンダリングされた視覚情報と共に使用し、実物の触覚特性を変化させる”Altered Touch”をコンセプトとしている。



図 2.7 Gravity Grabber([6] より抜粋)



図 2.8 Altered Touch([7] より抜粋)

これらの触覚ディスプレイではモーターやボイスコイルなど、機械的な機構によって触覚提示を行っていた。これに対して HAPTIC PLASTeR [8] は、軟性素材を用いることで柔らかさと薄さをもった触覚ディスプレイである(図 2.9)。この触覚ディスプレイでは、ゴムを2枚の電極で挟み、電圧をかけることで2枚の電極が引き合うことを利用している。この研究では日常生活に溶け込む触覚ディスプレイとしてさまざまなアプリケーションが提案されている。

また、指先以外へ装着を行う触覚ディスプレイも提案されている。Synesthesia Wear は全身に装着しカスタマイズ可能な触覚インタフェースである(図 2.10) [9]。



図 2.9 HAPTIC PLASTeR([8] より抜粋)

このインタフェースはジャケットとして実装され、触覚提示モジュールは導電性を持った織物を通して電源供給や通信が行われる。このジャケットにはバッテリーが搭載され、完全にワイヤレスでの使用が可能であり、実空間内を自由に歩き回るような体験を通して現実と仮想現実が重なり合うような体験ができる。



図 2.10 Synestasia Wear([9] より抜粋)

Force Jacket は上半身全体に対して圧力を与えることで没入感の向上を目指したジャケット型の触覚インタフェースである [31]。このジャケットでは、エアバッグによるアクチュエータによって触覚の提示を実現している。

このようにウェアラブル化された触覚ディスプレイによってデジタル空間に対する身体感覚がコンピュータの前から開放されることによって、現実空間とのインタラクションが可能なデジタル空間の身体感覚が実現されている。

2.2.3 インターネットを介した触覚の共有

音声や動画で行われるコミュニケーションのように触覚の記録や再生によるコミュニケーション方法も提案されている。

花光らの TWECH は触り心地を動画で記録・共有・検索するためのプラットフォームである [10]。開発した触感記録再生デバイスを iPodTouch に取り付けることで触感が含まれた動画の記録を行い、この動画を SNS 等によって共有する (図 2.11)。共有された動画を再生するとデバイスに内蔵されたアクチュエータによって触感を体験することが出来る。

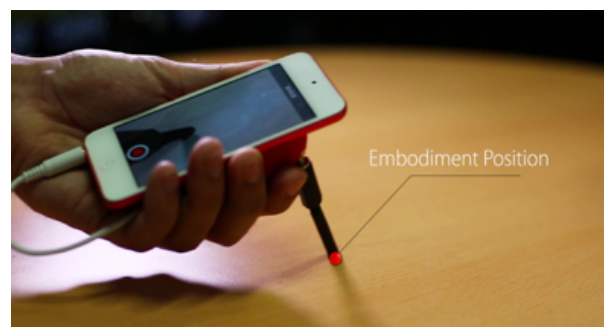


図 2.11 TWECH([10] より抜粋)

触感 TV は映像と音声，触覚が統合されたコンテンツを供給するシステムであり，NTT インターコミュニケーション・センターにて展示された [32]。ソファとクッション，リモコンにそれぞれ振動子内蔵されており，花火大会の映像や自然の映像などを振動とともに体験することができる。

また，事前に記録された触覚を再現して体験方法の他にも，リアルタイムな触覚の共有も提案されている。

早川らは遠隔地でのバスケットボールの試合の観戦に試合会場の床面の触感情報を遠隔地に伝送及び再生するシステムを構築した (図 2.12) [11]。このシステムによって触感の再生を行うと，まるで自分が試合コートの中にいるかのような臨場感を体験することが出来る。

公衆触覚伝話は音声，映像，振動をリアルタイムに共有する事が可能なシステムであり，NTT インターコミュニケーション・センターにて展示された (図 2.13) [33]。



図 2.12 試合会場(左)と観戦会場(右)([11] より抜粋)

このシステムは多拠点で使用し、遠く離れた人とのコミュニケーションの拡張の可能性を探ることを目的としていた。



図 2.13 公衆触覚伝話 ([33] より抜粋)

また、小野寺らは日常生活を邪魔しない振動を用い相互に動作や状況を伝えるコミュニケーション手法を提案した [34]。この研究では前腕と首に加速度センサをとりつけ、動作によって得られる加速度を計測し、この信号を相手の触覚提示装置に共有し続けることによって触覚によるコミュニケーションを行った。

これらの研究では現実空間で得られる触覚情報を計測し、ネットワーク上で共有することで遠隔地での触覚体験を提供することで、時間的・空間的に離れた現実空間のオブジェクトの触覚体験を実現している。

2.3. 皮膚上インタフェース

近年、ウェアラブルデバイス研究においても人間拡張のような概念が浸透し、デジタル機能を搭載したデバイスを装着する手法から身体上に直接デジタル機能を実装する方法が多く提案されている。Xin らは衣服やアクセサリに組み込まれた電子機器のことを「ウェアラブル」と定義し、皮膚や付属品に搭載された電子機器のことを「スキンインタフェース」と定義し、開発する際のウェアラブル性について検討を行った [35]。スキンインタフェースには軽量さや皮膚への貼り付き、身体へのアクセス性、インタラクション機能、外見への影響、導電性や絶縁性断熱性などの機能や、通信方法、電源の供給機能など様々な機能が必要であるとまとめている。この論文では、これらの要素を満たすためにスキンインタフェースの開発には電子工学分野の発展や美容製品のような身体とシームレスなデバイスの開発、生理学的な知見など、さまざまな領域の融合が必要であると述べている。

特に、皮膚上に電子回路を構築する技術はフレキシブルエレクトロニクス分野にて研究されており、ヒューマンインタフェースへの応用が取り組まれている。Kao らは皮膚上での電子回路の実装を皮膚に導線を貼り付ける手法や (図 2.14) [12], 金箔によって作成したタトゥーによって構成している (図 2.15) [13]。



図 2.14 SkinWire([12] より抜粋)



図 2.15 Duoskin([13] より抜粋)

Martin らは電子回路機能を含んだタトゥーの貼り付けを行っている (図 2.16) [14]. Aditya らは銀ナノ粒子を含んだ導電性インクをインクジェットプリンターにより印刷し、皮膚にはりつけることで筋電位の計測を行っている (図 2.17) [15].



図 2.16 Skinmarks([14] より抜粋)



図 2.17 Physioskin([15] より抜粋)

また、肌上への回路の実装方法についても研究が行われており、Youngkyung らは、皮膚に直接導電性インクを印刷するプリンタを開発し、回路の実装を行っている(図2.18) [16]. Miyamoto らは、導電性ナノメッシュ構造を用いてオンスキンセンサーを開発した(図2.19) [17].

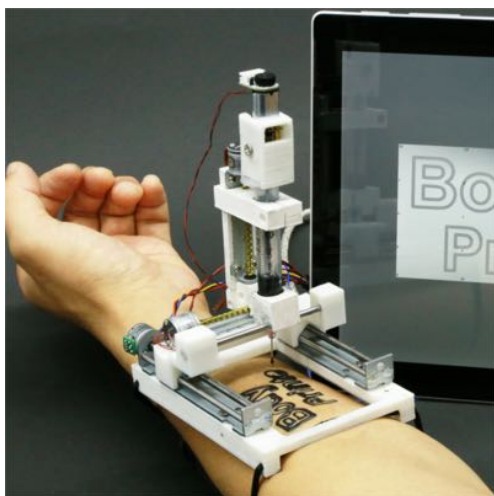


図 2.18 bodyPrinter([16] より抜粋)



図 2.19 オンスキンセンサー([17] より抜粋)

ウェアラブルデバイス分野のこれらの事例からも実空間とデジタル空間の境界としてデバイスが存在するという概念がなくなり、ハイブリッドな空間に人間の身体が適用する概念がうまれつつあることがわかる。

第 3 章

コンセプト

本章では本研究で提案するコンセプトによって我々はどのような認知を得ることができるかを述べ、実現する際の要件の整理を行う。

3.1. XR 空間での理想的なインタラクション

第 1 章で述べた通り、今後は実空間に対してデジタル空間の重要性が増し、我々が過ごす空間は XR 空間としての性質が大きくなる未来が想像できる。図 3.1 にこのような XR 空間での理想的なインタラクションを示す。このような未来像では、人の身体は実空間とデジタル空間に同時に存在し、それぞれの環境から様々な感覚によって情報を受け取ってインタラクションを行うと考えられる。このインタラクションは実空間に対するインタラクションのように自然に行われると同時に、デジタル空間に対してもインタラクションを行うことで、実空間とデジタル空間双方に対して一体感をもったインタラクションを行うことができる。

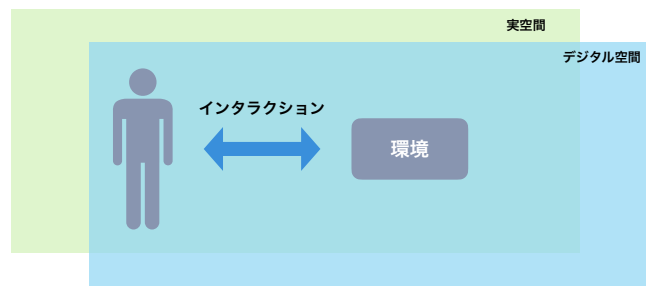


図 3.1 XR 空間での理想的なインタラクションのイメージ

3.2. 新たな認知の獲得

本節では、前述した XR 空間での理想的なインタラクション，特に実空間とデジタル空間から同時に得られる身体感覚によるインタラクションによって我々が得られる認知について検討する。

日常的な情報の知覚

まず，現実空間の知覚を阻害しないことによって，日常生活内でより長期的な利用が可能になる．これによって得られる認知は，スマートフォンやスマートウォッチから行われる通知の延長である．この認知では，センサによって計測可能なさまざまな情報がシステムを通して皮膚へと伝達され，我々が恐怖を感じたときに現れる鳥肌や，通常感覚では知覚できない曖昧な悪寒のようなものを身体的な感覚として認知できるだろう．この認知はデジタル空間からのパッシブタッチとして捉えることができる．

また，このような知覚は位置や動きと組み合わせることで，気象情報などのデジタル空間内の広域な情報や局所的な障害物などを知覚することができると考えられる．この認知はデジタル空間でのアクティブタッチとして捉えられる．



図 3.2 日常生活で触覚提示によって知覚される情報のイメージ

しかし、この知覚のスマートフォンなどの通知への知覚と異なる点は常時情報を提示され続けることが可能な点である。例えば、普段我々の意識が衣服の触覚に対して向くことは少ないが、いざその存在を意識を向けると、衣服からの触覚を認知することが出来る。しかし、衣服のタグが肌にこすれているような場面では、我々は違和感にすぐに気づくことができる。

このように我々が得ている触覚の多くは無視されているが、普段との違いに対して強い感度を持っている。スマートフォンなどからの通知はストレスを与えることが知られているが [36] [37]、この認知ではストレスの少ない情報の知覚が可能だと考えられる。このように非常時を知覚したいようなケースとして高齢者や子どもの見守りが考えられる。我々は他人と接するなかで顔色や声などの情報から統合的に相手の体調を感じることが出来るが、遠隔地にいる家族の安全や健康状態を認知できると考えられる。

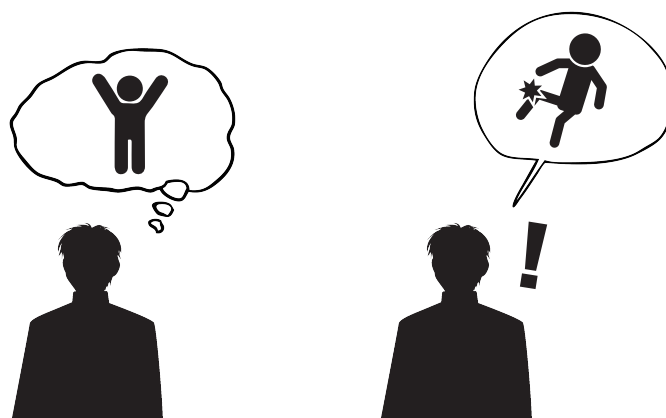


図 3.3 触覚の常時共有による認知のイメージ。長時間提示されることによって情報が違和感として知覚される。

遠隔触覚コミュニケーション

家族などとのやり取りの目的は安全や健康の把握だけではない。「ふれあい」という言葉があるように触覚はコミュニケーション手段としての一面もっており、我々は他者に対する動作への反応を楽しんでいる。そこで、伝えたい触覚をデジタル空間を介して相手に対して伝え、相互に行われることでコミュニケーションを実現できると考えられる。さらにこのとき、皮膚への触覚入力を計測可能であれば、触覚がリアルタイムな双方向共有が実現される。

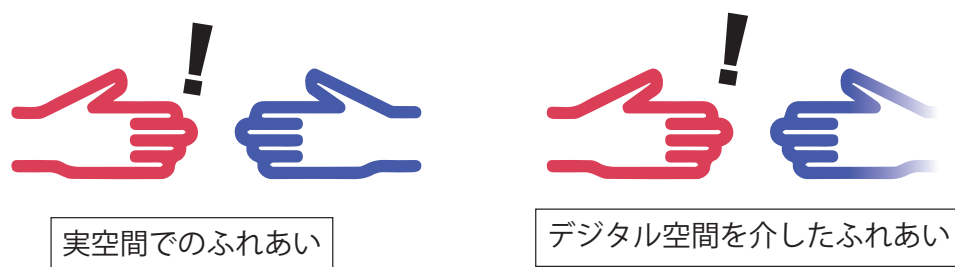


図 3.4 デジタル空間を用いたふれあい

触覚による身体感覚の共有

身体感覚のリアルタイムな双方向共有では、実空間から本人が受け取った身体感覚と共に、他者の身体感覚をデジタル空間を通して知覚することが出来る。共有身体とはひとつの身体を複数人によって共有する概念である。VR空間内で複数人に操作される1つのアバターや、1台のロボットを複数人で操作するような応用が期待されており、タスクの効率化などが期待されている。Parallel Eyesでは、複数人の視界を共有しタスクを行うことで視覚による認知の拡張を目指した [38]。この研究内のタスクでは他人の視覚情報を利用して記憶や判断を補完するような行動が確認されている。身体感覚の共有はこの研究で共有された視覚情報のように協調が必要なタスクを行う際の行動に影響を与える可能性がある。

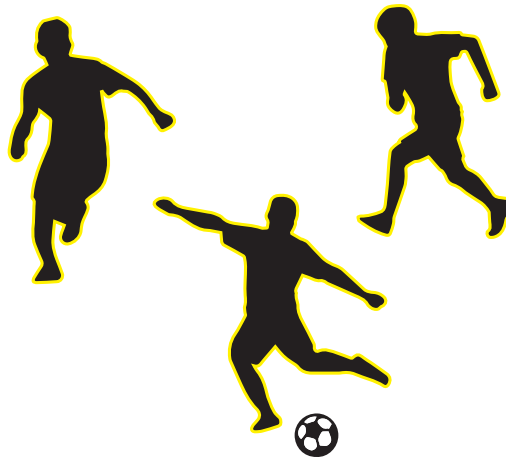


図 3.5 知覚が共有された身体による協調タスクのイメージ

身体感覚の複合

この身体感覚では実空間とデジタル空間の双方から得られる触覚を同時に得ることが可能である。実空間から得られる触覚にデジタル空間から得られる触覚を付加することで触覚体験を変化させる可能性がある。図 3.6 に複合された触覚の体験イメージを示す。この例では現実世界でぬいぐるみを撫でるという動作を通して、我々はぬいぐるみを撫でているという感覚を得られる。この現実空間からの触覚に同期させてデジタル空間から他のテクスチャ特徴を持った感覚を提示を行う。このような利用を行うことで、現実では「ぬいぐるみを撫でる」という動作から様々な触覚体験が可能ではないだろうか。

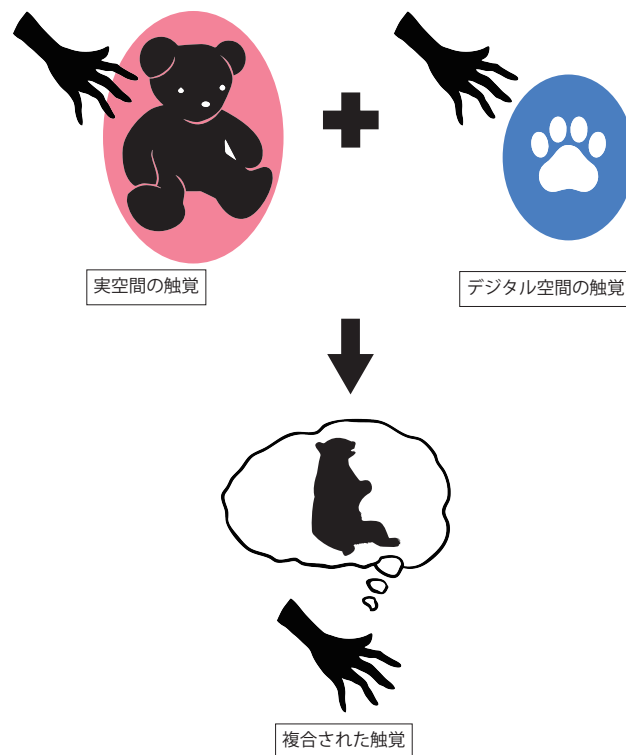


図 3.6 触覚のミキシング. 実空間とデジタル空間からの触覚を同時に受け取ることで新たな触覚体験が可能になる。

3.3. 現在のインタラクションの問題点

現在のインタラクションは図 3.7 に示すように、実空間に対しては環境を直接知覚しインタラクションを行い、デジタル空間に対してはデバイスを通して環境を知覚しインタラクションを行っている。このインタラクション方法の違いにより、双方の空間に対して一体感のあるインタラクションを行うことはできない。この原因として、既存のインタフェースは感覚を占有し実空間からの情報知覚を阻害してしまう点が挙げられる。具体的な例として歩行しながらスマートフォンを利用する歩きスマホや、自転車に乗りながらイヤホンで音楽を聞くようなことなどがあげられ、これらが禁止されていることから、このようなデジタル空間とのインタラクションは実空間での行動に悪影響を与えているケースも存在していることがわかる。またこれらのデバイスから提示される情報は、デバイスを経由したという事実により認知に影響を与えている。近年では、スマートフォンなどの身近なデバイスにも触覚ディスプレイが搭載されており、その触覚ディスプレイを利用して猫を触った際の触覚を再現するようなシーンを想定しよう。我々はデバイスを通して猫を触った際の感覚を得られるだろうか。おそらく知覚されるのは猫の触感ではなく猫の触感を再現したスマートフォンの触感であろう。このような原因から実空間とデジタル空間に対するインタラクションには解離が起き、一体感のあるインタラクションが実現出来ないのが現状である。

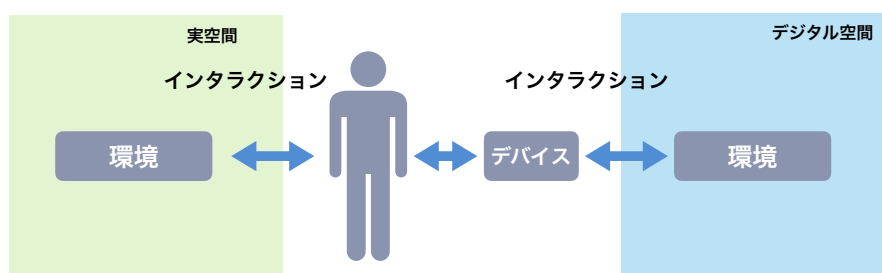


図 3.7 現在の実空間とデジタル空間に対するインタラクション

3.4. デジタルスキンのコンセプト

3.1 節では、XR 空間での双方の空間に対して一体感のある理想的なインタラクションについて説明した。3.2 節では XR 空間を知覚可能なインタフェースが我々にもたらす認知の拡張について述べた。3.3 節ではこのようなインタラクションと現在のインタラクションを比較し、それぞれの環境の知覚方法の違いが問題であると定義した。そこで本論文では、この問題に対してデジタル空間の身体感覚を実現する概念としてデジタルスキンを提案する。人間は生まれながらにもつ皮膚感覚によって実空間からの情報を知覚している。図 3.8 のようにデジタルスキンはこの実空間に対する皮膚感覚と並列的にデジタル空間からの身体感覚を得る器官としてふるまい、人間にハイブリッドな空間での知覚を与える。

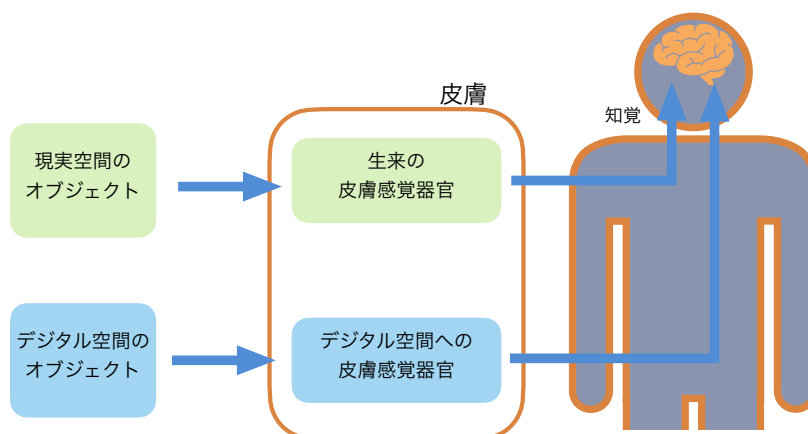


図 3.8 生来の皮膚感覚と並列的にデジタル空間の身体感覚を与えるデジタルスキンのコンセプト

人間に対し新たな知覚を実現させるにあたり、皮膚に対して感覚受容器を新たに与えることは難しい。そこでデジタルスキンは我々の皮膚上にセカンドスキンとして皮膚上に重なってひろがり、デジタル情報をアナログ情報に変換し提示することで実装する。この概要図を図 3.9 に示す。このデジタルスキンは実空間からの刺激はそのまま通過させることで、実空間からの知覚を阻害しない。更にこのとき、同時に実空間からの刺激をデジタル空間で利用可能なデジタル情報への変換する。この機能によってデジタル空間に対して、触れる/触れられる機能を実現する。

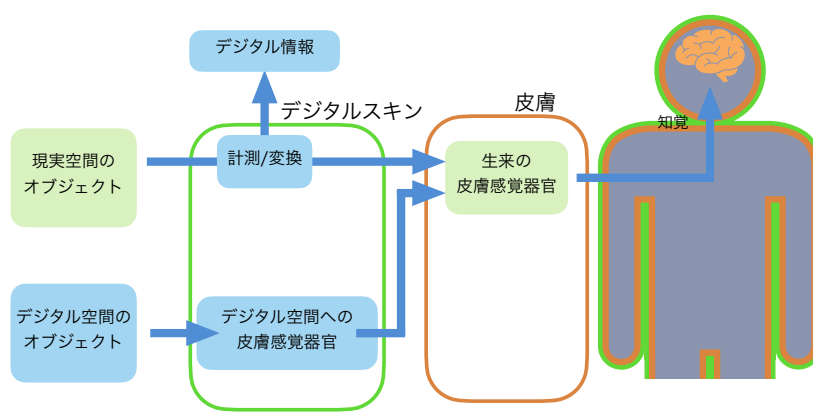


図 3.9 皮膚上にセカンドスキンとして実装されるデジタルスキン

3.5. デジタルスキンの装着方法

デジタルスキンでは、長時間の利用を考え、視覚におけるメガネのように使用していることを意識させない装着方法である必要がある。このように、使用者に対してデバイスの使用を意識させることなく、認知に影響を与えないことを知覚的透明性と定義する。使用を意識させないという点について、日焼け止めを例に考えてみる。日焼け止めは酸化亜鉛や酸化チタン、有機化合物などを含んだ化粧品であり、皮膚上に広がることで紫外線を反射もしくは吸収することによって、皮膚が受ける日焼けを抑える。この効果を人間拡張的に捉えると、我々の肌は日焼け止めを塗ることによって紫外線への耐性能力を拡張することとも考える事ができる。しかし、日焼け止めを塗った肌を自分の肌でないと考える人は少ないだろう。また、2.3節で述べたとおり、薄膜を貼り付けることによって皮膚上にデジタル機能を実現する方法は存在しているが、これらは外部の機械で製作されたデバイスを使用段階で肌に取り付けている。それに対して本論文で提案するデジタルスキンでは、インタフェースの製作工程から皮膚上で行う。このような工程によって日焼け止めを塗った肌のように、インタフェースに身体所有感を与え、外部のシステムから与られる情報に対しても主体感を持った情報の知覚が可能になるのではないかと考えられる。



図 3.10 デジタルスキンの使用イメージ。化粧品のようさまざまな機能を肌に拡張できる。

3.6. FineFiber

FineFiber（ファインファイバー）とは、花王株式会社によって開発された技術であり、極細繊維を肌に直接吹き付けることで、軽量性・柔軟性をもった人工皮膚を皮膚表面上に直接作ることができる。この技術を用いた製品は花王株式会社のプレステージブランド est からバイオミメシス ヴェールとして発売されている（図 3.11）。



図 3.11 バイオミメシス ヴェール²美容液（左）高性能小型機器（中央）化粧液（右）

図 3.12 にファインファイバーを使用し、皮膚上に薄膜を作成する様子を示す。ファインファイバーの高性能小型機器によって化粧液を吹き付けると、肌上に白い繊維が積層される。この繊維を手などによって押し、肌になじませることにより皮膚上に極細繊維による人工皮膚が形成される。皮膚になじんだ人工皮膚は、吹付け直後に比べより透明度が得られるため、視覚的に装着感を与えずに使用が可能である。また、この人工皮膚は皮膚上に非常に薄く重なることで、塗布した際にも外部からの触覚に影響を与えず、違和感なく使用することができる。使用後には日焼けした肌のように剥がすことができ、使用者はこの際に痛みなどは感じず使用することができる。

2 出典：花王 — 「エスト」から「Fine Fiber Technology（ファインファイバーテクノロジー）」
応用第一弾商品 日本およびアジアで発売，2021/01/06 アクセス，<https://www.kao.com/jp/corporate/news/products/2019/20191101-002/>

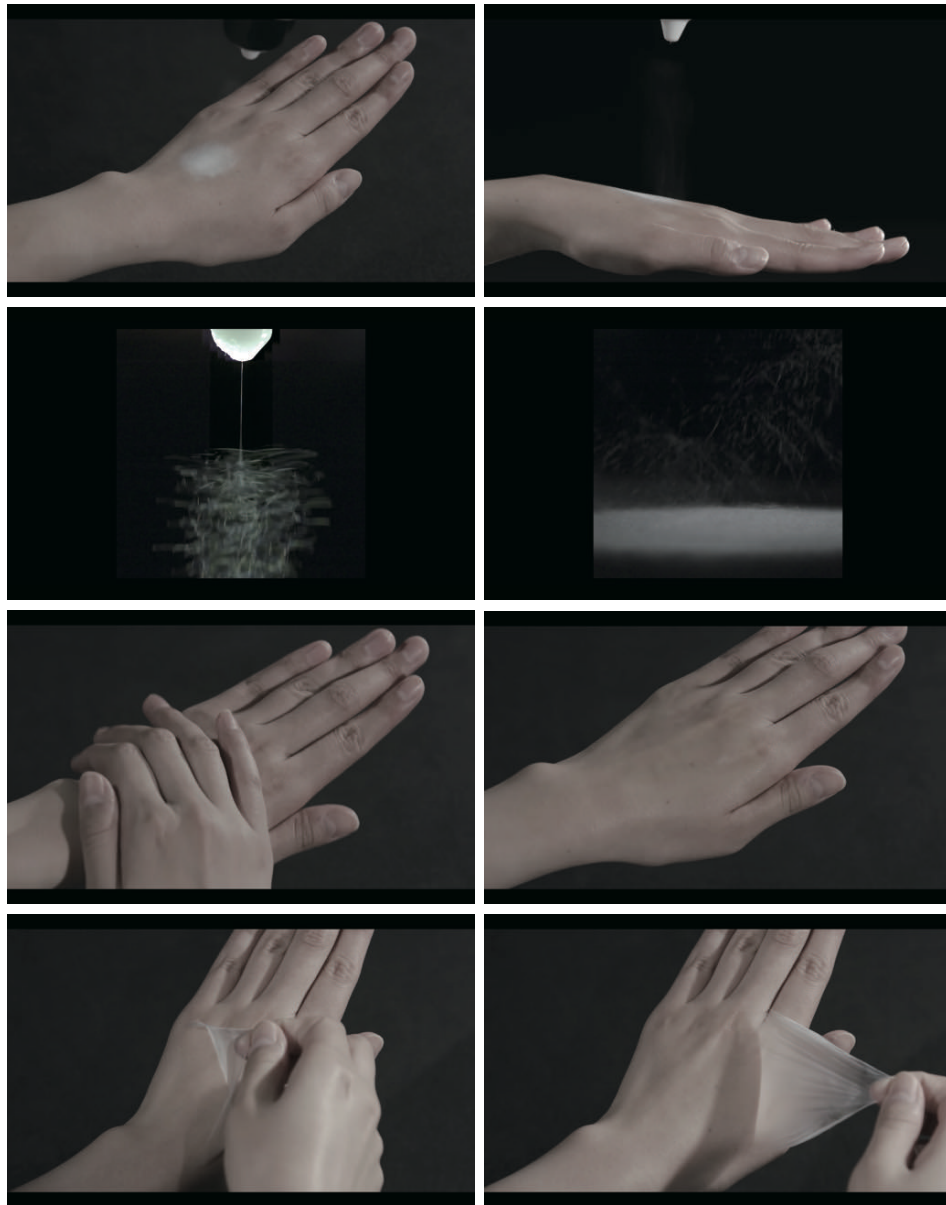


図 3.12 ファインファイバーを使用した様子³

この極細繊維の作成にはエレクトロスピニング法が使用されている。エレクトロスピニング法とは20kV程度の高電圧を印加した1mm以下程度のノズルから高分子溶剤を押し出し、極細繊維を製造する方法である [39]。ノズルから出る溶液の表面張力より印加された電圧の反発力が大きくなると、溶液はスプレー状に噴射され、アースがとられた金属部に積層される。この極細繊維は多くの空間を持っており、この空間に入った液体は毛細管現象により繊維の空間に均一に広がる。

花王はファインファイバーによって形成される極細繊維に美容液を塗ることで、化粧品が肌上に均一に広がる特性を活かしたスキンケア方法を提案した。花王はこのファインファイバー膜が肌表面の水分蒸散を制御し、角層のもととなるタンパク質の発現量に影響を与えている事を明らかにしている [40]。

我々はこのファインファイバー技術の人工皮膚に浸透させる液体によって機能が変化可能な点や、ファインファイバーの本来の皮膚の上に人工的な皮膚の層を違和感なく重ねるといった概念がデジタルスキンのコンセプトと一致した点、また、外部からの触覚に与える影響が少ない点などから、ファインファイバーを使用し拡張させることで、デジタルスキンの開発を行った。次項より、FineFiber 技術を用いたデジタルスキンの各機能の実装について設計を検討する。

3 出典：花王 Fine Fiber 技術 Kao Fine Fiber Technology - YouTube, 2021/01/06 アクセス,
<https://www.youtube.com/watch?v=q0sst04v4T0>

3.7. デジタルスキン機能の設計

3.7.1 外界から皮膚への接触の取得

外部から皮膚への入力として、デジタルスキンは実空間から触覚として得られる皮膚への接触の取得を行う。触覚として知覚される振動は 1000Hz 以下の動きである。これらの情報を取得するさまざまなセンサが存在している。TECHTILE toolkit [41] や TWECH [10] では、コンタクトマイクを使用して計測された音を触覚信号として使用している。また、触感が発生する際には動きを伴うことを利用し、加速度センサによって得られたや圧力センサなどによって計測も行われている。田中らは Polyvinylidene Difluoride(PVDF) を用いて皮膚上に生じる振動を計測する振動センサを開発している [42]。

しかし、これらのセンサは複雑な構造を持っており、皮膚上にこの機能をもたせることは難しい。そこで、1 極の電極のみで利用できる静電容量センサによる計測を行う。静電容量センサとは、電極の静電容量の変化により、電極の周囲の情報を取得するセンサである。図 3.13 に静電容量センサの構造を示す。静電容量のセンサは基板などの上に配置された電極とガラスやアクリルなどの絶縁体によって構成される。電極の電界に物体が侵入すると静電容量が変化するため導体や誘電体などの侵入を計測できる。人間も電気を流す導体であるため、ガラス面に触れると電極と皮膚との間に静電容量が生じ、この値の変化によって接触が認識される。この原理を利用し、複数の電極を用いて計測を行うことでタッチされた位置の計測も可能である。静電容量タッチセンサはスマートフォンなどのタッチパネルディスプレイに使用されるように、電極が透明であれば視覚的な影響を与えずに接触を取得することができる。

皮膚上にセンサを実装する場合の構造を図 3.14 に示す。皮膚上タッチセンサを利用する本人の接触を計測する場合、指はセンサを行う皮膚と短絡している。そのため、指での接触を計測するには導電層と皮膚を絶縁層によって分離する必要がある。また、非接触時にも体との静電容量が生じていると考えられるため、電極に直接接触れることにより接触が計測できると考えられる。

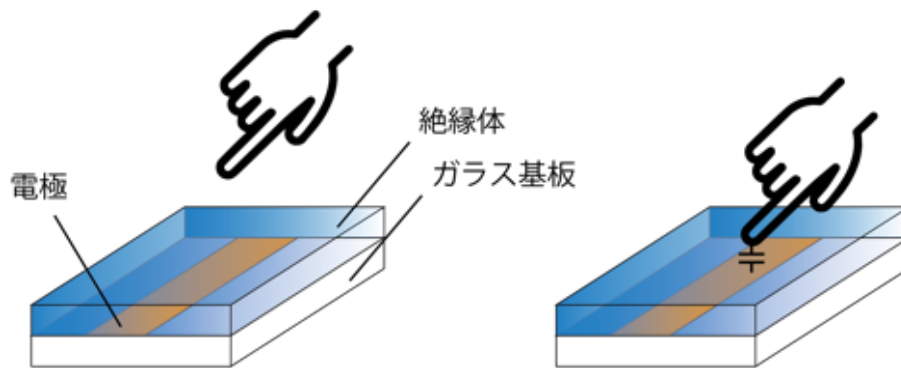


図 3.13 静電容量タッチセンサの構造

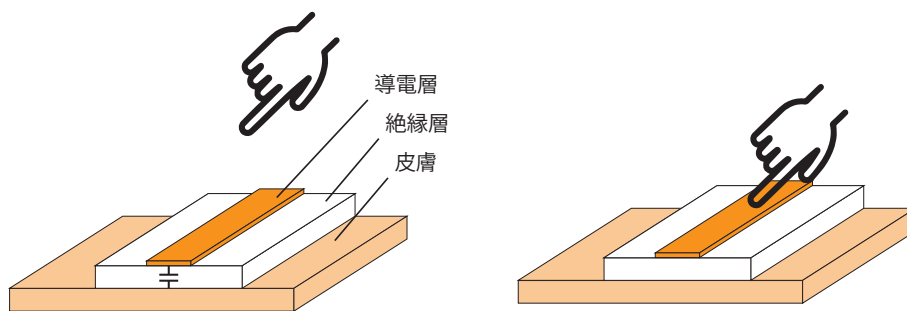


図 3.14 皮膚上タッチセンサの構造

3.7.2 皮膚感覚への介入

皮膚感覚への介入として、振動触覚の提示を行う。振動触覚ディスプレイを実現する方法にはボイスコイル型アクチュエータを用い、接触した皮膚に直接振動を与えるものや、超音波アレイを用いた方法、レーザー、空気を用いたものなど様々な方法が提案されているがある。なかでも電磁石によって磁界を発生させ、永久磁石に対して振動を与える方法では、振動体である永久磁石のみを身体に接触するだけで振動提示が可能であり、身体への配線や電力供給をする必要がない。Karunanayakaらは磁界を利用した幾何学的形状を知覚できるインタフェースを開発した [43]。このインタフェースではホールセンサを利用してデバイス上で動かされる指をトラッキングし、電磁石アレイを用いて触覚フィードバックを行っている。Weissらは、タブレット端末上の表面付近において触覚フィードバックを行う FingerFlux を開発した [44]。ユーザは手に永久磁石を取り付け、タブレット端末の裏側に配置された電磁石アレイを制御することで触覚フィードバックを与えている。Mcintoshらはスマートウォッチ使用時に触覚フィードバックを行うデバイスを開発した [45]。このデバイスでは電磁石をスマートウォッチ筐体の外周に配置することでウェアラブルな電磁石にすることで、磁界を用いた触覚フィードバックをウェアラブルシステムとして提案している。また、鵜重は磁界が空間的に広がることに着目し、複数人が同時に触覚フィードバックを得ることが出来るシステムを開発している [46]。

皮膚上に振動触覚提示機能を実装するにあたり、振動体が永久磁石などの磁性体のみで構成でき、配線が必要ないという点などから電磁石を用いた触覚提示方法は親和性が高い。そこで、皮膚感覚への介入として電磁石を用いた触覚提示を行う。磁性に対して反応を持つファイファイバーが実現できたら可能である肌を通して磁界の変化、すわなち、提示された触覚が得られる可能性がある。

3.7.3 生体信号の取得

生体信号とは身体の活動によって発せられる信号である。この信号はセンサによって計測され、このデータを解析することで身体情報や情動などを得られる。皮膚上で計測が可能な生体信号には、筋肉が収縮する際に発生する筋電位や発汗による皮膚抵抗などがあり、それぞれによって筋肉の動きや情動の推定など可能なことが知られる。これらは主に表皮に図3.15のような電極を貼ることで計測され、センサへとケーブルによって配線される。



図 3.15 生体信号計測用電極パッド⁴

図3.16にこの電極の構造を示す。皮膚に貼り付けられた電極は導電性をもったゲルなどによって皮膚と接触し、センサへの配線のためにケーブルへと接続されている。これらの電極では、体の各部位から複数のケーブルを通して接続される。筋電位を計測する場合には、筋電の計測には2つの電極が使用され、また、リファレンス電極も接続される場合もあるため、複数の電極を使用する必要がある。

もし、皮膚に任意の電気を流すことが可能な場合、これらの配線が容易になることが考えられる。図3.17に皮膚上にて電極と配線を構成する際の構造を示す。

4 出典: MyoWare 用生体センサパッド - スイッチサイエンス, <https://www.switch-science.com/catalog/2693/>

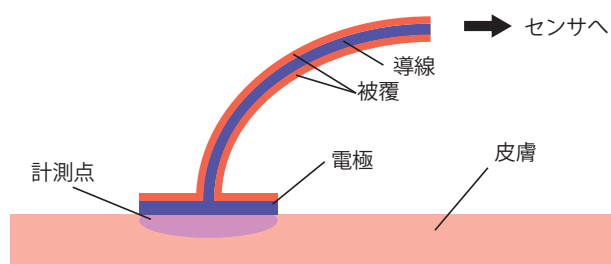


図 3.16 電極とケーブルによる配線の断面図

導電性を持った層を皮膚に接触させることで、その点の電位などを計測すること

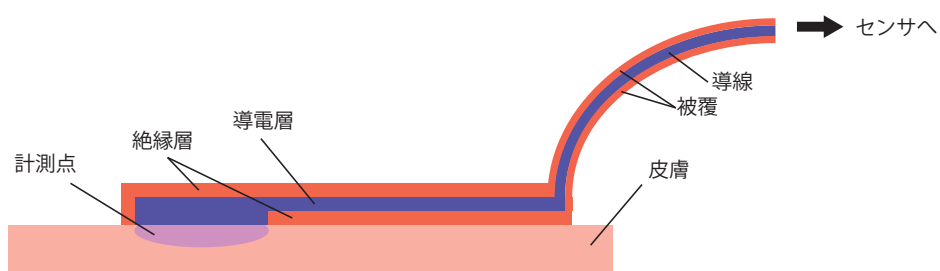


図 3.17 肌上に実装された電極と配線の断面図

ができる。また、絶縁性を持った層を皮膚上に配置し、更にその上に導電性を持った層を配置することで、導線を構成することが可能になる。

3.7.4 皮膚の視覚的表現

我々が他人を見るとき、視覚的にはじめに知覚するのは肌である。肌は、日焼けによって色の変化や、体調が肌荒れとして現れるなど、視覚的情報を持っている。また、肌に対して化粧を施すことによって視覚的情報を変化させることで、時と場合・場面や思想などによって自分の装飾や表現の場としての意味も持つ。制御可能な視覚的ディスプレイ機能をもつことで自己表現や、他者への身体情報の伝達を拡張可能であろう。

人間に対して視覚情報を与える電子機器に液晶ディスプレイがある。液晶ディスプレイは制御された光を出力することによって我々は文字や画像、動画などとして知覚することができる。また、液晶ディスプレイのように多くの画素によって情報を表さずとも、自動車のチェックランプのように1点の点灯においても情報を与えることが可能だ。前述している通り皮膚上で導電性と絶縁性をもった層を構成できればさまざまな電子部品を利用することが出来る。導電性を持った皮膚により、電子部品に電力を供給することができれば、LEDなどのような電子部品を使用する事ができ、視覚的な情報の出力、すなわち視覚的表現を行うことが出来ると考えられる。

3.7.5 皮膚を通じた情報システムとのやりとり

IPv6のアドレス空間の広さの説明として、地球上の全員の細胞1つずつに対してアドレスを割り当てることが可能という表現が使用される。細胞一つひとつは言い難いが、皮膚自体がインターネットに繋がる可能性は十分に考えられ、デバイスを用いずに外部の情報システムとのやりとりが可能になれば、情報システムの使用シーンは大きく変わることが考えられる。そこで、肌上でデジタルテクノロジーを扱うために、コンピュータ自体を肌上に実装する可能性を考える。

RFID (Radio Frequency Identification) とはID情報を埋め込んだタグと電磁波や電波によって近距離通信を行う技術である。この技術ではIDが埋め込まれたRFタグとリーダライタの間で通信が行われる。このRFタグはリーダライタから出力される電波を内蔵されたアンテナによって受け取り、エネルギーとして使用することで電池を内蔵せずに小さなチップとして実装される。RFタグのICチップはリーダライタからエネルギーとともに命令を受け取り、その内容に従い応答する。RFID技術が身近に利用されている例には交通機関を利用する際の改札や買い物での支払いが挙げられる。これらはICカードやスマートフォンに搭載されたタグを読み取り、外部のシステムとやり取りを行うことで利用者の手続きを簡略化させることができる。

この機能を肌上に実装できれば、カードやスマートフォンすら必要なくデジタル空間とインタラクションができ、新たな使用方法が生まれることが考えられる。

3.8. 本章のまとめ

本章では、XR空間での理想的なインタラクションを説明し、本研究で提案する実空間とデジタル空間を知覚可能なインタフェースによって我々はどのような認知を得ることができるか検討した。また、このインタフェースの実現方法として我々の皮膚上にデジタル機能をもったセカンドスキンを重ねるデジタルスキンという概念を提案した。更に、デジタルスキンによって実現可能な機能の検討と、実装の際に必要な技術要件を整理し、それぞれの実装に向けて設計を行った。

第 4 章 実 装

第 3 章でのデジタルスキンの機能の整理し，以下の機能を実装可能なことが検討できた。

外界から接触の取得 現実空間での動作による接触をデジタル空間へのインタラクションのためにデジタル情報に変換する。

皮膚感覚への介入 デジタル空間での”触れられる”をアナログ情報に変換し皮膚に提示する。

生体信号の取得 デジタル空間で利用するために皮膚から得られる生体信号を計測する。

皮膚の視覚的表現の制御 皮膚の視覚的な変化を制御し，デジタル空間の情報を提示する。

情報システムとのやりとり コンピュータの機能を皮膚上に実装し，外部の情報システムとの通信や情報の記録を行う。

なかでも外界から接触の取得，生体信号の取得，皮膚の視覚的表現の制御や情報システムとのやりとりなどの機能は既存の電子部品と組み合わせる電子回路を作成することで実現が可能である。そこで本章では電子回路を実装する要素として，導電性・絶縁性をもった人工皮膚のプロトタイプを開発する。この人工皮膚を用いてそれぞれの機能の一部の実装を行う。

加えて，皮膚感覚への介入として振動触覚を提示する機能のプロトタイプを開発し，この触覚提示が使用者にどのように知覚されるかの実験を行う。

4.1. 電子回路要素機能の実装

第3章で述べたように、電子部品を扱うことによって様々な機能を実装できる。そこで、肌上で電子部品を扱うために、導電性・絶縁性をもった人工皮膚の開発を行う。

4.1.1 導電性を持った人工皮膚の実現

導電性を持った人工皮膚（以下、導電層とする）の実装方法としては大きく分けて2つのアプローチが考えられる。ひとつめは導電性を持った膜を吹き付ける方法である。この方法ではディフューザーから吹き付けられる繊維自体に導電性を持たせ、導電層として実装する。しかし、吹き付け時に利用しているエレクトロスピンニング法は、高電圧を非導電体にかけることで極細繊維を吹き出している。また、この繊維は吹き付け時に拡散するため、精密な回路のパターニングなどは難しいと考えられる。

ふたつ目の方法として、吹き付けられたファイファイバーに対して導電性を持った液体（以下、浸透液とする）を染み込ませる方法が考えられる。ファイファイバーの極細繊維には毛細管現象により、液体が広がる特性がある。花王株式会社はこの特長を利用してスキンケアへの応用を行っている。この液体に導電性をもたせることで導電性をもった人工皮膚が実現できる可能性がある。この方法では、塗り方によって細かい回路が実装できる可能性がある。一方で液体が広がるという性質から、液体がにじむことで回路が作れない可能性も考えられる。

本節ではそれぞれの方法によって導電性をもった人工皮膚を実装し電気的特性を評価する。

導電層の実装

繊維溶剤の変更は繊維形成への影響などから難しいのに対し、浸透液を変化させる場合には繊維に対する影響が少ない。また、導電性液体の入手性もよいため、浸透液に対して導電性をもたせる方法によってプロトタイプ実装する。また、電流を流すにあたり、皮膚上に直接実装するのは危険であるため、化粧用スポンジ（図 4.1）上に人工皮膚の生成を行った。このスポンジ上に約 30 秒間吹き付けを行い、この膜に各浸透液を染み込ませ導電層を実装する。

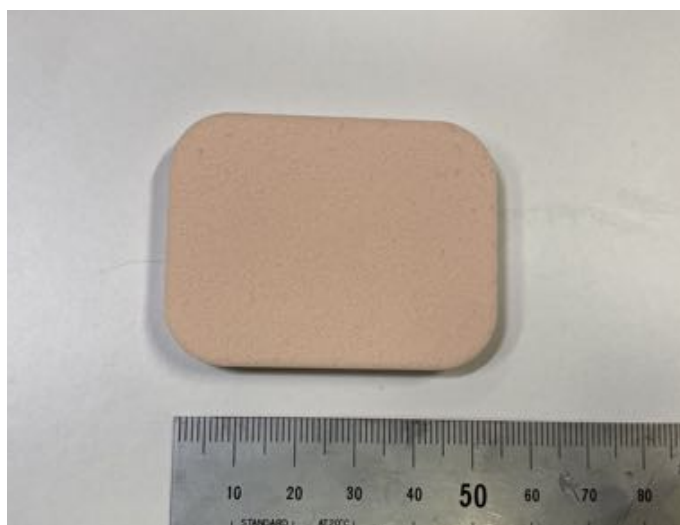


図 4.1 化粧用スポンジ

導電性液体には食塩水を添加することで導電性を追加したファインファイバー浸透液と導電性インクを用いたものを使用する。その他にも、導電性を持った液体には銀ナノ粒子を含んだインクなどが存在しているが、人体に対して毒性があるものもあり、皮膚上への実装には適さないと考えたため、使用しなかった。それぞれの浸透液について以下に示す。

塩化ナトリウムは水に溶解させることでナトリウムイオンと塩化物イオンに分離し、電解質になる。この性質を利用し、ファインファイバーの専用化粧水に混ぜることで電解質を持った浸透液として利用する。はじめに 10.0g の水道水に対して 3.00g の食塩を混ぜ、飽和状態に近い塩化ナトリウム水溶液を作成した。つぎにこの塩化ナトリウム水溶液 0.30g に対して 0.70g のファインファイバー専用化

粧水を混ぜ、導電性を持ったファイファイバー浸透液を作成した。この液体を人工皮膚に浸透させ導電層を実装する。

導電性インクとは、銀や銅、炭素粒子を混ぜることによって導電性を持たせたインクであり、紙や木材の表面に回路を作ることができる。Electric Paint は Bare Conductive 社が発売している導電性のインクである (図 4.2) [47]。このインクには炭素粒子が混ぜられており、導電性があり、人体に対しても無毒である。このインクを人工皮膚に染み込ませることで導電層を実装する。



図 4.2 Electric Paint¹

導電層評価方法

4.1.1 節の手法を用いて 2 種類の導電層を実装した。それぞれの導電層の電気的特性の評価として、抵抗値の計測を行う。一般的に、導体の抵抗値は導体の断面積や長さによって変化する。そこで本実験では、同一の条件で導体の抵抗値を計測するために電極を作成した。図 4.3 に作成した電極を示す。この電極は片面ユニバーサル基板に錫メッキが施された銅線をはんだ付けし作成した。この電極では、2 本の導線が基板表面の 10 ホール分 (長さ 25.37mm) の間隔をあけて並行に 5 ホール (長さ 12.41mm) にわたって露出し、この露出した導線を導電層に接触させることによって 2 点間の抵抗値を計測する。また、浸透液の時間経過による

1 <https://www.bareconductive.com/shop/electric-paint-10ml/>

蒸発に対する電気的特性を計測するために、電極間を切断し、空気に露出した状態とした。それぞれの電極の両端間の抵抗値は0.049 Ωであった。また、抵抗値

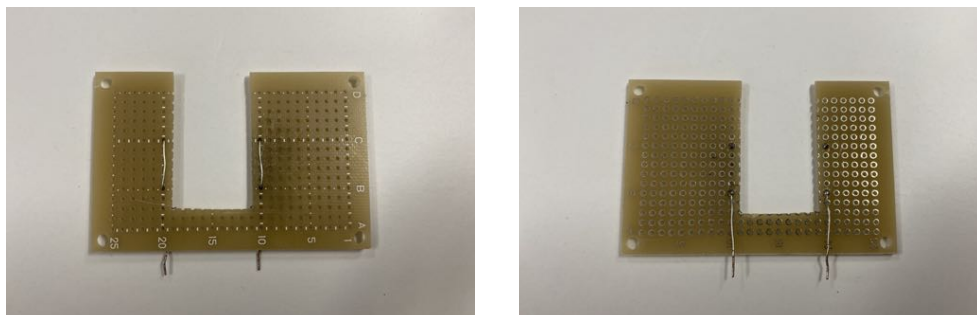


図 4.3 抵抗値測定用電極

は厚みに対しても抵抗値は変化するが、今回はすべて繊維薄膜に対して実装するため、厚さは一定であるとした。

塩化ナトリウム水溶液のような電解質溶液に対して電流を流すと分極が発生し電極が腐食する。そのため、直流電流を用いた抵抗値の計測では電極の腐食により計測対象の抵抗値が計測できない。そこで、このような計測には交流電流を用いて抵抗値の計測を行う。今回は三和電気計器株式会社の LCR メータ LCR700 を用い計測を行った。測定周波数は 1kHz であった。以上の計測方法によって、実装した導電層の抵抗値の測定を行った。

導電層評価結果

化粧用スポンジ上に約 30 秒間ファインファイバー繊維を吹き付け、この膜に対して 2 種類の方法によって導電層を実装した (図 4.4, 図 4.5)。また、比較対象として吹き付けた繊維のみの抵抗値の計測も行った。(図 4.6)

それぞれの人工皮膚に対して 60 分間抵抗値の測定を行い、抵抗値の変化を確認した。この計測は測定開始から 20 分間は 1 分間隔、20 分から 60 分までは 10 分間隔で行った。また、計測は室内で行われ、このときの室温は 22℃、湿度は 56% であった。



図 4.4 導電性をもった人工皮膚（塩化ナトリウム水溶液添加浸透液）



図 4.5 導電性をもった人工皮膚（導電性インク）



図 4.6 ファインファイバー単体での人工皮膚（浸透液なし）

塩化ナトリウム水溶液添加浸透液，導電性インクによる導電膜の抵抗値の変化を図 4.7 に，浸透液なしのファイナファイバー膜の抵抗値の変化を図 4.8 に示す。

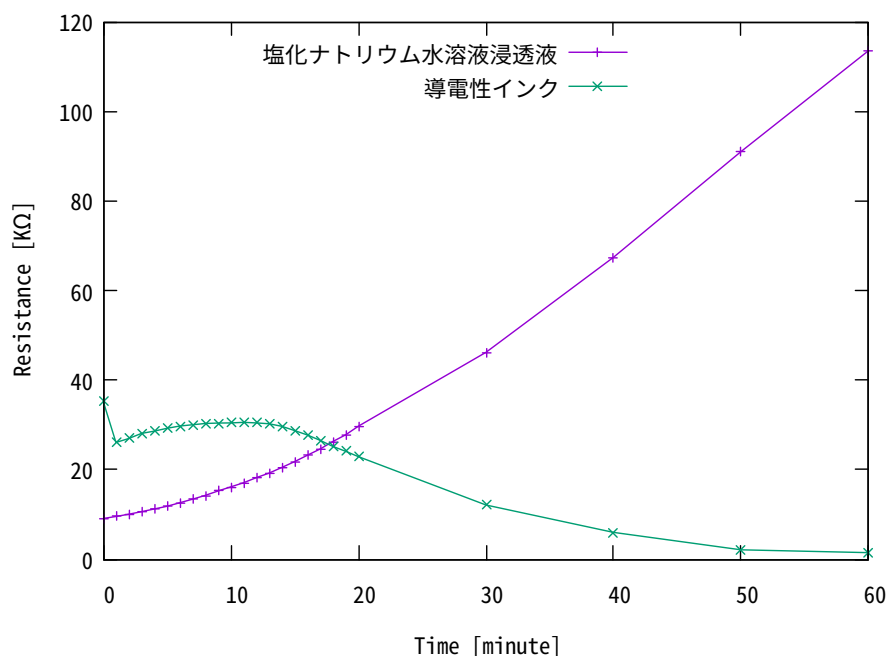


図 4.7 導電層抵抗値の変化（塩化ナトリウム水溶液添加浸透液，導電性インク）

塩化ナトリウム水溶液添加の浸透液を使用した導電性をもった人工皮膚では，計測開始直後には約 10K Ω の抵抗値が計測されていたが，時間経過とともに抵抗値が増加することが確認出来た．これは水分の蒸発により水溶液の導電性がなくなり，抵抗値が増加したと考えられる．

一方で導電性インク使用した導電性をもった人工皮膚では，計測開始直後では約 25K Ω の抵抗値があったが，時間経過とともに抵抗値は減少し，60 分後の時点では 1.5K Ω の抵抗値が確認できた．これは今回使用した導電性インクが乾燥後に導電性を持つものであり，時間経過によってインクが乾燥したことで抵抗値が下がったものと考えられる．そのため，導電性インクを用いた導電層は加工直後に回路としての使用は難しいと考えられる．また，このインクは炭素を含んでいるため，皮膚に対する視覚的影響が大きいと考えられる．浸透液を使用しないファイナファイバー膜では計測開始直後から 300K Ω より大きな抵抗値があり，時間

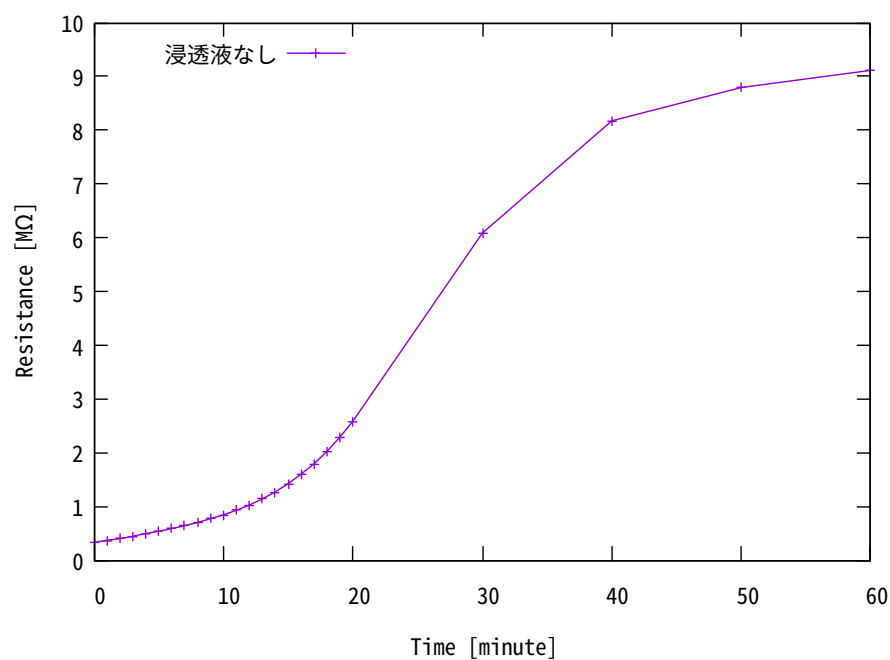


図 4.8 導電層抵抗値の変化（浸透液なし）

経過とともに抵抗値の増加がみられた。この原因としては繊維溶剤の性質が時間経過による変化などが考えられる。

導電層の実現のまとめ

本節では、ファイナファイバーによる人工皮膚に導電性を持った液体を浸透させることによって導電性を持った人工皮膚を実装した。導電性を持った液体には、塩化ナトリウム水溶液を添加した浸透液と導電性インクを用い、導電層を実装し、抵抗値の計測を行った。抵抗値の計測実験では、浸透液を使用しないファイナファイバー膜と比較して10の2乗から3乗のオーダーで抵抗値の違いが確認できた。

4.1.2 絶縁性を持った人工皮膚の実現

皮膚上で導電層を活用するには、絶縁性をもった人工皮膚（以下、絶縁層とする）の実装が必須である。ファイナファイバーによって作成される極細繊維はすでに非導電性を持っており、絶縁することは可能であるが、単体で使用すると絶縁層として吹き付けた極細繊維に対しても導電性を持った液体が染み込み、特性が安定しないと考えた。そこで、導電層の実装と同様に絶縁性の高い液体を染み込ませることで実装を行う。

絶縁層の実装

絶縁性の高い液体として、ワセリンを選択した。ワセリンは石油を精製しつくられ、高い絶縁性をもっている。保湿剤として使われるため、人体に対しても安全性が高い物質である。図 4.9 に実装した絶縁性を持った人工皮膚を示す。



図 4.9 ワセリンを使用して実装された絶縁性を持った人工皮膚

絶縁性評価方法

導電性の評価と同様の方法で抵抗値の計測を行った。また、ワセリンを用いた絶縁層では、蒸発が抵抗値に与える影響は少ないと考えられるため、時間経過の

計測は行わなかった。図 4.10 に計測時の様子を示す。

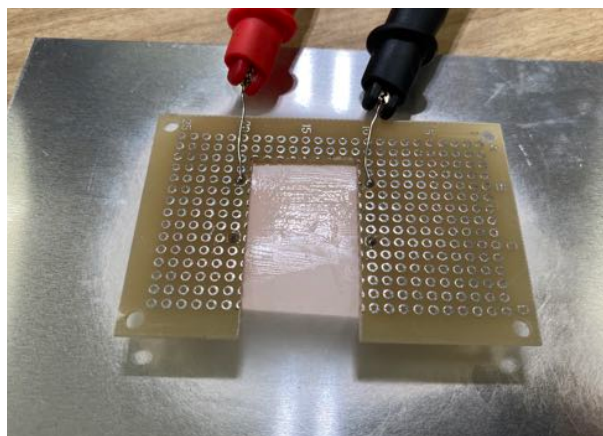


図 4.10 絶縁層の抵抗値の測定

絶縁性評価実験結果

ワセリンを用いて実装された絶縁層の抵抗値を測定したところ、 $4.37\text{M}\Omega$ の抵抗値が確認された。この値は浸透液を使用していないファイバー繊維の吹付け直後の抵抗値よりも高いものであり、十分な特性を持った絶縁層が実装できたと考えられる。

絶縁性評価実験まとめ

絶縁性を持った人工皮膚を実装するにあたり、ワセリンを用い絶縁層を実装した。この絶縁層では導電層に対し10の4乗オーダーでの抵抗値の違いが得られた。

4.2. 電子回路機能の実装

4.1 節では、電子回路を構成するための要素として、導電性を持った人工皮膚と絶縁性を持った人工皮膚を実装した。本節ではこれらの要素機能を組み合わせて電子回路機能を肌上を実装する。

4.2.1 LED を用いた視覚ディスプレイの実装

LED の点灯は最も単純な電子回路の一つである。しかし、3.7.4 小節で述べた通り、これを皮膚上を実装し、自在に制御することができれば、意思表示や表現の拡張が行える。本小節では、肌上に回路を形成し LED の点灯を行った。

はじめに外部の電子回路と皮膚上の電子回路を接続する方法としての電極を作成した。この電極を図 4.11 に示す。この電極は $\phi 0.5\text{mm}$ の 2UEW エナメル線に対し 5mm ほど被膜を剥がし、はんだによってめっき加工を施し作成した。このエナメル線を肌に巻きつけるようにとりつけ、接続したい導電層を持った部分にはんだめっき部を接触させることで皮膚上に面として広がる導電層に配線することができる。この電極によって最小限のサイズでの配線が可能になる。



図 4.11 ワイヤ電極

実際の肌面に対しては、はじめに絶縁層を実装した。このときの様子を図 4.12 に示す。

次に絶縁層上に 2cm ほどの間隔をあけて塩化ナトリウム水溶液を用いた 2 本の導電層を吹き付けた。この 2 本の導電層上に LED を乗せる。LED には平面に載



図 4.12 絶縁層

せた際に安定するチップLEDを使用した。また，導電層との接触面積を広げるためにリードが伸びたものを使用した。このときの様子を図 4.13 に示す。

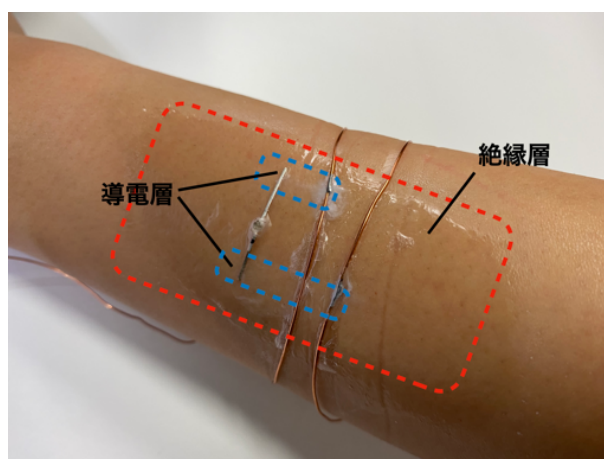


図 4.13 皮膚上に実装したLED点灯回路

次に，2本の導電層に対してそれぞれワイヤ電極を配線した。その後さらに回路全体に対してファイファイバー繊維を吹き付けた。

完成した回路を図 4.14 に示す。絶縁層・導電層ともに視覚的に透明度ある回路を作成することが出来た。この回路に対して12Vの電圧をかけた際にはLEDが点灯した(図 4.15)。このときの回路全体の抵抗値は170K Ω であった。



図 4.14 皮膚上に実装した LED 点灯回路：オフ状態



図 4.15 皮膚上に実装した LED 点灯回路：オン状態

4.2.2 肌上タッチセンサの実装

3.7.1 小節に示したとおり，静電容量を利用したタッチセンサでは電極のみで周辺の接触を計測することが出来る．本節では，導電層・絶縁層を組み合わせ肌上で人体の接触を判断可能なタッチセンサを実装する．

はじめに，皮膚上にワセリンを用いた絶縁層を作成した．この絶縁層上に塩化ナトリウム水溶液を用いた導電層を作成した．次にこの導電層にワイヤ電極を接触させ，このワイヤを経由してマイコンボード ESP32 に接続した．このときの腕上の配線を図 4.16 に示す．ESP32 にはタッチセンサが搭載されており，この機能

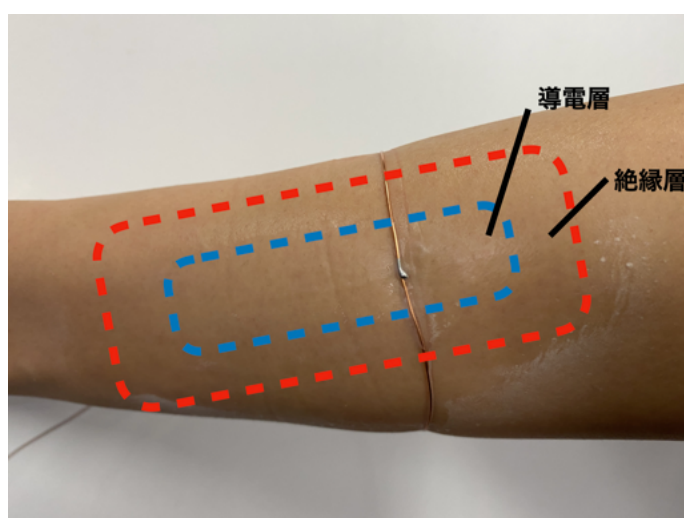


図 4.16 肌上タッチセンサ

を使用して接続した電極の静電容量の計測を行った．

計測されたタッチセンサの値を図 4.17 に示す。

このグラフ内では皮膚上にタッチセンサが実装された本人が2回、自身の前腕部の電極に触れた。このときの静電容量の値の変化が計測されていることがわかる。非タッチ時とタッチ時の値の差が小さいがこちがわかる。これは絶縁層が非常に薄いため、接触していない状態においても静電容量の値が小さくなっていると考えられる。しかしながら、値に差がみられるため、適切な信号処理を追加することで、十分にタッチの判定ができると考えられる。

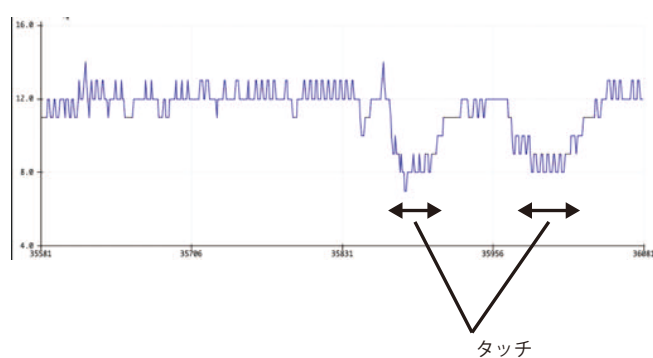


図 4.17 タッチセンサの値

4.3. 振動触覚提示

デジタルスキンから皮膚への出力の機能のひとつである触覚ディスプレイ機能のために磁性に反応するファイファイバーの開発を行う。磁性を持ったセカンドスキンを実装することができれば磁力によってエネルギーを伝搬し運動として取り出し、触覚として皮膚へ伝えることができる。ファイファイバーを用いて磁性を持った肌の実現には、導電層・絶縁層の実現と同様に繊維自体に磁性をもたせる方法と浸透させる液体によって磁性をもたせる方法が考えられる。繊維自体に磁性をもたせる方法では、繊維射出への影響により実現は難しいと考えられる。また、液体によって磁性をもたせる方法としては、磁性流体を組み合わせた方法が考えられる。しかし、磁性流体には人体に対する有毒性があるものもあり、本研究においては慎重な検討が必要である。

そこで磁性体を皮膚上に乗せファイファイバーによる人工皮膚を重ねることで、磁性を持った人工皮膚を実装する。

4.3.1 プロトタイピング

ここでは、プロトタイプとしてファイファイバーによって皮膚に実装した人工皮膚に磁性を与えることで、磁力によって伝搬させた振動を受け取ることができるのか確認を行う。

システムの開発

プロトタイプとして、振動を磁力として出力するシステムを開発した。このシステムはオーディオ出力によって振動出力を行う PC、オーディオ信号を十分な磁力を発生させる電圧まで増幅させるオーディオアンプ、電気信号を力に変換する電磁石によって構成される。

PCからは Max/MSP を使用し、100Hz の正弦波信号を出力した。この信号は MacBook Pro の外部ヘッドホン端子を経由し、オーディオ信号としてパワーアンプ (SMSL SA-98A) に入力される。アンプによって増幅された信号はコイルに

よって磁力へと変換される。このコイル（図 4.18）は直径 15mm の円形に切断した厚さ 5mm の MDF 板に太さ 5.2mm の鉄心（鉄釘を長さ 27mm に切断したもの）を貫通させたものに対して、2UEW 太さ 0.5mm のエナメル線を巻いたものである。このコイルは一層にエナメル線が 30 巻されており、6 層重ねることで 180 巻したコイルである。

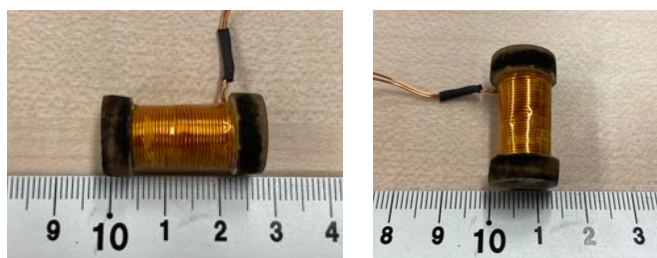


図 4.18 作成したコイル

このコイルをポリプロピレン製の箱に両面テープによって取り付け、筐体の内部に電磁石を取り付けた。

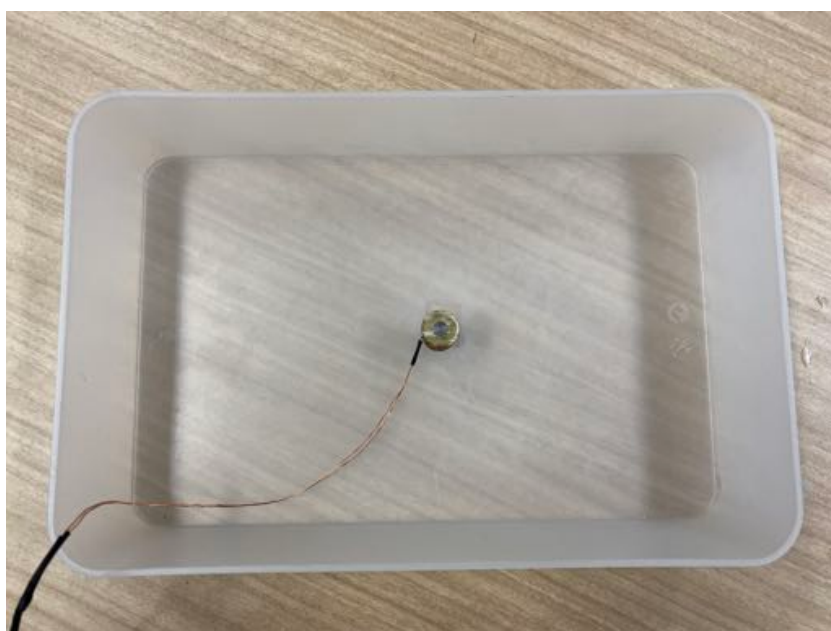


図 4.19 筐体に設置した電磁石

磁性をもった人工皮膚の開発

振動を受け取るために磁性をもった人工皮膚の開発を行う。はじめに，磁性体として砂鉄を選択し，皮膚上に砂鉄を乗せ，その上からファイファイバーによる人工皮膚の吹付けを行った。この様子を図 4.20 に示す。この人工皮膚を触覚信号



図 4.20 砂鉄を使用した人工皮膚

を出力している電磁石へ近づけたが，触覚として振動を感じることはできなかった。この原因として，砂鉄は磁力が弱く，皮膚に対して知覚できるほどの力を与えることが出来なかったためと考えられる。またこのとき，皮膚上に山になるように砂鉄を乗せ，その上から包み込むように人工皮膚を吹き付けを行い，永久磁石を近づけると，人工皮膚内で砂鉄が惹きつけられ，人工皮膚自体の形状が変化した（図 4.21）。

砂鉄による磁性をもった人工皮膚では，磁力が弱く，触覚として知覚できる力を受け取ることができなかった。そこで，人工皮膚に使用する磁性体を砂鉄から永久磁石に変更した。ネオジム磁石（ ϕ 13mm，厚さ 2mm）を手の甲に載せ，ファイファイバーを吹き付けを行い，皮膚に包み込むように磁石の貼付けを行った。この時の様子を図 4.22 に示す。

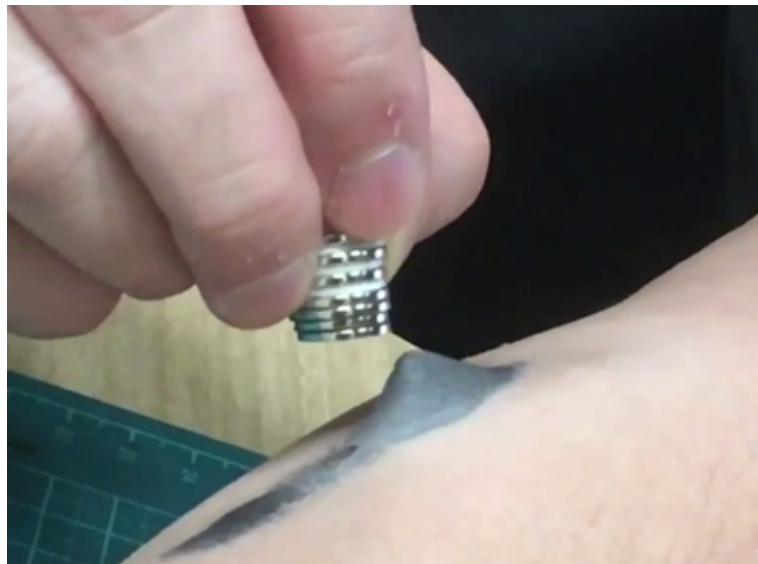


図 4.21 砂鉄を包み込んだ人工皮膚に永久磁石を近づけた様子



図 4.22 永久磁石を使用した磁性をもった人工皮膚

振動出力の確認

図 4.23 のように筐体に対して、磁石を取り付けた手の甲を近づけた。手の甲で磁石が振動している触覚を得ることが出来た。このとき、電磁石から磁石までの距離は約 2cm であった。



図 4.23 振動の受け取り

4.3.2 セカンドプロトタイプ

ファーストプロトタイプによって永久磁石を使用した人工皮膚によって触覚が得られることが確認できた。そこで、面として広がる肌によって振動を受け取る特長を生かし、多点で振動の受け取りが可能なセカンドプロトタイプの開発を行う。

複数の磁石・電磁石による磁界の結合

磁界は磁石を中心に空間的に広がるエネルギーである。今回の電磁石による振動の伝搬では、電磁石に近いほど強い振動を受け取ることが可能である。また、図 4.24 のように、磁石を複数使用することによって 1 点ではなく多点で振動を受け取ることも可能である。

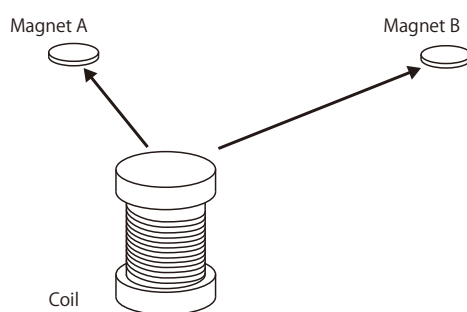


図 4.24 複数の磁石によって振動を受け取る際の磁力エネルギー

また、図 4.25 に示すように、電磁石の数を増やした場合には、それぞれの電磁石から出力される磁力が結合され、磁石ではそれらの磁力を同時に受け取ることが可能である。このときに、それぞれが出力する磁力をコントロールすることで空間内の位置によって磁石が受け取る振動に変化を与えることが出来る。

以上をまとめると、皮膚上に複数の磁石を取り付けることによって広い範囲で振動を受け取ることができ、複数の電磁石によって磁力を発生させることで位置によって異なる振動を出力することが出来る。この方法を利用して皮膚上で多点で振動を受け取ることができ、位置によって異なる振動を得ることが可能なセカンドプロトタイプを作成する。

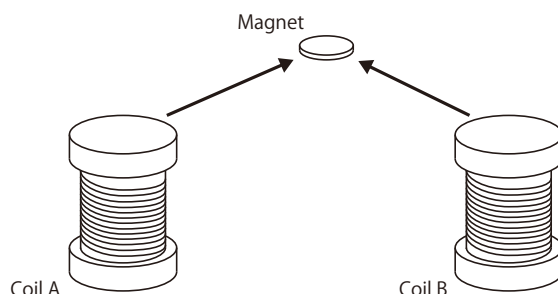


図 4.25 複数のコイルによって出力される磁力

複数の電磁石を制御するソフトウェア

セカンドプロトタイプでは、複数の電磁石から出力される触覚の強さを個別に制御し、一つの振動点が2次元空間内を移動するような振動を与える。セカンドプロトタイプの電磁石の数は、縦横それぞれに電磁石を配置することで振動による定位感を与えるため縦3個、横2個の合計6個とし、6チャンネルの触覚を生成するソフトウェアはMax/MSPで実装した。このソフトウェアのパッチを図4.26に示す。このパッチはMax/MSPのnodesオブジェクトを用いて実装されている。nodesオブジェクトは二次元空間上にノードを配置し、ノードポイントからのそれぞれの距離を計算可能なオブジェクトである。nodesオブジェクトにノードを実際の電磁石と同様に配置し、ノードポイントとの距離の計算を行う。このノードポイントはマウスカーソルなどの入力によって位置を制御することができ、このソフトウェアでは振動が発生する点として扱う。そのため、それぞれのノードとノードポイントの距離はそれぞれの電磁石から出力されるボリュームとして扱うことで振動点がコイルに近づくと磁力の出力を上げることで、平面上を振動点が移動するような信号を生成することが可能である。

また、隣接する2つの磁石によって同方向の磁界を発生させた場合にはそれぞれの磁界が相殺し、磁力が減衰してしまう。そこで、今回のソフトウェアでは隣接する電磁石に対して位相を反転させた信号を出力させることで、同時に複数の

電磁石から磁力を発生させた場合の磁力の減衰を防いでいる。

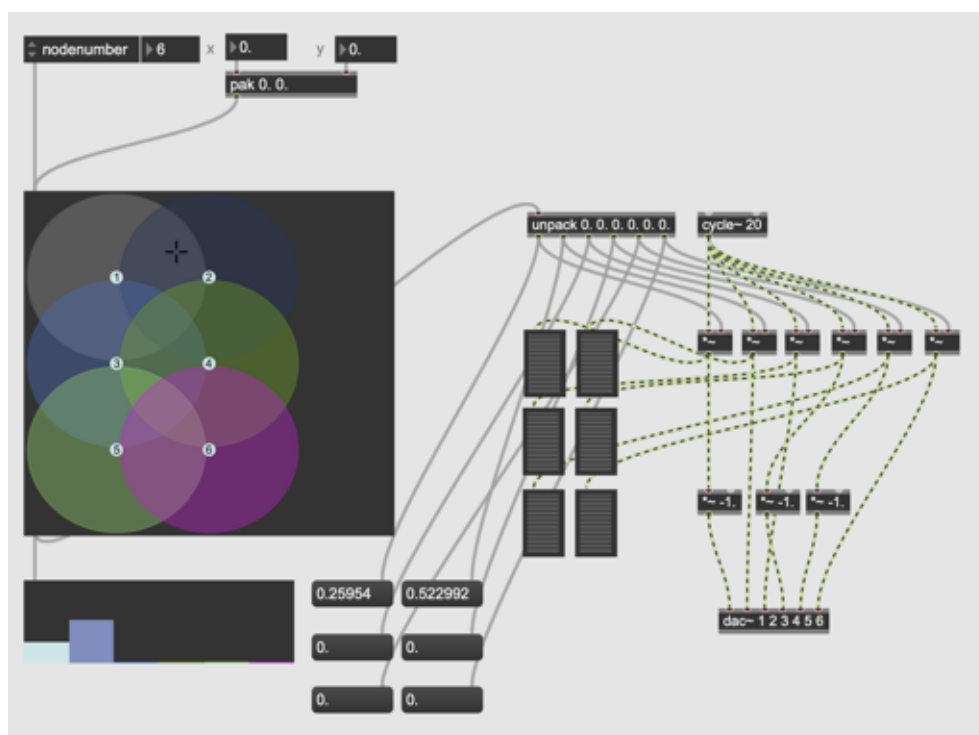


図 4.26 複数の電磁石を制御する max パッチ

複数の電磁石を制御するハードウェア

セカンドプロトタイプのハードウェアは、複数のオーディオ信号の生成を行う PC (MacBook Pro), 生成したオーディオ信号を電気信号として出力するオーディオ・インタフェース (Roland OCTA-CAPTURE), オーディオ・インタフェースから出力された電気信号を増幅するオーディオアンプ (SMSL SA-98A x3), 増幅された電気信号を磁力に変換する電磁石によって構成される。セカンドプロトタイプの電磁石には、ファーストプロトタイプで作成したコイルと同じ仕様のを 6 個作成した。ファーストプロトタイプと同様に、筐体内に配置した電磁石アレイを図 4.27 に示す。それぞれの電磁石は 5cm の等間隔で配置し、この筐体の表には点によって電磁石の位置を示した。



図 4.27 コイルアレイ

4.3.3 振動知覚実験

セカンドプロトタイプでは、2次元空間内で1点の振動源が移動するように振動触覚を提示するシステムを開発した。本実験ではこのシステムによって振動の定位感を知覚することができるのか、振動点の移動を知覚することができるのか、動きを伴ったアクティブタッチによって振動位置に対する認知が変化するか、振動を受け取る体の部位が知覚に影響を与えるのかの4点について確認を行う。

実験方法

この実験では、振動を受ける体の部位として、触覚受容器が多く分布している掌と、比較的触覚受容器が少ない前腕部によって提示された振動を受け取る。それぞれの部位に対して電磁石の配置と同様に約5cmの間隔をあけてネオジム磁石(φ13mm 2mm)を貼り付ける。この実験では複数の磁石をの貼り付けを行うため、ファイファイバー膜ではなく、円形に切り抜いたサージカルテープによって貼り付けを行う。図4.28に使用したサージカルテープとネオジム磁石を示す。

図4.29に掌にネオジム磁石を貼り付けた様子を示す。また、図4.30に前腕部にネオジム磁石を貼り付けた様子を示す。

この2箇所の体の部位にて、以下の4条件において振動の位置が正しく知覚されるか調査する。

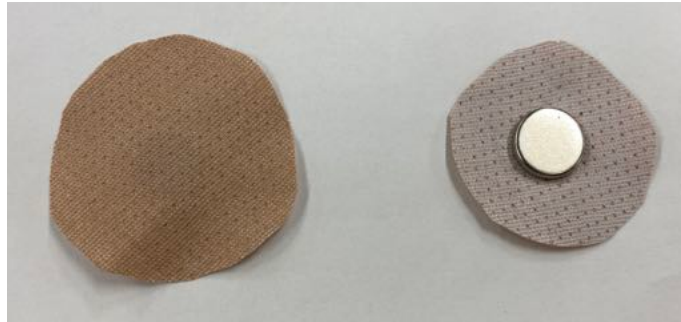


図 4.28 永久磁石の取り付け方法

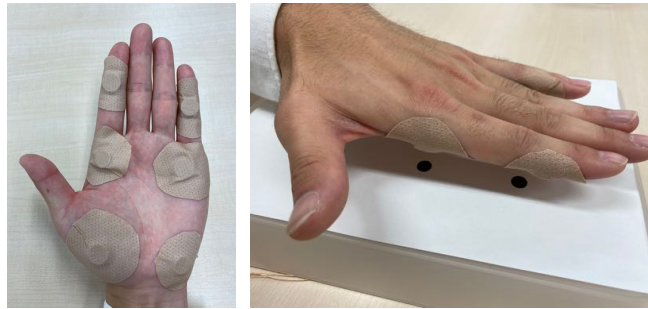


図 4.29 掌に取り付けた磁石（左）と触覚を受け取っているときの様子（右）

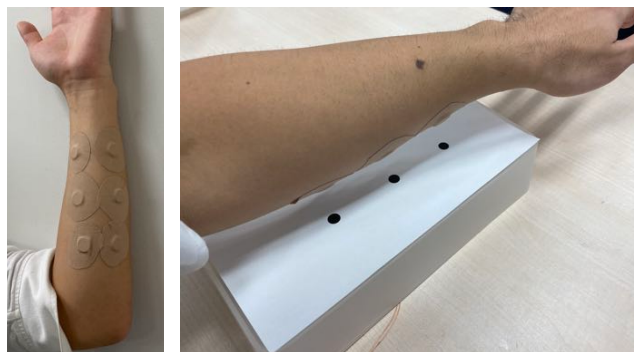


図 4.30 前腕部に取り付けた磁石（左）と触覚を受け取っているときの様子（右）

- 条件1 (C1) : 6点のうちランダムに選ばれた1点の電磁石から50Hzの磁力を出力する。被験者は手もしくは前腕を筐体にかざした状態で振動を受け取り、どの位置が振動したか回答する。この手順を10回繰り返す。
- 条件2 (C2) : 6点のうちランダムに選ばれた1点の電磁石から50Hzの磁力を出力する。その後振動している点から上下左右に隣接した点のうち、ランダムに選ばれた1点へ振動点が1秒間かけて移動を行う。被験者は被験者は手もしくは前腕を筐体にかざした状態で振動を受け取り、どの点からどの点へ振動点が移動したかを回答する。この手順を10回繰り返す。
- 条件3 (C3) : 6点のうちランダムに選ばれた1点の電磁石から50Hzの磁力を出力する。その後振動している点から上下左右に隣接した点のうち、ランダムに選ばれた1点へ振動点が1秒間かけて移動し、その後さらに上下左右に隣接した点のうち、ランダムに選ばれた1点へ振動点が1秒間かけて移動を行う。被験者は被験者は手もしくは前腕を筐体にかざした状態で振動を受け取り、どの点からどの点へ振動点が移動したかを回答する。この手順を10回繰り返す。
- 条件4 (C4) : 6点のうちランダムに選ばれた1点の電磁石から50Hzの磁力を出力する。被験者は手もしくは前腕を筐体にかざし、筐体に対して平行移動するように動かしながら、どの位置が振動したか回答する。この手順を10回繰り返す。

この実験を男性5名（平均年齢24.6歳）の被験者に対して行った。

実験結果

条件1・条件4においては正しい位置を回答した場合を正答とし、条件2・条件3においてはすべての振動した点・順番が正しく回答された場合を正答とし、各

条件での正答率を解析した。この結果を図 4.31 に示す。

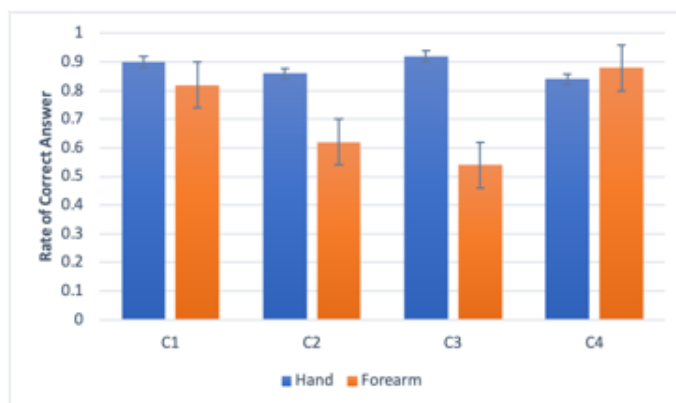


図 4.31 各条件での正答率（エラーバーは標準偏差）

条件 1・条件 2・条件 3 において、振動点が増加すると前腕部にて振動を受け取った際には正答率が下がった。それに対し同条件の振動を掌にて受け取った際にはどの各条件において 9 割前後の高い正答率が得られた。どの条件においても掌で振動を受け取った際の正答率の標準偏差は前腕部で振動を受け取った際の正答率の標準偏差よりも小さくなった。条件 1 と条件 4 はどちらも振動している 1 点を答える条件であったが、前腕部によって振動を受け取る際には動きを伴った条件 4 の正答率が高い結果となった。これに対して掌によって動きを伴う振動点の回答では動きを伴わずに振動を受け取る条件 1 の正答率が高い結果となった。

4.3.4 触覚知覚実験考察

実験結果から、本システムを通して振動の定位感を得ることが可能であることが示唆された。特に掌では振動位置が移動を伴う振動においても高い割合で正しく知覚された。しかしながら前腕部によって振動を受け取った際には移動数の増加に伴い正答率も下がり、振動位置の知覚精度が高くないことがわかった。このことは、すべての条件において前腕部での正答率の標準偏差が大きいことからみてとれる。また、動きを伴ったアクティブタッチによって振動位置の正答率が向上するかわかれたが、手によって振動を受け取った際には正答率が減少しており有効とは言えないことがわかった。

正答率が大きく下がった前腕部において振動を受け取る際の条件2・条件3では、図4.32に示すような、位置がズレた回答が多かった。これらの回答では振動位置

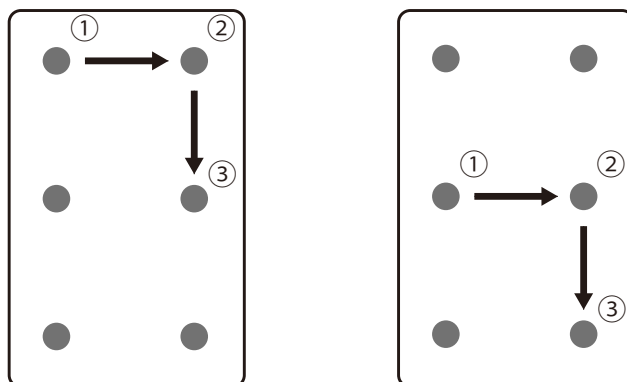


図 4.32 正しい振動位置（左）と誤った回答（右）の例

は正しく知覚できていないが、振動位置の移動方向としては正しく知覚されている。このような回答を正答とし、それぞれの正答率を再計算したものを図4.33に示す。

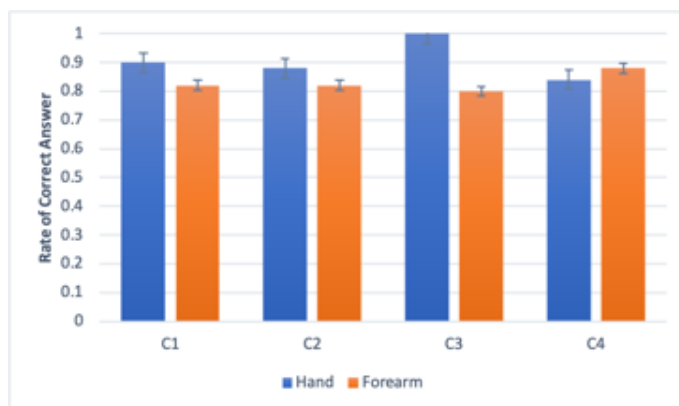


図 4.33 振動の移動方向が正しい回答の正答率（エラーバーは標準偏差）

前腕部で振動を受け取った際の条件2では約20%の正答率の向上がみられた。また、条件3においても約25%の正答率の向上がみられた。この結果から位置に対する知覚精度が悪い前腕部においても振動点が動いているという知覚や、動いている方向などが知覚できると考えられる。

4.3.5 振動触覚提示まとめ

本節では、デジタルスキンの振動触覚提示機能のプロトタイプを開発した。このプロトタイプではファイファイバー膜によってネオジム磁石を皮膚に貼り付け、電磁石から出力された磁力によって振動を提示することが可能なことが確認できた。また、デジタルスキンの肌に広がるという性質から、複数のネオジム磁石と複数の電磁石によって2次元空間内を振動点が移動するプロトタイプを開発した。このプロトタイプでは、振動位置の知覚実験を行い、触覚による空間解像度が低い前腕部においても、振動の移動に対して約80%の正答率が得られた。また、被験者からは虫が這うようだとか、背中に文字を書かれる遊びのようだというフィードバックが得られ、この点から使用者に対して与えるデバイスの装着感が少ない触覚ディスプレイが実現できたと考えられる。

4.4. 本章のまとめ

本章では、デジタルスキンの機能を実現するための要素機能として、ファイファイバーによる導電層と絶縁層の試作を行い、皮膚上に電子回路を作成する方法を実装した。また、この機能を使用し、皮膚上にてLEDを点灯させる回路や皮膚上にタッチセンサの実装を行った。

加えて、デジタルスキンの皮膚感覚への介入機能として、磁性をもった人工皮膚を開発し、磁力によって振動触覚提示を行う機能を開発した。また、この機能による触覚提示がどのように使用者に知覚されるか評価実験を行った。

第 5 章

Proof of Concept

第 4 章で開発したデジタルスキンの電子回路機能と触覚提示機能を組み合わせ、想定されるデジタルスキンのアプリケーションを開発した。デジタル空間を利用する日々のインタラクションを人とモノの間でのインタラクションと、人と人の間で行われるインタラクションに大別し、2つのアプリケーションを開発した。本章ではそれぞれのアプリケーションの実装と体験を通して得られたフィードバックについてまとめる。

5.1. デジタルスキンによる人-モノ 間インタラクション

身体動作によってデジタル空間とのインタラクションには、近距離通信を使用した自動改札機の利用などが挙げられ、このような際に我々はICカードなどのデバイスを使用している。3.7.5 小節に示したように、RFIDによるICチップを皮膚上に実装できた場合ICカードやスマートフォンなどすら用いずにシステムとのやりとりが可能である。そこでRFIDタグによるID識別と通信成功時に触覚によるフィードバックを行うシステムを開発し、このようなインタラクションをデバイスではなくデジタルスキンによって行った場合の認知や行動の変化を観察する。

5.1.1 システム構成

図 5.1 にシステムの構成図を示す。

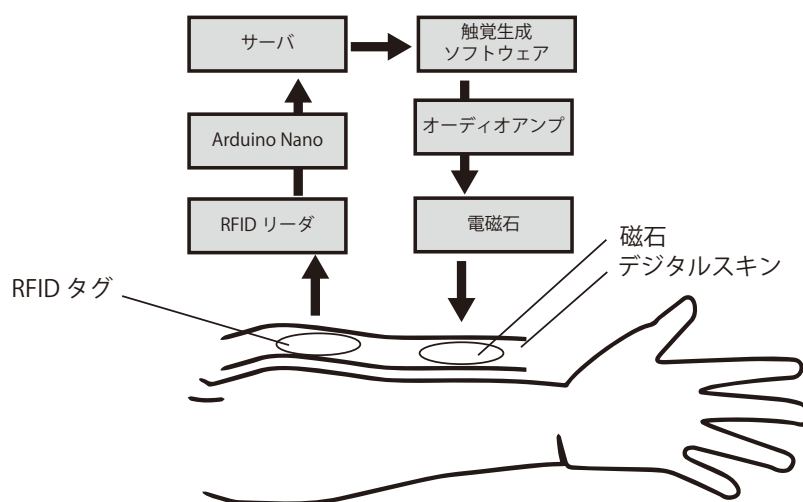


図 5.1 システム概要図

このシステムではRFIDリーダー（NFC RFID モジュール PN532）によって読み取られたRFIDタグのID情報をArduino Nanoを使用してコンピュータに入力している。コンピュータ内ではPythonによって作成されたサーバにてタグ情報の記録と触覚生成ソフトウェアへ命令の送信がOSC通信により行われる。このサーバでは3種類の触覚生成命令をもっており、読み込まれたIDの回数によって異なる触覚生成の命令を送信する。Max/MSPで開発された触覚生成ソフトウェアでは、サーバから送信された命令を受け取り、その内容に応じて触覚信号の生成と出力を行う。このソフトウェアのパッチを図5.2に示す。このパッチではOSC通信によって受け取った触覚生成IDに従い10Hz、20Hz、40Hzの正弦波を0.4秒間出力する。出力された触覚信号はオーディオアンプ（SMSL SA-98A）によって増幅される。この信号が電磁石に入力されることで磁力へと変換され、皮膚上のネオジム磁石に振動を与える。また、3DプリンタによってRFIDリーダーと電磁石を取り付け可能な筐体を作成した（図5.3）。この筐体に手をかざして使用するため、壁の約1mの高さに取り付けた（図5.4）。

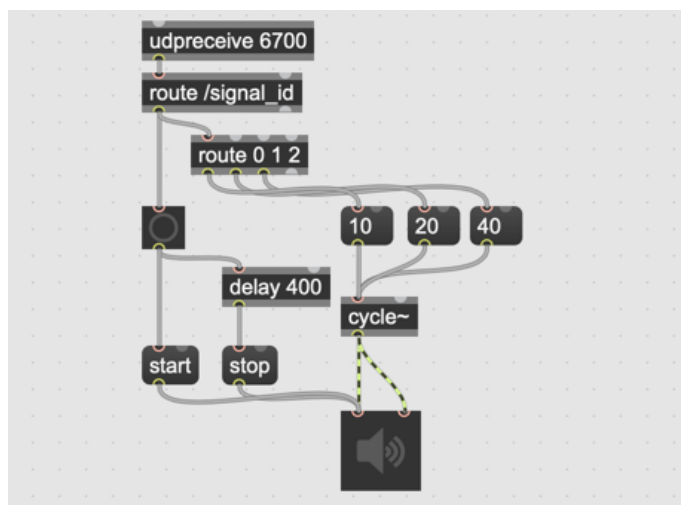


図 5.2 触覚生成ソフトウェアのパッチ



図 5.3 RFID リーダと電磁石が組み込まれた筐体



図 5.4 筐体を取り付けた様子

5.1.2 皮膚上への RFID タグと磁石の取り付け

皮膚に対しては RFID タグと永久磁石の貼り付けを行う。RFID タグには、アンテナとして利用されるコイルが内蔵されているが、ファイナファイバーによって実現した導電層によって RFID の回路を構成するのは難しいと判断した。そこで RFID タグには、発売されている RFID シール（NFC タグ MM-NFCT, サンワサプライ製）から RFID 回路のみを取り外したもの（図 5.5）を使用した。



図 5.5 RFID タグ

このタグとネオジム磁石（ ϕ 13mm, 厚さ 2mm）を筐体の RFID リーダと電磁石の間隔に合わせ、約 5cm ほどの間隔をあけて手首から手の甲にかけて配置した。この状態の腕にファイナファイバーの吹付けを行った。このときの状態を図 5.6 に示す。



図 5.6 手首から手の甲にかけて貼り付けたネオジム磁石と RFID タグ

5.1.3 システムの利用とフィードバック

ネオジム磁石と RFID タグの貼り付けを行った手を壁に設置された筐体にかざすと、RFID による通信が行われ、触覚によって振動のフィードバックを得ることができた。このシステムを利用している様子を図 5.7 に示す。



図 5.7 使用している様子

このように IC カードやスマートフォンを用いずに皮膚上に実装された RFID タグによって外部システムとのやり取りを行い、システムからの応答を皮膚による受け取りが可能なが確認できた。

体験後のユーザーからは自動改札機の利用のような既存のインタラクションではモノとモノを反応させるような印象があったのに対し、本体験によるデジタルスキンによるモノとのインタラクションでは、自分自身がモノに対して働きかけているような感覚があるというフィードバックが得られた。

5.1.4 考察

体験後に得られたフィードバックからデジタル機能を身体に取り込むことでデジタル空間へのインタラクションへの主体感を向上させる可能性が考えられる。また、デバイスを介したインタラクションという感覚を与えていない点から、デジタルスキンを自分の身体の一部として認知している可能性が示唆される。

5.2. デジタルスキンによる人-人 間インタラクション

3.7.1 小々節で実装したように導電膜によって電極を作りタッチセンサを接続することで、皮膚への接触を計測可能なことが確認できた。また4.3小節では、振動の提示が可能なことが確認できた。これらを組み合わせることによって3.2小節で述べたような触覚が共有された身体が実現出来ると考えられる。本節では、複数人で使用し、皮膚に対する接触を計測し他の使用者に触覚によって共有を行うシステムの開発を行う。

5.2.1 システムの概要

このシステムの概要図を図5.8に示す。

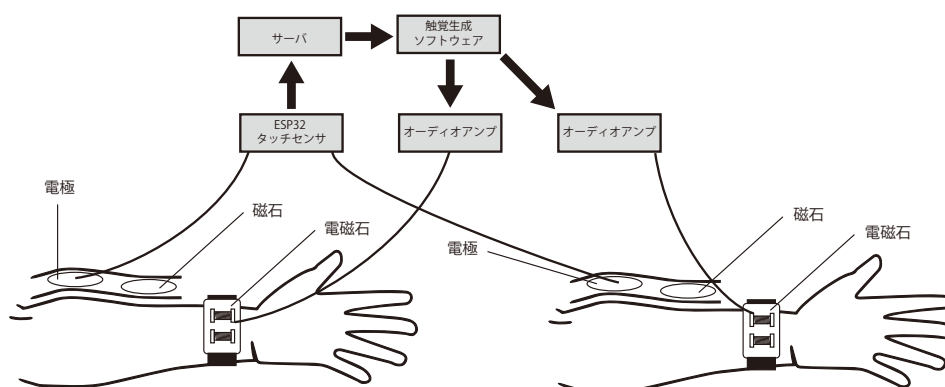


図 5.8 システム概要図

それぞれの使用者の皮膚上に作成した導電層を ESP32 のタッチセンサの入力端子に配線し、皮膚上の接触の計測を行う。ESP32 はタッチセンサの値の変化から接触を認識するとシリアル通信によって MacBook Pro 上で実行されるサーバへ使用者のタッチセンサの状態を送信する。タッチセンサを受け取ったサーバは OSC 通信によって Max/MSP で開発された触覚生成ソフトウェアに触覚生成信号を送信する。この信号を受け取った触覚生成ソフトウェアは接続されたオーディオ・インターフェース (Roland OCTA-CAPTURE) を経由してオーディオアンプ

(SMSL SA-98A) へ触覚信号を出力する。このオーディオアンプでは、入力された触覚信号を増幅させ、接続された電磁石へと出力する。このとき、触覚生成ソフトウェアは接触を送信した使用者以外の使用者に装着した電磁石に対して出力を行うことで、皮膚上で触れた触覚をリアルタイムに共有することが可能である。

図 5.9 に触覚生成ソフトウェアのパッチを示す。この触覚生成ソフトウェアでは、触覚を生成するために事前に加速度センサ (KXR94-2050) で録音された皮膚を押し込んだ際の触覚信号を使用している。この触覚信号を図 5.10 に示す。

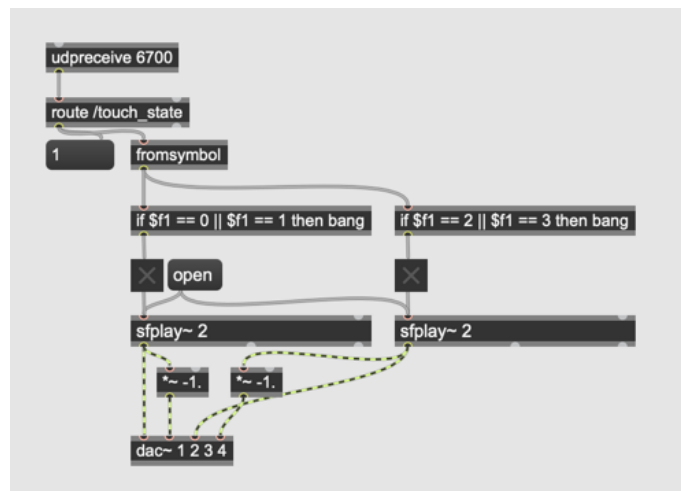


図 5.9 触覚生成ソフトウェアのパッチ

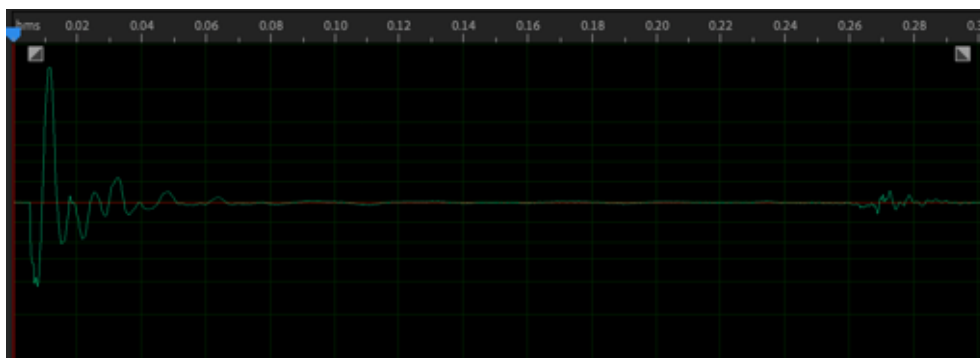


図 5.10 皮膚を押し込んだ際の触覚信号

このアプリケーションでは、使用者が自由に腕を動かすことを可能にするために設置型の電磁石ではなく、ウェアラブル化した電磁石を用いた。この電磁石を図 5.11 に示す。このウェアラブル化した電磁石にはコイルが2つ並べて搭載されており、2つの電磁石から合成した磁界を発生させることで単体の電磁石を使用する場合よりもより広範囲に磁力を伝えることが可能である。

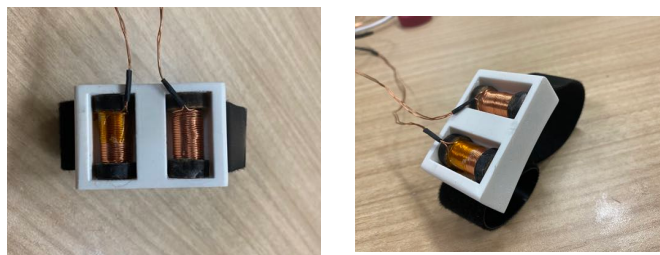


図 5.11 ウェアラブル化した電磁石

5.2.2 使用者への装着

手首にこのウェアラブル化した電磁石を装着し、この電磁石から約 3cm ほどの距離にネオジム磁石を乗せた。また、このネオジム磁石から 2cm ほど離れた位置から絶縁層・導電層を作成し、タッチセンサに接続されたワイヤ電極を接続した。

5.2.3 システムの利用とフィードバック

これらの手順を 2 名の前腕で行い、システムの利用を行った。ひとりの使用者がタッチセンサに接続された導電層に触れるともう一方の使用者に貼り付けられた磁石が振動し、触覚を受け取ることができた。

体験後のフィードバックとして、自分の皮膚を触れているだけなのに相手に対しても同じように触覚が届くのが楽しい・不思議という意見や実際に触れられている気持ちになるというような意見が得られた。

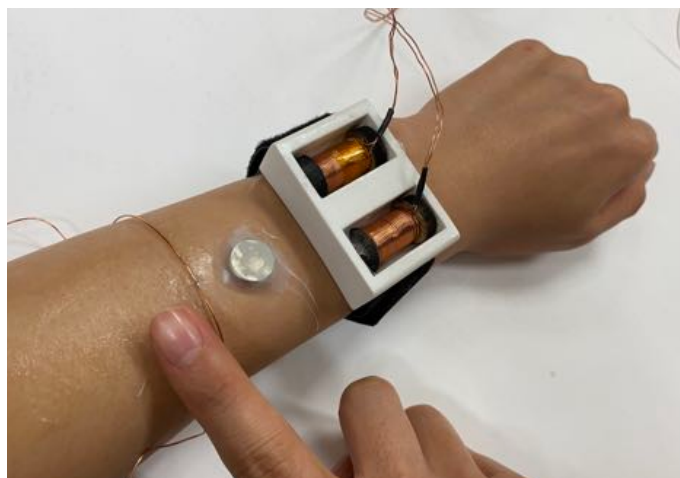


図 5.12 装着した電磁石とタッチセンサ

5.2.4 考察

前者のフィードバックから現実空間の行動とデジタル空間への行動が一体感をもっていることやデジタルスキンをデバイスではなく自分の身体として認識していることなどが考えられる。加えて、「不思議」という感想から、これまでの自分の身体は自分のものであるという自己身体観や他者身体観に変化が生まれることが示唆される。また後者のフィードバックから、デジタルスキンによる触覚提示がデバイスによって提示された感覚ではなく、自分の感覚器官を通じた知覚だと認識されていることが考察される。また、この体験では、磁力を出力する電磁石をウェアラブル化したのが、デバイスを装着している場所と、振動を感じる場所が異なることから、デジタルスキンの特長である現実空間からの触覚を妨げないデジタル空間の触覚知覚が可能であると考えられる。

第 6 章

結 論

第 1 章では、情報通信技術の普及により現実空間とデジタル空間が混ざりあった XR 空間で我々は存在しており、このような空間は、拡張現実や複合現実など呼ばれ、我々は道具を通してこれらの空間を視覚や聴覚によって認知できることについて述べた。そこで、実空間とデジタル空間を知覚可能な身体感覚器官としてはたらくインタフェースの開発を本研究の目的と設定した。

第 2 章では皮膚の構造と受容器による触覚の原理について述べ、触覚が与える認知や錯覚、また、触覚が与える生理的影響について述べた。さらにデジタル空間を知覚可能な身体感覚の実現方法である触覚ディスプレイの進化やこれらのアプリケーションについて実現される認知について述べた。また、ウェアラブルデバイス分野において身体に直接デバイスを実装する皮膚上インタフェースについてまとめた。

第 3 章では実空間とデジタル空間に対して一体感のあるインタラクションを実現する未来を想定し、このインタラクションによって我々はどのような認知を得られるかについて検討した。このインタラクションの実現に対し、現在のインタラクションではそれぞれのインタラクション方法に差があることが問題であると定義した。この問題に対して本研究ではデジタル技術による機能をもったセカンドスキンを提案し、これをデジタルスキンと名付けた。このデジタルスキンに機能をどのように実現するか、要素ごとに設計を行った。

第 4 章では、デジタルスキンの機能を実現するための要素機能として、導電性・絶縁性をもった人工皮膚のプロトタイプを開発した。これらのプロトタイプに対して電気特性の評価を行い 10 の 3 乗オーダーの抵抗値の違いを実現できたことが確認できた。また、これらの機能を組み合わせ、実際の皮膚上に電気回路を実

装し、LEDによる触覚ディスプレイとタッチセンサの実装を行い、皮膚上でデジタル機能を利用できることを確認した。加えて、デジタルスキンから皮膚感覚への介入として振動触覚を提示する機能のプロトタイプを開発した。このプロトタイプを用いてデジタルスキンによって面で触覚を提示した際の知覚実験を行った。この実験では掌で触覚を受け取った場合、移動する振動点の位置を8割以上で正答することができた。また、前腕部においては振動点の位置の正答率が大きく下がったが、振動点の移動方向については8割以上の割合で正答することが確認できた。

第5章では、デジタルスキンのプルーフオブコンセプトとして2つのアプリケーションを実装した。ひとつめのアプリケーションは皮膚上にRFIDタグと振動提示機能を組み合わせたものであり、このシステムを使用してデジタルスキンを用いた人-モノ間インタラクションを実現した。このシステムではRFIDによる通信が成功すると触覚によってフィードバックを行うというインタラクションを肌上に実装されたデジタル機能のみによって実現することができた。この体験からはデジタル機能を身体に取り込むことでデジタル空間へのインタラクションへの主体感を向上させる可能性が示唆された。

ふたつめのアプリケーションはタッチセンサと触覚提示機能を組み合わせ、デジタルスキンを用いた人-人間のインタラクションを実現した。このシステムは複数人での使用を想定し、タッチセンサによって接触が確認されると触覚提示機能により他の使用者に触覚が伝えられる。このシステムによって現実空間からの触覚入力を計測しデジタル空間からの触覚として出力することで、触覚がリアルタイムに共有された肌を実現することができた。この体験によって実空間とデジタル空間に対して一体感のあるインタラクションが実現できたと考えられる。また、自己の身体観や他者観が変化する可能性が示唆された。

本研究では開発したデジタルスキンを使用することによって人にどのような影響を与えるかの調査が不十分である。そこで今後はこれらを多くの人に使用してもらい使用者の変化の確認を行いたい。また、皮膚上インタフェースとウェアラブルデバイスの差が単なる小型化ではなく、身体認知をはじめとした我々の認知にどのような影響を与えているのかを明らかにしたい。これらを科学的に解明す

ることで、第3章で検討した以上のさまざまな認知の獲得に繋がるだろう。触覚によるリアルタイムのコミュニケーションでは、触覚によって他者の情報を得ることで我々の意識内に新たな他者観が生まれると考えられる。また、これらへの取り組みを通して、人間がテクノロジーを用い、融合していくことでどのように進化していくのか、探求を行いたい。

謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見から多くのプロジェクトに対して指導して頂いた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太教授に心から感謝いたします。工学に対しての視野しか持たなかった自分に対し、技術をどのように使っていくかを念頭に置いた考え方は研究活動だけでなく今後の人生において大いに役立つと感じています。

研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心から感謝いたします。自分の妄想のようなアイデアを、研究という形に立て直して頂かなければこのような論文にまとめることができなかつたと思います。

プロトタイプを実装するにあたり多くの助言をいただきました花王株式会社の谷島隆士さん、岡田智成さんに心から感謝します。また、研究の方向性に対して助言をいただきました株式会社ロフトワークの小原和也さん、柳原一也さんに心から感謝します。

また、Social Haptics Projectとして共同で研究を行った名古屋工業大学の田中由浩准教授、明治学院大学の犬飼佳吾准教授、須山巨基さん、NTTコミュニケーション基礎研究所の渡邊淳司さん、駒崎掲さんなどには大変お世話になりました。みなさまの深い専門的な知見からの触覚コミュニケーションに対する議論を通して多面的に触覚コミュニケーションの価値について思考を深めることが出来ました。

Embodied Media Projectのメンバーにはさまざまな方がいらっしゃり、自分に新しい世界をたくさん見せていただきました。

Embodied Media Projectの先輩である早川裕彦さん、Internet of Haptics Projectの先輩であった加藤大弥特任助教に心から感謝します。お二人と触覚によるコミュニケーションについての議論をすすめることで、自分の研究のきっかけとなる「触

覚コミュニケーションにはどのようなインタフェースが適しているのか」という疑問にたどり着くことができました。

ハッキングスタジオでは、下川和俊さん、鍋島純一さん、山本大介さんなどと楽しい時間を過ごさせていただきました。古川泰地さんとはサレジオ高専のSP2LCで出会ってから9年の関わりになりますが、近い分野に取り組みながらも常に少し違った視点を持っており日常会話から多くのことを学ばせて頂きました。記憶をたどると413教室での毎日のプロジェクト活動がKMDでの活動の基礎となっていることをひしひしと感じます。また、代田ケンイチロウさんには数々の刺激を頂きました。特に自分の関心が強かった認知拡張についての議論は非常に刺激的でした。研究外の生活でも非常に仲良くしていただいたことや数々の失礼を笑って許してくれたことへ感謝いたします。

浅田風太さん、松田健人さんとはラボに泊まりこみ、KABUTOの制作に取り組んだのはいい思い出です。何の下心もなくただ面白いものを作ろうという2人の制作への熱気は一緒にものづくりをしていて非常に心地良いものでした。この言葉をラボでひとり書いていると、あの時間が非常に恵まれた時間であったことを実感しています。また、竹内大裕さんとは一緒にプロジェクトに所属し、さまざまなプロトタイプを作成しました。このプロトタイプから、研究に役立つさまざまな知見を得ることができました。

研究へのご助力や日常生活へいつも気をかけてくださった児島絵美理さんをはじめ Embodied Media や KMD のスタッフの皆様へ感謝いたします。

最後に大学院への進学を支援し、自分のわがままをいつでも応援してくれた両親と家族に心から感謝いたします。みなさま、本当にありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] 前野隆司. ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 772–775, 2000. doi:10.7210/jrsj.18.772.
- [2] Y. Ban, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216, 2012. doi:10.1109/HAPTIC.2012.6183793.
- [3] Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Unlimited corridor: Redirected walking techniques using visuo haptic interaction. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2929464.2929482>, doi:10.1145/2929464.2929482.
- [4] T. H. MASSIE. The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects. *Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994*, pp. 295–300, 1994. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10025257419/>.
- [5] 佐藤誠. 空間インタフェース装置 spidar の提案. 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J74-D-II, No. 7, pp. 887–894, 1991. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10022411837/>.
- [6] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity grabber: Wearable haptic display

- to present virtual mass sensation. In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '07, p. 8–es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/1278280.1278289>, doi:10.1145/1278280.1278289.
- [7] Takaki Murakami, Tanner Person, Charith Lasantha Fernando, and Kouta Minamizawa. Altered touch: Miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3084822.3084836>, doi:10.1145/3084822.3084836.
- [8] Tadatoshi Kurogi, Yuji Yonehara, Roshan Lalintha Peiris, Takeshi Fujiwara, and Kouta Minamizawa. Haptic plaster: Soft, thin, light and flexible haptic display using dea composed of slide-ring material for daily life. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/3305367.3327983>, doi:10.1145/3305367.3327983.
- [9] Taichi Furukawa, Nobuhisa Hanamitsu, Yoichi Kamiyama, Hideaki Nii, Charalampos Krekoulotis, Kouta Minamizawa, Akihito Noda, Junko Yamada, Keiichi Kitamura, Daisuke Niwa, Yoshiaki Hirano, and Tetsuya Mizuguchi. Synesthesia wear:full-body haptic clothing interface based on two-dimensional signal transmission. *SA '19*, p. 48–50, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/3355049.3360524>, doi:10.1145/3355049.3360524.
- [10] Nobuhisa Hanamitsu, Haruki Nakamura, Masashi Nakatani, and Kouta Minamizawa. Twech: A mobile platform to search and share visuo-tactile experiences. In *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Ap-*

- plications*, SA '15, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2818427.2818461>, doi: 10.1145/2818427.2818461.
- [11] 早川裕彦, 神山洋一, 松園敏志, 徐萌芸, 田中培仁, 本山拓人, 鈴木規之, 南澤孝太)1). 触覚伝送を伴うバスケットボールのライブフィードリングの実践. pp. 6–9, 2018.
- [12] Hsin-Liu Cindy Kao, Abdelkareem Bedri, and Kent Lyons. Skinwire: Fabricating a self-contained on-skin pcb for the hand. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 3, September 2018. URL: <https://doi.org/10.1145/3264926>, doi:10.1145/3264926.
- [13] Hsin-Liu (Cindy) Kao, Christian Holz, Asta Roseway, Andres Calvo, and Chris Schmandt. Duoskin: Rapidly prototyping on-skin user interfaces using skin-friendly materials. In *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, p. 16–23, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2971763.2971777>, doi:10.1145/2971763.2971777.
- [14] Martin Weigel, Aditya Shekhar Nittala, Alex Olwal, and Jürgen Steimle. Skinmarks: Enabling interactions on body landmarks using conformal skin electronics. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 3095–3105, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025704>, doi:10.1145/3025453.3025704.
- [15] Aditya Shekhar Nittala, Arshad Khan, Klaus Kruttwig, Tobias Kraus, and Jürgen Steimle. Physioskin: Rapid fabrication of skin-conformal physiological interfaces. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–10, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3313831>.

- 3376366, doi:10.1145/3313831.3376366.
- [16] Youngkyung Choi, Neung Ryu, Myung Jin Kim, Artem Dementyev, and Andrea Bianchi. Bodyprinter: Fabricating circuits directly on the skin at arbitrary locations using a wearable compact plotter. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, p. 554–564, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3379337.3415840>, doi:10.1145/3379337.3415840.
- [17] Akihito Miyamoto, Sungwon Lee, Nawalage Florence Cooray, Sunghoon Lee, Mami Mori, Naoji Matsuhisa, Hanbit Jin, Leona Yoda, Tomoyuki Yokota, Akira Itoh, Masaki Sekino, Hiroshi Kawasaki, Tamotsu Ebihara, Masayuki Amagai, and Takao Someya. Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nanomeshes. *Nature Nanotechnology*, Vol. 12, No. 9, pp. 907–913, 2017. doi:10.1038/nnano.2017.125.
- [18] 総務省. 通信利用動向調査, 2019.
- [19] General Electric. *Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines*. 2012. URL: https://www.ge.com/jp/sites/www.ge.com.jp/files/Industrial_Internet_Japan_WhitePaper_0517_2s.pdf.
- [20] 純一暦本. オグメンテッド・ヒューマン—AI と人体科学の融合による人機一体、究極の IF が創る未来—. エヌ・ティー・エス, 2018. URL: <https://elib.maruzen.co.jp/elib/html/BookDetail/Id/3000051014/>.
- [21] 吉晃岩村. ヒト触覚受容器の構造と特性. 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 5, pp. 438–444, 1984. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/130000847527/>, doi:10.7210/jrsj.2.438.
- [22] 岩村吉晃. 能動的触知覚（アクティヴタッチ）の生理学. バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 171–177, 2007. doi:10.3951/sobim.31.171.

- [23] Katz David, 東山岩切 絹代. 触覚の世界 : 実験現象学の地平. Der Aufbau der Tastwelt. 新曜社, 東京, Japan, 2003 2003.
- [24] James J. Gibson. Observations on active touch. *Psychological Review*, Vol. 69, No. 6, pp. 477–491, 1962. doi:10.1037/h0046962.
- [25] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90, 2000. doi:10.1109/VR.2000.840369.
- [26] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998. URL: <https://doi.org/10.1038/35784>, doi:10.1038/35784.
- [27] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying perceived size of a handled object through hand image deformation. *Presence*, Vol. 22, No. 3, pp. 255–270, 2013. doi:10.1162/PRES_a_00154.
- [28] 真愉子小西, 英也兒玉. タッチケア/ベビーマッサージの児への臨床的効果とその生理的メカニズムに関する文献検討. 秋田県母性衛生学会雑誌, No. 25, pp. 30–39, jan 2012.
- [29] 花王株式会社. 花王 — 手で触れたときにやわらかさ・心地よさを実感するほど唾液中のオキシトシン量が増えることを確認. <https://www.kao.com/jp/corporate/news/rd/2020/20201013-001/>, アクセス日 : 2021/01/06.
- [30] Tachi Susumu. Tachilab - 触原色. <https://tachilab.org/jp/about/hpc.html>, アクセス日 : 2021/01/06.
- [31] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L. Klatzky, Scott E. Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P. Sample. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18,

- p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173894>, doi:10.1145/3173574.3173894.
- [32] Icc — 《触感 tv (tactile tv) 》 (2018). <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/tactile-tv/>, アクセス日: 2021/01/06.
- [33] Icc — 《公衆触覚伝話》 (2019). <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/public-booth-for-vibrotactile-communication/>, アクセス日: 2021/01/06.
- [34] 小野寺将, 三岳裕玄, 長谷川晶一, Panut Wibulpolprasert, Alfonso Balandra Antelis. 広範囲にわたる振幅と周波数の振動を用いた常時触覚通信. pp. 2–5, 2019.
- [35] Xin Liu, Katia Vega, Pattie Maes, and Joe A. Paradiso. Wearability factors for skin interfaces. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016, AH '16*, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2875194.2875248>, doi:10.1145/2875194.2875248.
- [36] SungHyuk Yoon, Sang-su Lee, Jaemyung Lee, and KunPyo Lee. Understanding notification stress of smartphone messenger app. In *Proceedings of the extended abstracts of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI EA '14*, pp. 1735–1740, New York, New York, USA, 2014. ACM Press. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2559206.2581167>, doi:10.1145/2559206.2581167.
- [37] Martin Pielot and Luz Rello. The Do Not Disturb Challenge. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI EA '15*, pp. 1761–1766, New York, New York, USA, 2015. ACM Press. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2702613.2732704>, doi:10.1145/2702613.2732704.

- [38] Shunichi Kasahara, Mitsuhiro Ando, Kiyoshi Suganuma, and Jun Rekimoto. Parallel eyes: Exploring human capability and behaviors with paralleled first person view sharing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1561–1572, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2858036.2858495>, doi:10.1145/2858036.2858495.
- [39] 中野恵之, 東山幸央. エレクトロスピンニング法によるナノファイバー製造技術と用途. 繊維学会誌, Vol. 66, No. 12, pp. P_404–P_412, 2010. doi:10.2115/fiber.66.P_404.
- [40] 花王株式会社. 花王の顔|医療領域に向けた最新基盤研究, 2019. https://www.kaeo.com/jp/kaonokao/kaonokao/003_finefiber/ff/basic_research/, アクセス日: 2021/01/06.
- [41] 仲谷正史, 笥康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 館 [ススム]. 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践 (特集ハプティックコンテンツ). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 593–603, 2014. doi:10.18974/tvrsj.19.4_593.
- [42] Y. Tanaka, D. P. Nguyen, T. Fukuda, and A. Sano. Wearable skin vibration sensor using a pvdf film. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 146–151, 2015. doi:10.1109/WHC.2015.7177705.
- [43] Kasun Karunanayaka, Sanath Siriwardana, Chamari Edirisinghe, Ryohei Nakatsu, and Ponnampalam Gopalakrishnakone. Magnetic Field Based Near Surface Haptic and Pointing Interface. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 8007 LNCS, pp. 601–609. 2013. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39330-3_65, doi:10.1007/978-3-642-39330-3_65.

- [44] Malte Weiss, Chat Wacharamanatham, Simon Voelker, and Jan Borchers. Fingerflux: Near-surface haptic feedback on tabletops. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, p. 615–620, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2047196.2047277>, doi:10.1145/2047196.2047277.
- [45] Jess McIntosh, Paul Strohmeier, Jarrod Knibbe, Sebastian Boring, and Kasper Hornbæk. Magnetips: Combining fingertip tracking and haptic feedback for around-device interaction. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, No. Chi, pp. 1–12, 2019. doi:10.1145/3290605.3300638.
- [46] 鵜重誠. Magnetouch:身体への永久磁石貼り付けによる空中触覚ディスプレイ. Master's thesis, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科, 2019.
- [47] Printed electronics technology - bare conductive. <https://www.bareconductive.com/>, アクセス日: 2021/01/06.