

Title	屋外MR空間における触覚インタラクションシステムの研究
Sub Title	Haptic interaction system for outdoor MR spaces
Author	山本, 絢之介(Yamamoto, Junnosuke) 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	2023
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2023年度メディアデザイン学 第1076号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002023-1076

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 2023年度

屋外MR空間における
触覚インタラクションシステムの研究



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

山本 絢之介

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。

山本 紉之介

研究指導委員会：

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)

陳 敦雅 准教授 (副査)

修士論文 2023 年度

屋外 MR 空間における 触覚インタラクションシステムの研究

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

近年、視覚・聴覚に関するデバイスは、ユーザの場所に依存せずに使用可能な軽量かつウェアラブルな形へと変化している。例えば、HMD は VR 空間と実空間のシームレスなインタラクションを実現しつつある。一方で、触覚デバイスについては可搬性や装着性を考慮した開発は未成熟である。多くの触覚デバイスは、豊かな触覚フィードバックと引き換えに屋内・実験室環境に限定されている。したがって、位置情報を活用した MR 空間上での触覚フィードバックが実現すれば、空間的な制限を受けることなく、屋外空間において数十 m 規模の物体の形状知覚などの触覚的なインタラクションが可能となるため、屋外空間において触覚的なインタラクションを伴う VR アクションゲームなどへの応用が考えられる。

そこで本研究では、屋外空間での利用を前提とし、RTK-GNSS による位置情報の取得を行う触覚インタラクションシステムを提案する。本システムを用いた手のひらへの圧力提示の有無による屋外 MR 空間上のオブジェクトへの手の沈み込み量の評価実験により、圧力提示によってオブジェクトに対する空間位置知覚精度の向上を確認した。

キーワード：

触覚, 拡張・複合現実, 屋外, ウェアラブル

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

山本 絢之介

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2023

Haptic Interaction System for Outdoor MR Spaces

Category: Science / Engineering

Summary

In recent years, devices related to vision and hearing have shifted to lightweight and wearable forms that can be used independent of the user's location. On the other hand, the development of haptic devices that take portability and wearability into consideration is still in its infancy. Many tactile devices are limited to indoor and laboratory environments in exchange for providing rich tactile feedback. Therefore, if haptic feedback in the MR space is realized by utilizing location information, it is possible to create a device that can provide haptic feedback on a scale of tens of meters in an outdoor space without being limited by space. Haptic interactions such as shape perception of objects in outdoor spaces on a scale of several tens of meters will be possible. Therefore, it can be applied to VR action games with haptic interaction in outdoor spaces.

In this study, I propose a haptic interaction system that acquires location information by RTK-GNSS for use in outdoor spaces. Through experimental evaluation of the amount of hand immersion in objects in outdoor MR spaces, with or without the provision of pressure cues to the palm using this system, it was confirmed that the presentation of pressure improved the accuracy of spatial position perception of objects.

Keywords:

haptics, AR/MR, outdoor, wearable

Keio University Graduate School of Media Design

Junnosuke Yamamoto

目 次

第 1 章	序論	1
1.1.	現実空間とデジタル空間の境界	1
1.2.	デジタルツインと空間型 XR	1
1.3.	都市型 XR における主観的体験のデザイン	4
1.4.	本研究の目的	4
1.5.	本論文の構成	5
第 2 章	関連研究	6
2.1.	空間型 XR 技術	6
2.2.	地理空間情報技術	8
2.3.	触覚提示技術	11
2.3.1	ヒトの触覚機構	11
2.3.2	アクティブタッチ	13
2.3.3	遭遇型触覚提示装置	15
2.3.4	装着型触覚提示デバイス	16
2.4.	本章のまとめ	20
第 3 章	屋外 MR 空間における触覚フィードバックシステムの提案	21
3.1.	本研究の目標	21
3.2.	共同研究の体制	21
3.3.	屋外 MR 空間における触覚インタラクションの検討	22
3.4.	提案手法	23
3.5.	システム設計	25

3.6. 触覚デバイスのプロトタイプ	26
3.6.1 手首装着型触覚デバイス	26
3.6.2 掌装着型触覚デバイス	29
3.7. 触覚インタラクションが可能な MR 空間の構築	31
3.8. 屋内 MR 空間におけるテスト	33
3.9. GNSS による位置情報取得システム	34
3.10. 本章のまとめ	36
第 4 章 デバイスとシステムの実装と評価	37
4.1. 屋外 MR 空間におけるインタラクション	37
4.2. 技術的評価	39
4.2.1 掌装着型触覚デバイスの技術的評価	39
4.2.2 触覚インタラクションシステムの技術的評価	42
4.3. 屋外 MR 空間における触覚インタラクションの検証	43
4.4. 考察	47
第 5 章 結論	49
謝辞	51
参考文献	52

目 次

1.1	防災エリアマネジメント支援システム ³	2
1.2	Pokémon GO ⁵	3
1.3	Meta Quest 3 ⁶	4
1.4	Apple Vision Pro ⁷	4
2.1	トラッキング方式 (Jiang ら [1] より抜粋)	8
2.2	RTK 測位	10
2.3	ヒトの無毛部皮膚断面図 (前野ら [2] 参照, 改変)	12
2.4	手を用いた探索方法 出展: Jones and Lederman [3]	14
2.5	各探索方法によって得られる対象物の情報 出展: Jones and Lederman [3]	14
2.6	ドローンを使用した遭遇型触覚提示装置 (Yamaguchi ら [4] より 抜粋)	16
2.7	EncounteredLimbs (Horie ら [5] より抜粋)	16
2.8	CyberGrasp ⁵	17
2.9	HaptX Gloves G1 ⁶	17
2.10	GravityGrabber (Minamizawa ら [6] より抜粋)	18
2.11	掌装着型触覚提示デバイス (Minamizawa ら [7] より抜粋)	19
2.12	PIVOT (Kovacs ら [8]) より抜粋	19
2.13	電気刺激による触覚提示デバイス (Pedro ら [9] より抜粋)	19
3.1	触覚インタラクションシステムのコンセプト	24
3.2	触覚インタラクションシステムの処理フロー	25
3.3	手首装着触覚デバイスの外観	27
3.4	手首装着型触覚デバイスの構成	27

3.5	上への牽引	28
3.6	下への牽引	28
3.7	左への牽引	28
3.8	右への牽引	28
3.9	掌装着型触覚デバイスの外観	29
3.10	掌装着型触覚デバイスの構成	30
3.11	掌装着型触覚デバイスの動作例	30
3.12	RTK-GNSS モジュールを搭載した掌装着型触覚デバイス	31
3.13	壁	32
3.14	クリスタル	32
3.15	弾性のある球体	32
3.16	風船	32
3.17	屋内 MR 空間での複数人インタラクション	33
3.18	デモンストレーションの様子	34
3.19	触覚インタラクションシステム	36
4.1	屋外 MR 空間	37
4.2	屋外 MR 空間における複数人インタラクションの様子	39
4.3	デバイス動作時の圧力変化	40
4.4	掌装着型触覚デバイスの測定の様子	41
4.5	掌装着型触覚デバイスの技術的評価	41
4.6	位置情報精度測定場所	42
4.7	実験のセットアップ	44
4.8	実験の様子	44
4.9	屋外 MR オブジェクトへの手の沈み込み量の平均と標準偏差	46

表 目 次

2.1	感覚の分類 出展：河田ら [10]	11
2.2	機械受容器の特性（前野ら [2] より抜粋）	13

第 1 章

序 論

1.1. 現実空間とデジタル空間の境界

2017年に公開された映画「劇場版ソードアート・オンライン-オーディナル・スケール」¹では、2026年の近未来において誰もがAR（Augmented Reality）ゴーグルを装着し、現実空間とデジタル空間がより密接な世界を描いている。作品中では、現実空間を舞台としたARゲームにおいて、走り回りながらデジタル空間のプレイヤーやモンスターと戦闘するシーンが多く描かれている。このような現実空間とデジタル空間の境界のない体験は、現実空間にいながらゲームの世界に入り込むことが可能となるため、非常に没入感が高く魅力的であると考えられる。一方で、現在スマートフォンなどを介した現実空間とデジタル空間の接続は日常的であるものの、デジタル空間はディスプレイの中の世界であり、デジタル空間上のオブジェクトに触れられないなど明確な境界を感じてしまう。

1.2. デジタルツインと空間型XR

現実空間とデジタル空間の境界が非常に薄いコンテンツとしてデジタルツインや空間型XR（Extended Reality）がある。デジタルツインとは、現実空間のオブジェクトやプロセスに関する情報をもとに、デジタル空間上に同様の環境を再現したものであり、現実空間とデジタル空間の相互作用により製造業などにおいて効率的な開発サイクルを実現するものとして提案された。

¹ <https://sao-movie.net/>

デジタルツインの代表的な事例の一つとして PLATEAU²が挙げられる。PLATEAU は、2020 年より国土交通省が主導する 3D 都市モデル整備・活用・オープンデータ化プロジェクトであり、防災や都市設計など 3D 都市モデルを活用した多様なユースケースを提案している。具体例として、東京都港区にある竹芝エリアでは「バーチャル竹芝」の 3D 都市モデルを構築し、街区カメラによる混雑状況等を 3D ビューア上で可視化する「防災エリアマネジメント支援システム」³が開発されている。このシステムにより、災害時における一時滞在施設の混雑状況や周辺エリアの危険箇所など、竹芝エリアに関する災害・防災情報を統合・共有可能となるため、効率的な避難誘導が可能となっている。

他にもデジタルツインを活用している事例は、モビリティに焦点を当てた都市開発を行うトヨタ自動車の Woven City⁴や、防災への活用を目的とした内閣府の CPS4D（Cyber-Physical Synthesis for Disaster Resilience）など多岐にわたる。



図 1.1: 防災エリアマネジメント支援システム³

また、空間型 XR の代表事例として Pokémon Go⁵が挙げられる。本論文では空間型 XR を、AR, VR (Virtual Reality), MR (Mixed Reality) などの総称である XR を現実空間と作用させている分野として扱う。Pokémon GO は、2016 年に開

2 <https://www.mlit.go.jp/plateau/>

3 <https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc22-019/>

4 <https://www.woven-city.global/jpn/>

5 <https://www.pokemongo.jp/>

発されたスマートフォン向け位置情報ゲームアプリケーションであり、売上高やダウンロード数に関する5つのギネス記録を獲得するなど、世界に大きなインパクトを与えた。Pokémon GOを皮切りに、ARやMRとGPS（Global Positioning System）による位置情報を組み合わせたアプリケーションは現在に至るまで多く開発が行われており、注目されている分野である。

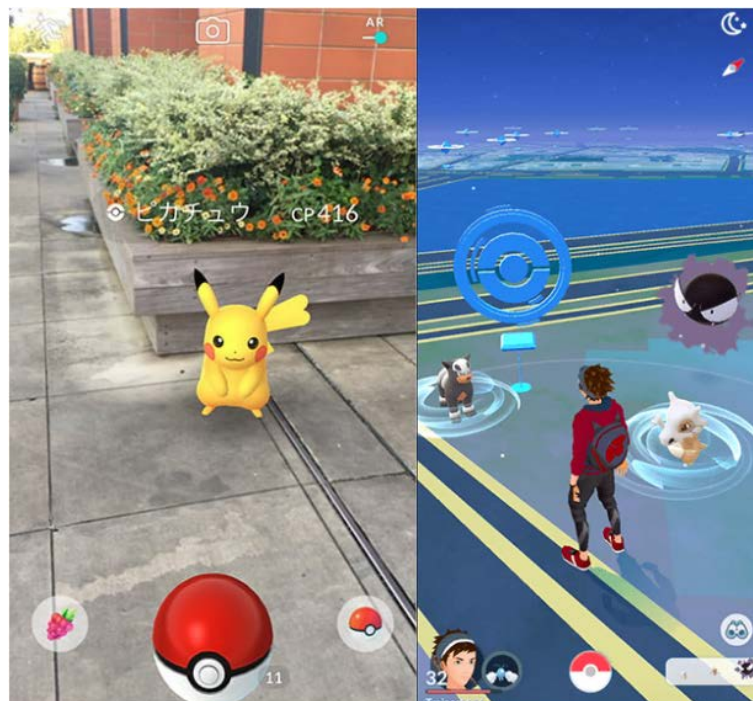


図 1.2: Pokémon GO⁵

スマートフォンのほかにも、より視覚的な没入感の高いコンテンツを提供する持ち運びが可能なHMD（Head Mounted Display）では、Meta Quest 3⁶やApple Vision Pro⁷によって、現実空間とデジタル空間のシームレスな接続を実現しつつある。

これらのデバイスの普及により、今後デジタルツインや空間型XR空間におけるインタラクションはより日常的なものとなると考えられる。

6 <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>

7 <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>

図 1.3: Meta Quest 3⁶図 1.4: Apple Vision Pro⁷

1.3. 都市型 XR における主観的体験のデザイン

ここでは、都市型 XR を、都市空間全体でインタラクション可能な XR として扱う。空間型 XR として 1.2 節で述べた Pokémon Go も都市型 XR の一つといえ、都市型 XR では、駅や商業施設などのランドマークに紐づけられたコンテンツが実装されており、都市全体を移動し実際にその場所に向かいうというマクロな体験が可能となっている。

一方で現地での体験に焦点を当てると、利用者はスマートフォンを手に集まるまでにとどまるため、ハプティクスなどのフィジカルな主観的体験や、個人間の相互的なインタラクションといった現地でのミクロな体験についての議論は行われていない。

1.4. 本研究の目的

空間型 XR として、Apple Vision Pro が開発されるなど現実空間とデジタル空間がよりシームレスに接続可能となっており、デジタル空間とのインタラクションが非常に身近なものとなりつつある。また、空間型 XR と GPS による位置情報を組み合わせた Pokémon Go などのトレンドがある中で、屋外でのインタラクションが増加しつつある。そのインタラクションの一つとしてハプティクス技術を活

用することで、今後現実空間とデジタル空間の接続が日常的となった社会における、個々人のフィジカルな体験がより豊かなものとなると考えられる。

一方で、現実空間とデジタル空間の境界のない体験を実現するためには、都市型 XR 空間における個人の主観的な体験をデザインすることが重要であり、その手段の一つとしてハプティクスの活用などが考えられる。

そこで本研究では、デジタルツインや都市型 XR という大規模多人数の屋外 XR 環境において、個人の主観的な体験を提供するシステムを提案する。

1.5. 本論文の構成

第1章では、現実空間とデジタル空間を接続するものとして、デジタルツインや空間型 XR について述べた。第2章では、空間型 XR とそこで用いられている地理空間情報技術に関する研究を示し、今回のアプローチとして触覚提示技術に関する研究を示す。第3章では、本論文の目標や貢献とシステムコンセプトについて述べ、プロトタイプの作成とシステム構築を行う。第4章では、屋外 MR 空間における触覚インタラクションの作成と、そのシステムの評価について述べる。最後に第5章では、本論文の結論を述べる。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. 空間型 XR 技術

XR では、現実空間上のオブジェクトやハンドジェスチャなどのフィジカルな情報を、センサやクラウドを介してデジタル空間の情報へ変換することで、現実空間のマッピングやオブジェクトと人のインタラクションをデジタル空間上で再現している。Balakrishnan ら [11] はこのような現実空間とデジタル空間を接続するコンセプトを、空間コンピューティングと呼んでいる。2023 年 6 月に発表された Apple Vision Pro は、自身を「デジタルコンテンツを現実の世界とシームレスに融合しながら、実世界や周囲の人とのつながりを保つことができる革新的な空間コンピュータ¹」としており、空間コンピューティングを実現するデバイスの一つである。空間型 XR ではこのようなデバイスを使用した空間コンピューティングにより、ヒトやモノの現実空間での動作をデジタル空間での意味を持つ動作へ変換することが可能となる。

これまで開発されてきた空間型 XR 技術を利用した体験では、HMD やスマートフォンを用いたものがあり、これらには現実空間を認識するために様々なセンサやカメラが使用されている。多くの HMD には、周囲の環境をマッピングしデジタル空間のコンテンツを現実空間に重ね合わせるためのセンサ、カメラ、深度センサが内蔵されている [12]。これらのセンサによって取得した x, y, z 方向の位置と各軸に対する回転である roll, pitch, yaw からなる 6 自由度 (6DoF) の情報から、使用者の頭の動きなどをデジタル空間上に反映している。この際のトラッ

1 <https://www.apple.com/jp/newsroom/2023/06/introducing-apple-vision-pro/>

キング方法により、HMD 外部のセンサによって受動的にトラッキングされるアウトサイドイン方式と、HMD 内部のセンサによって能動系にトラッキングするインサイドアウト方式に分けられる (図 2.1)。アウトサイドイン方式の HMD である HTC Vive²では、外部センサとして2つのベースステーションと呼ばれる赤外線レーザーセンサを使用しており、ベースステーションの視野角内であれば全身の動きをトラッキング可能である。インサイドアウト方式の HMD である Meta Quest では、内部センサとして4つの赤外線カメラなどを使用しており、ベースステーションが不要であるため、アウトサイドイン方式と比較し広い空間でのトラッキングを可能としている。一方で赤外線カメラの視野角はベースステーションと比較し狭いため、全身の動きのトラッキングは視野角に制限される。また SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術の開発により、使用者の動きと同時に周囲の現実空間のマッピングが可能となっている。特にカメラ画像をもとにマッピングを行う vSLAM (Visual SLAM) はカメラ性能の向上や画像処理技術の進化により近年多く研究されている。このように、HMD やベースステーションによって使用者の動きを取得することで、自由に歩き回ることのできるフリーローム型 VR シューティングゲーム “ZERO LATENCY VR”³や、ハプティックベストによる全身での VR 体験が可能な “The VOID”⁴などの空間型 XR 体験が提供されている。

2 <https://www.vive.com/jp/>

3 <https://zerolatencyvr.com/>

4 <https://www.thevoid.com/>

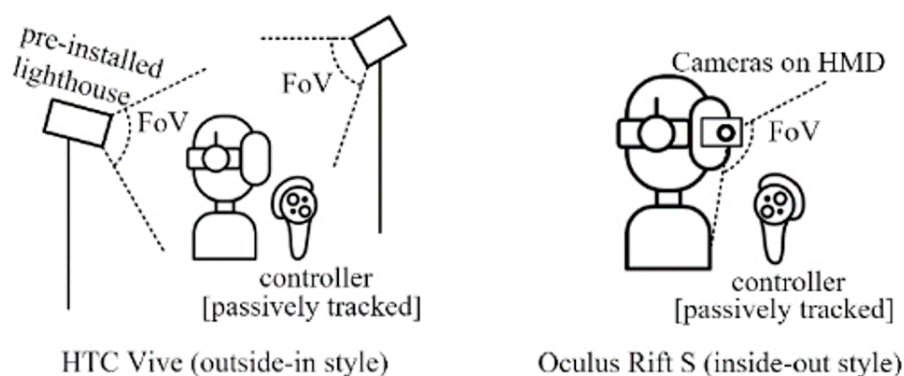


図 2.1: トラッキング方式 (Jiang ら [1] より抜粋)

また、スマートフォンにおいても HMD 同様多くのセンサが搭載されており、GPS、磁気方位、速度計、加速度計、ジャイロスコープなどのデータを使用し位置や動きを推定している [13]。スマートフォンを使用した現実世界を舞台とした AR スポーツである“HADO” [14] では、ハンドジェスチャ入力によりエネルギーボールの射出やシールドの展開し対戦することが可能となっている。HADO の特徴として AR でのスポーツを可能とする、デバイスの可搬性があげられる。HADO はスマートフォンを利用した HMD とリストバンド型のデバイスのみでプレイ可能であり、いずれのデバイスもウェアラブルかつワイヤレスであるため、多くの VR コンテンツのように重い HMD や銃型のデバイスを装備する必要がなく、フィールドでの自由な移動を実現している。これらは屋内空間での体験となっているが、屋外空間での利用を前提としたマルチプレイ AR ゲームに関する研究 [15] も行われている。

このように、現実空間を移動しながらインタラクションが可能な XR 体験が開発されている。

2.2. 地理空間情報技術

地理空間情報技術とは、地理・空間に関係づけられた情報を指し、身近な例では写真を撮影した際に紐づけられる撮影地の地理情報などがある。このような地

理情報は主に GNSS (Global Navigation Satellite System) によって取得されている。GNSS とは、アメリカの GPS, 日本の QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), 中国の BeiDou, EU の Galileo, ロシアの GLONASS など, 世界各国の衛星を利用した測位システムである。GNSS の中でも代表的な GPS では, 地球を 12 時間で周回する 24 以上の衛星と地上局によって位置, 速度, 時間などの情報を取得している。その際の位置情報の取得精度は通常 3 m 程度であるが, より高精度な位置情報取得を行うため, 既知の位置情報を持つ基準局と測定点である移動局の 2 地点の位置情報から移動局の位置情報を求める D (Differential) GPS 測位と RTK (Real Time Kinematic) -GPS 測位がある。

DGPS 測位では, 基準局において GPS から取得した位置情報と既知の基準局の位置情報を比較し, その差を移動局に送信することで GPS の持つ誤差を補正する。これにより 1 m 程度の精度を実現している。RTK 測位では, 図 2.2 に示すように基地局と移動局の 2 点で位相を取得し, 2 地点の位相差をもとに移動局の位置情報を補正することでセンチメートル単位の精度を実現している。

Francesco ら [16] は, 屋外 AR 空間での位置情報取得として RTK-GPS を利用する際の精度を評価しており, RTK-GPS によってセンチメートル単位の位置情報取得が可能であることを確認し, RTK 測位では基地局 1 つに対し複数の移動局が使用可能であることから, 複数のユーザの動きを正確に追跡可能となると述べている。また Zheng ら [17] は, vSLAM を使用するデバイスでは視覚的特徴の少ない砂漠や深海といった屋外空間において自己位置推定が困難であるという指摘をしているが, これに対して RTK-GPS では画像を用いずに高精度な位置情報取得が可能であるため, 屋外空間での使用を拡大すると述べている。

地理空間情報技術を活用した研究は多く行われており, 地図アプリなどに限らず Pokémon Go のような空間型 XR と組み合わせた AR アプリケーションがある。2000 年に Thomas ら [18] によって開発された “ARQuak” は GPS による位置情報を利用した世界初の屋外空間で利用可能な AR ゲームであるとされている。また GPS による位置情報を利用した MR ゲームである “Can You See Me Now?” [19] は, 3D マップ上に再現された都市にいるオンラインのプレイヤーを, GPS や WiFi を携帯した “ランナー” が実際に都市を移動して追跡するという, 現実空間とデジ

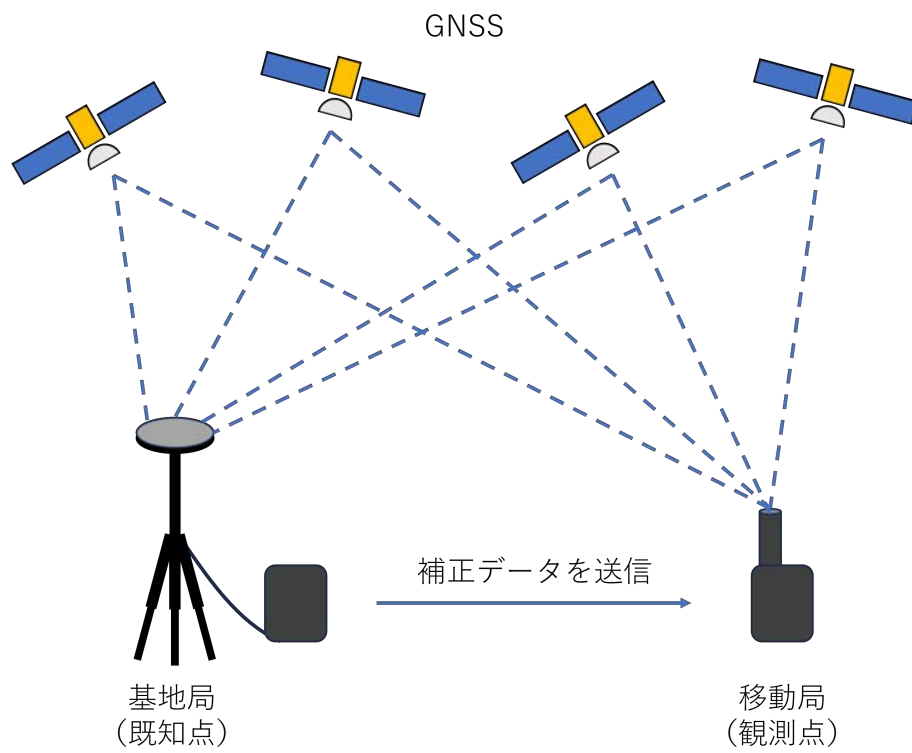


図 2.2: RTK 測位

タル空間を連携させた追跡ゲームとなっている。

また地理空間情報技術はデジタルツインやスマートシティにおいても活用されており、トヨタ自動車株式会社が推進する Woven City では、地理空間情報をもとにスマートシティのデジタルツインを作成し、デジタルツイン上で人と車の動きをシミュレーションすることで、自動運転車の事故予防やモビリティ開発を行っている。

このように地理空間情報技術を活用し、都市全体を利用した空間型 XR が開発されているが、これらの体験では視覚、聴覚といった体験については個人に合わせてデザインされている一方で、触覚提示によるフィジカルな体験のデザインは行われていない。

2.3. 触覚提示技術

2.3.1 ヒトの触知覚機構

河田ら [10] はヒトの感覚を表 2.1 に示すように身体表面や深部にある受容器の興奮により生じる体性感覚、目や耳、鼻などの特化した受容器で受容する特殊感覚、内蔵に由来する内臓感覚に分類した。このうち、体性感覚は皮膚表面で受容される皮膚感覚と、骨格筋や腱や関節で感じる深部感覚に分類され、皮膚感覚には触覚、温度感覚、痛覚がある。皮膚感覚に関する情報を受容する受容器には、触覚情報を受容する機械受容器、温度情報を受容する温度感覚器（温受容器・冷受容器）、痛覚情報を受容する侵害受容器、触覚情報や痛覚情報などを一度に受容するポリモーダル受容器がある。

表 2.1: 感覚の分類 出展：河田ら [10]

体性感覚	皮膚感覚（触覚，痛覚，温覚，冷覚） 深部感覚（筋，腱，骨膜，関節）
特殊間隔	視覚，聴覚，平衡覚，嗅覚，味覚
内臓感覚	空腹覚，満腹覚，口渴覚，悪心，尿意，便意，内臓痛

機械受容器は皮膚の無毛部と有毛部で分布や構造が異なる。このうち、ヒトが触察を行う掌や指腹部は無毛部にあたり、マイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末の4つの機械受容器が存在する [2]。ヒトの無毛部皮膚断面図を図 2.3 に示し、受容器ごとの大きさや特性を表 2.2 に示す。

マイスナー小体は4つの機械受容器のうち最も分布が多く真皮に存在しており、小さな変形を受容している。パチニ小体は真皮の深部に存在し、振動や圧力変化を受容している。メルケル触盤は表皮と真皮の境に存在し、主に皮膚の変形を受容している。ルフィニ終末は真皮に存在し、圧力変化や皮膚の変形を受容している [20]。

応答の順応速度による分類では、刺激に対して持続的に応答する SA (Slow Adapting) 型と、刺激のはじめと終わりに応答する FA (Fast Adapting) 型に分けられる。また、受容野の大きさによる分類では、小さくはっきりとした境界の受容野を持つ I と広く曖昧な境界の受容野を持つ II に分類される。マイスナー小体は FA I、パチニ小体は FA II、メルケル触盤は SA I、ルフィニ終末は SA II にそれぞれ分類される。

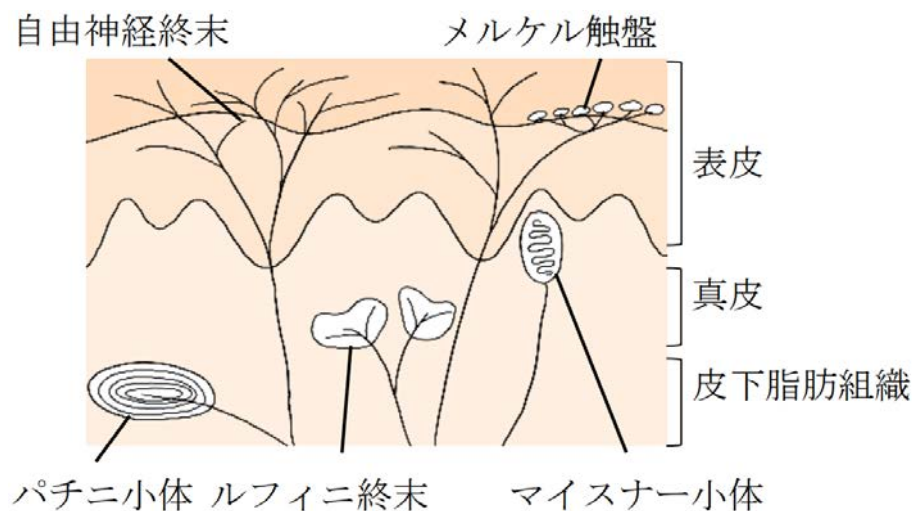


図 2.3: ヒトの無毛部皮膚断面図 (前野ら [2] 参照, 改変)

表 2.2: 機械受容器の特性 (前野ら [2] より抜粋)

receptor	type	receptive field	adaptation	size
Meissner corpuscle	FA I (RA I)	small	fast	L=20-150 μm , D = 40 - 70 μm
Merkel's discs	SA I	small	slow	D=7 μm , T = 1 μm
Pacinian corpuscle	FA II (RA II, PC)	large	very fast	L=0.3-1.5 mm, D=0.2-0.7 mm
Ruffini endings	SA II	large	slow	L = 0.5-2 mm, D=0.2 mm

(L: length, D: diameter, T: thickness)

2.3.2 アクティブタッチ

ヒトが触覚で知覚する際の動作はアクティブタッチとパッシブタッチに分類される。岩村 [21] は、アクティブタッチは触るという動作、つまり随意的に自ら作り出す接触運動によって生じる感覚であり、パッシブタッチは触られる感覚、つまり外界のなにものかによって刺激が与えられて生じる感覚であると述べている。また、Gibson [22] はパッシブタッチで与えられる刺激の不自然さを指摘しており、アクティブタッチでは触れた対象に知覚が向くのに対し、パッシブタッチでは触れた身体に知覚が向くという点で大きく異なる感覚であると述べている。アクティブタッチでは、触覚、痛覚、温覚、冷覚などの皮膚感覚のみでなく、筋、腱、骨膜、関節などの深部感覚も興奮し、豊富な感覚情報が発生する。そのため、自ら対象物を探索し触れるという動作により、触れた感覚のみでなく、触れている対象を知覚する過程で得られる複合的な感覚は体験として得られるようになる。

よって体験において触覚提示は重要な要素であり、アクティブタッチを伴う体験設計が求められる。

アクティブタッチのように、ヒトは外界を知覚するために能動的に手を動かして対象物に触れるが、対象物のどのような情報を得ようとしているのかにより、その探索方法は変化する。Klatzky と Lederman [23] はこの探索方法を図 2.4 のように分類した。またそれぞれの探索方法において得られる対象物の情報を図 2.5 のように分類した。

これらの図では、指先を使った探索方法と掌を使う探索方法があり、掌を使う場合には重さ、凡その形状、温度などに関する情報が主に得られることが示されている。

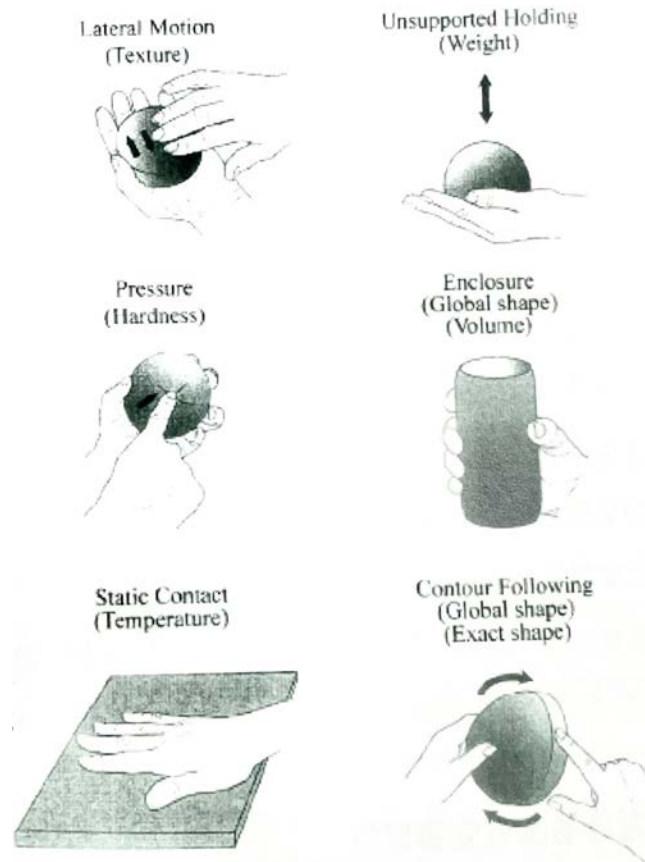


図 2.4: 手を用いた探索方法 出展: Jones and Lederman [3]

EP	Property							Breadth	Duration (s)
	Text	Hard	Temp	Wt	Vol	Global Shape	Exact Shape		
Lateral Motion	■	□	□	□	□	□	□	low	3
Pressure	□	■	□	□	□	□	□	↓	2
Static Contact	□	□	■	□	□	□	□		<1
Unsupp. Holding	□	□	□	■	□	□	□		2
Enclosure	□	□	□	□	■	■	□	2	
Contour Follow	□	□	□	□	□	□	■	high	11

Chance
 Sufficient
 Optimal
 Necessary

図 2.5: 各探索方法によって得られる対象物の情報 出展: Jones and Lederman [3]

2.3.3 遭遇型触覚提示装置

アクティブタッチの重要性から，遭遇型触覚提示装置に関する研究が行われている．Maecadoら [24] は，遭遇型触覚提示装置は，アクチュエータやトラッキングシステムを利用することでデジタル空間内のモノに能動的に触れている感覚を生み出すと述べている．また，HMDなどの視覚デバイスと併用することで，装置のロボットアームなどを隠すことができ，さらにトラッキングシステムと併用することで任意の位置へ触覚提示ディスプレイを移動させることが可能となる．このように，遭遇型触覚提示装置ではアクチュエータ，トラッキングシステム，HMDなどを接続することで，自然かつ自発的に触れている感覚を提示している．

遭遇型触覚提示装置は接地型と非接地型に分けられ，接地型には床や土台に固定されたロボットアームを使用するものがあり，非接地型にはドローンやウェアラブルデバイスを使用するものがある．接地型ではより高品質な触覚提示を可能としている一方で，固定されていることから空間的な制約を受けてしまうため，近年では非接地型の装置が多く研究されている．

Yamaguchiらによって提案されたドローンを用いた遭遇型触覚提示装置 [4] (図 2.6) では，ドローンに吊るされた紙を把持型のデバイスで突くことで，VR空間上のオブジェクトに接触した際の圧力提示を行っている．

また，Horieらによって提案された EncounteredLimbs [5] (図 2.7) では，これまで接地型であったロボットアームを装着可能とすることにより，ロボットアームによる強力かつ安定した力の提示を空間的な制約を受けない状態で利用可能としている．

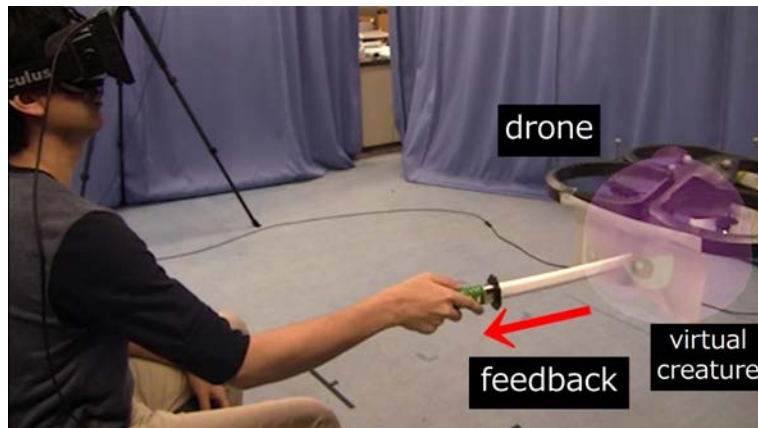


図 2.6: ドローンを使用した遭遇型触覚提示装置 (Yamaguchi ら [4] より抜粋)



図 2.7: EncounteredLimbs (Horie ら [5] より抜粋)

2.3.4 装着型触覚提示デバイス

これまで、様々な触覚提示装置が開発されており、Adilkhanov ら [25] はデバイスの着用可能レベルに基づいて接地型、把持型、装着型に分類している。接地型では、デバイスは装着できない代わりに正確かつ幅広い力の提示が可能となっており、把持型と接触型に分類されている。また把持型では、部分的に装着可能であ

り、使用者の身体に対して直接的または間接的な触覚提示を可能としている。さらに装着型では、外骨格型、グローブ型、指先装着型、腕装着型に分類されている。このうち、装着型のデバイスはより自由に体を動かすことが可能となるため、XRにおける触覚インタラクションを実現するものとして多く使用されている。

装着型のデバイスは、その用途によって形が変化し、VRでは正確なレンダリングが重視されるため、CyberGrasp⁵ (CyberGlove Systems LLC) (図 2.8) のような外骨格型や HaptX Gloves G1⁶ (HaptX) (図 2.9) のようなグローブ型、Gravity grabber [6] (図 2.10) のような指先装着型のデバイスが開発されている。



図 2.8: CyberGrasp⁵



図 2.9: HaptX Gloves G1⁶

5 <https://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp>

6 <https://haptx.com/>

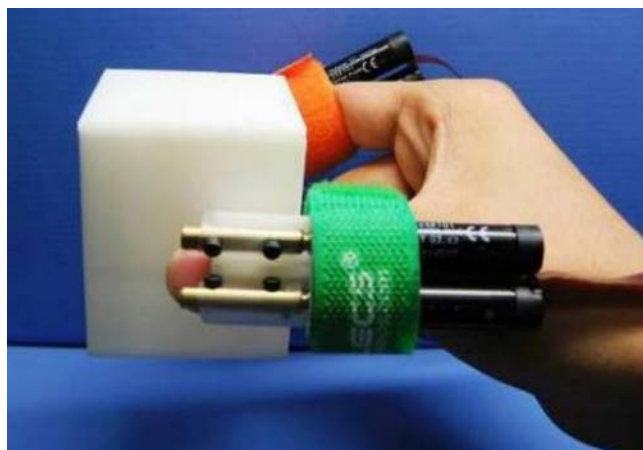


図 2.10: GravityGrabber
(Minamizawa ら [6] より抜粋)

一方MR用途では，現実空間のオブジェクトとのインタラクションが求められることから指先を覆わないデバイスが提案されている．Minamizawa らは2つのモータを用いた掌装着型触覚提示デバイス [7] (図 2.11) を提案しており，掌への触覚提示のみでも VR 空間上のオブジェクトの存在認識が可能であることを示している．

また Kovacs らは触覚インタラクションの際にのみ掌へ回転する PIVOT [8] (図 2.12) を提案しており，掴む，投げるといった触覚インタラクションを可能としている．

さらに Pedro らは掌に物理的なデバイスは装着せず，手の甲や手首への電気刺激のみで掌へ触覚提示を行うデバイス [9] (図 2.13) を提案しており，現実のオブジェクトに触れた状態での触覚提示を実現している．



図 2.11: 掌装着型触覚提示デバイス
(Minamizawa ら [7] より抜粋)



図 2.12: PIVOT
(Kovacs ら [8] より抜粋)



図 2.13: 電気刺激による触覚提示デバイス
(Pedro ら [9] より抜粋)

このような掌への触覚提示について、Bukun ら [26] は指先への触覚提示は小さなオブジェクトに対する繊細な作業の際に触知覚を向上させ、掌への触覚提示はより大きなオブジェクトへの触知覚を向上させる可能性があるとして述べている。

このことから、屋外 MR 空間における大きなオブジェクトとの触覚インタラクションでは、掌への触覚提示を行うウェアラブルなデバイスが求められる。

2.4. 本章のまとめ

本章では本研究への関連研究として、まず現実空間とデジタル空間を接続するものとして空間型 XR 技術について言及し、現実空間を利用する XR 技術について述べた。次に現実空間での位置情報を利用するものとして地理空間情報技術について言及し、これを利用した XR 体験や、センチメートル単位での位置情報取得が可能な RTK-GNSS について紹介した。最後に、主観的体験の一つとして触覚提示技術について言及し、ヒトの触知覚機構の紹介とアクティブタッチの重要性を述べたのちに、これまで開発されてきた装着型触覚提示デバイスについて述べた。

第 3 章

屋外 MR 空間における触覚フィードバックシステムの提案

3.1. 本研究の目標

今日、テクノロジーの発展に伴い生活が最適化されている一方で、最適化されたテクノロジーに依存するのではなく、人と人のインタラクションがより一層重要なものとなると考えられる。特に Woven City をはじめとしたスマートシティにおいては、現在空間型 XR で行われているようなインタラクションがスマートシティ全体で行われるようになり、そのインタラクションによって得られる体験のデザインが重要となる。そこで 2.3.2 項において、フィジカルな体験をデザインするためには触覚提示が重要な要素であると述べたように、スマートシティにおけるインタラクションにハプティクスを用いることで、体験としてのデザインが可能となると考えられる。

そのため本研究では、屋外の空間型 XR における触覚インタラクションの実現を目標とする。

3.2. 共同研究の体制

本研究の目標を実現するため、株式会社豊田中央研究所¹と慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 Embodied Media Project の共同研究を実施した。

1 <https://www.tytlabs.co.jp/>

トヨタ自動車株式会社²では Woven City というスマートシティ構想を推進している。共同研究の目的は、ヒトを中心として物流や交通の動線を確保し、情報化を行うことで日常のさまざまなシーンが最適化される Woven City の構想に対して、都市における人々の実際の「生活」を想定し、サービスをデザインすることである。その中で豊田中央研究所では、スマートシティの住人がスマートシティにおいて収集された膨大な情報の恩恵を直接享受可能なサービスと、その情報に常時触れることが可能な情報インターフェースの研究開発を行っている。この目的が、屋外の空間型 XR における触覚インタラクションの実現という筆者の目的と一致していることから、共同研究を行うこととした。

本プロジェクトには、豊田中央研究所からは前田智祐氏、吉村貴克氏、中西悟氏、堺浩之氏が参加し、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 Embodied Media Project からは堀江新特任助教、南澤孝太教授が参加した。本プロジェクトにおいて、豊田中央研究所は RTK-GNSS で取得した位置情報を MR 空間に送信するシステムの開発を担当し、筆者は屋外 MR 空間における触覚インタラクションシステムの開発を担当した。

3.3. 屋外 MR 空間における触覚インタラクションの検討

本研究では屋外空間での使用を前提とした触覚インタラクションシステムの開発を行うため、屋外空間における触覚インタラクションについて検討する。

屋外 MR 空間において触覚デバイスが常に使用可能な状態となれば、これまで屋内という空間的な制限を受ける場所で行われていた触覚インタラクションが、屋外という空間的な広さの制限を受けない場所で可能となる。屋外 MR 空間での触覚インタラクションについてエンターテインメント面では、MR オブジェクトで競うスポーツ、MR 空間上のペットとのふれあい、モンスターと戦うアクションゲーム、MR 空間の御神輿を使った祭り、MR 空間のアイドルのライブパフォー

² <https://global.toyota/>

マンスなど様々なものが考えられ、今後このようなシステムを用いた、MR 空間を利用した新たな体験が誕生する可能性も考えられる。また現実では危険を伴う射撃や災害現場での訓練においては、射撃時の反動や障害物の重量など必要な触覚インタラクションのみを行うことができるようになり、より現実に近い環境ながら訓練中の事故防止にもつながると考えられる。さらに教育面では、触覚インタラクションを伴う文化遺産見学や都市全体を利用した MR 空間における野外学習が可能となる。特にスマートシティにおいては、都市全体を利用した MR 空間の構築が可能となるため、都市全体を移動し、その場でしか得られないような体験が可能となる。またスマートシティでは住民同士のつながりも重要となるため、住民間でのインタラクションが多くなると考えられる。

以上のインタラクションを考慮すると、本システムに必要な要素は以下のようになる。

- 屋外空間で使用可能
- 歩行・走行中に使用可能
- 複数人で使用可能

3.4. 提案手法

本研究で提案する触覚インタラクションシステムのコンセプトを図 3.1 に示す。これまで屋内空間の触覚インタラクションでは、使用者はほとんど移動せず、数センチメートルの大きさのオブジェクトに対して、指先でつまむ、なでるといった動作を行っていた。一方屋外空間では、使用者は歩きながら、数メートルの大きさのオブジェクトに対して、掌で押す、なでるといった動作が可能となる。このような変化を考慮すると、歩行中に使用可能である必要があることから、無線接続が可能であり、また装着型であるデバイスが望ましいと考えられる。

また、身体の動作を検知する目的も変化し、屋内空間では指先の 0.1 mm 単位の動きを検知するために精度が重要とされるのに対し、屋外空間では 100 m 規模の空間を移動する使用者の位置情報を検知するために範囲が重要とされると考えられる。これに伴い、従来の触覚デバイスのような指先に対する緻密な触覚フィー

ドバックはあまり重要視されず，物体の凡その形状が理解できる程度の触覚フィードバックが適切であると考える．

以上より，本研究で提案する触覚インタラクションシステムの設計要件は以下のようなになる

- 無線接続
- 装着型
- 10mm 単位での位置情報取得
- 100m 規模の空間で通信可能

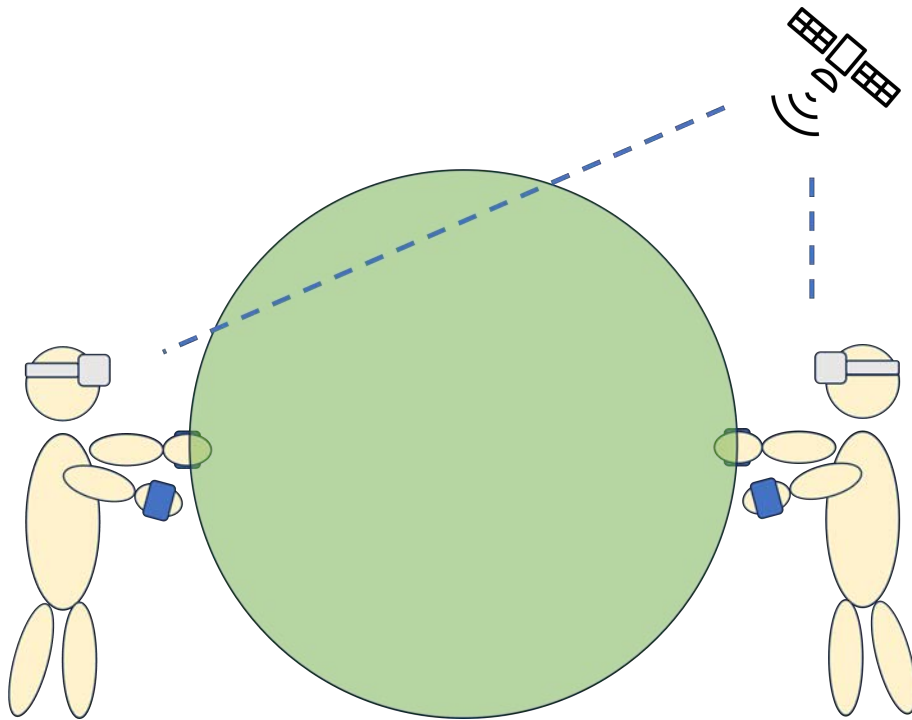


図 3.1: 触覚インタラクションシステムのコンセプト

3.5. システム設計

前節で述べたシステム要件を満たすため、本研究では以下のようなシステムを設計した。まず触覚デバイスはバンドタイプなど装着しやすい形状とし、Bluetooth や WiFi による通信が可能なマイクロコントローラによる制御を行うことで無線接続を行うこととした。

また、10 mm 単位での位置情報取得と 100 m 規模の空間での通信を両立させるため、RTK-GNSS を用いた位置情報取得を行う。2.2 節で述べたように RTK-GNSS はセンチメートル単位での位置情報取得を可能としているため、HMD や触覚デバイスに搭載することで、使用者の位置を正確に捕捉することが可能となる。

以上のシステム全体の処理フローを図 3.2 に示す。



図 3.2: 触覚インタラクションシステムの処理フロー

3.6. 触覚デバイスのプロトタイプ

触覚デバイスの設計要件は、3.4 節で述べたように無線接続と装着型である。また、現実空間との境界をなくすためには現実空間での触覚インタラクションを妨げない必要があるため、指先への装着を行わない形を目指した。

3.6.1 手首装着型触覚デバイス

一つ目のプロトタイプでは、手を完全に自由にするため手首装着型の触覚デバイスとした。製作した手首装着型触覚デバイスを図 3.3 に示す。

デバイスは図 3.4 に示すように、フレキシブル素材のヘッドが装着された 4 つのモータ、モータを固定するバンド、モータドライバ、マイクロコントローラ、バッテリー、巻取機構、筐体によって構成される。デバイスの大きさは $52 \times 40 \times 23$ mm、重量は 84 g であり、Bluetooth または WiFi 通信によって制御される。モータは 136:1 超小型プラスチックプラネタリギアドモーター (6D \times 19L mm) (Pololu) を使用し、モータに 3D プリンタで造形されたフレキシブル素材のヘッドを装着することで、モータの回転時に手首の皮膚との間に摩擦力を発生させる。これにより皮膚の伸縮を発生させ、手首に対する上下左右方向への牽引力と回転・振動パターンの提示を行った (図 3.5, 3.6, 3.7, 3.8)。

モータドライバはデュアルモータードライバ DRV8835 (Pololu) を使用し、マイクロコントローラは TinyPICO (Unexpected Maker) を使用し、電圧制御によるモータの回転速度と回転方向の制御を行った。バッテリーはリチウムイオンポリマー電池 (3.7 V, 860 mAh, Data Power) を使用した。バンドの形状と巻き取り機構は Syntacts Bracelet [27] を参考に製作し、つまみを回転させることにより締め付け力の調節を可能とした。これにより、装着者ごとの装着性の差異の低減を図った。

本デバイスを用いて牽引方向の識別を目的とした簡易的なユーザーテストを行った結果、牽引方向の識別率が低い一方で、手首への摩擦による不快感が大きいという課題が上がった。



図 3.3: 手首装着触覚デバイスの外観

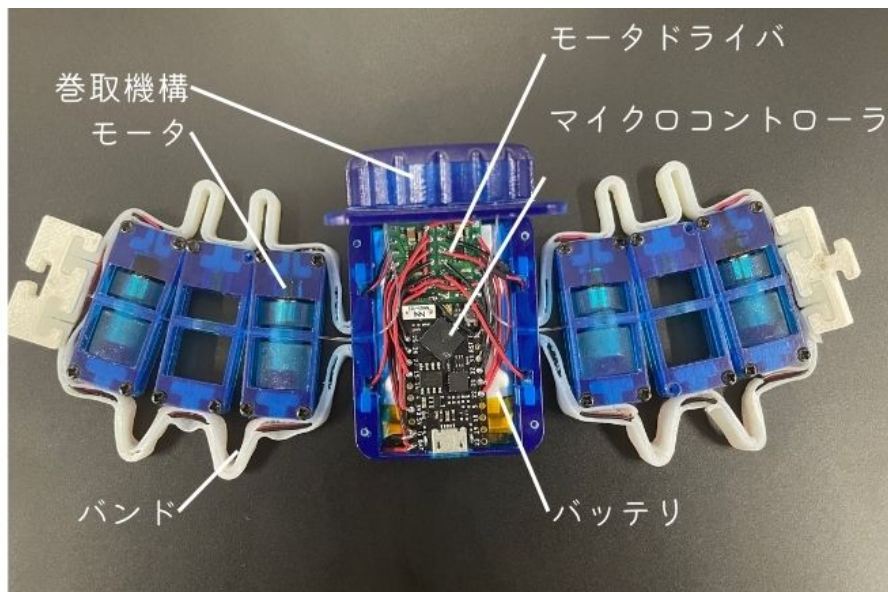


図 3.4: 手首装着型触覚デバイスの構成



図 3.5: 上への牽引

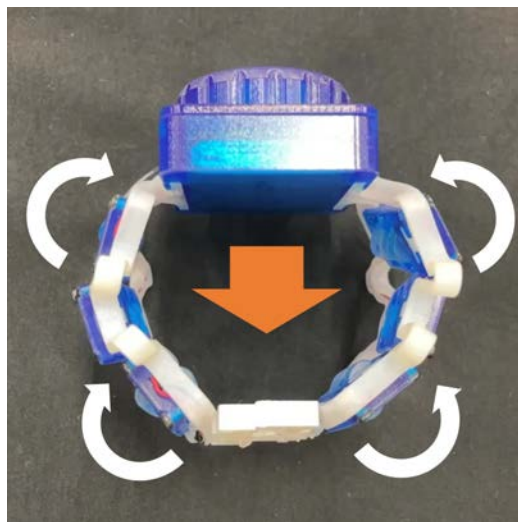


図 3.6: 下への牽引

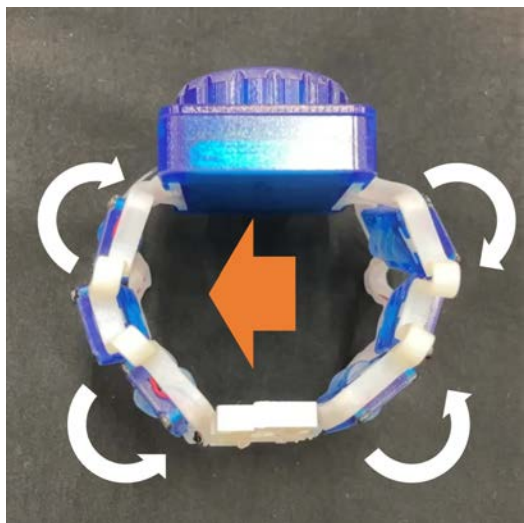


図 3.7: 左への牽引

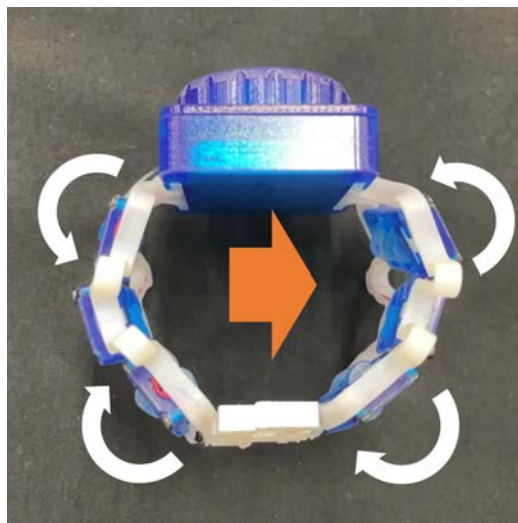


図 3.8: 右への牽引

3.6.2 掌装着型触覚デバイス

3.6.1 項で課題であった提示感覚の曖昧さを改善するため、より直接的な触覚提示を目的として、掌装着型の触覚デバイスを作成した。製作した掌装着型触覚デバイスを図 3.9 に示す。

デバイスは、図 3.10 に示すように、4つのモータがついたバンド、モータドライバ、マイクロコントローラ、バッテリー、巻き取り機構、掌接触部、筐体によって構成される。デバイスの大きさは $34 \times 60 \times 23$ mm、重量は 89 g である。掌装着型触覚デバイスにおいても、手首装着型デバイスと同様のモータ、モータドライバ、マイクロコントローラ、バッテリーを採用した。掌装着型触覚デバイスでは、モータに 3D プリンタで造形されたプーリを装着し、モータを回転させることでバンドを巻き取り掌接触部を手のひらへ押し当てることで、掌への触覚提示を行う（図 3.11）。触覚提示の種類として、モータのトルクの変化による 52 段階の圧力提示と、モータの動作間隔の変化による 10 段階のパルス（振動）提示を実装した。

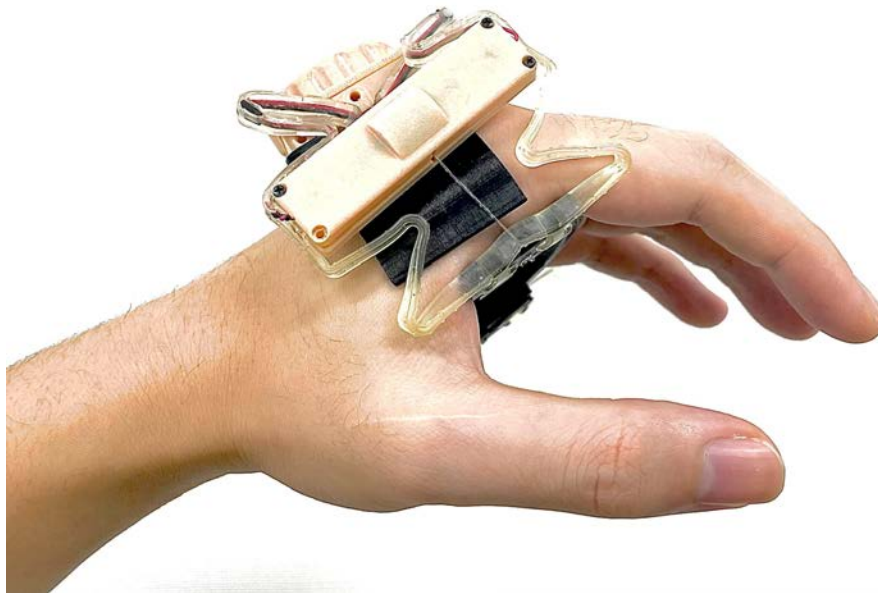


図 3.9: 掌装着型触覚デバイスの外観

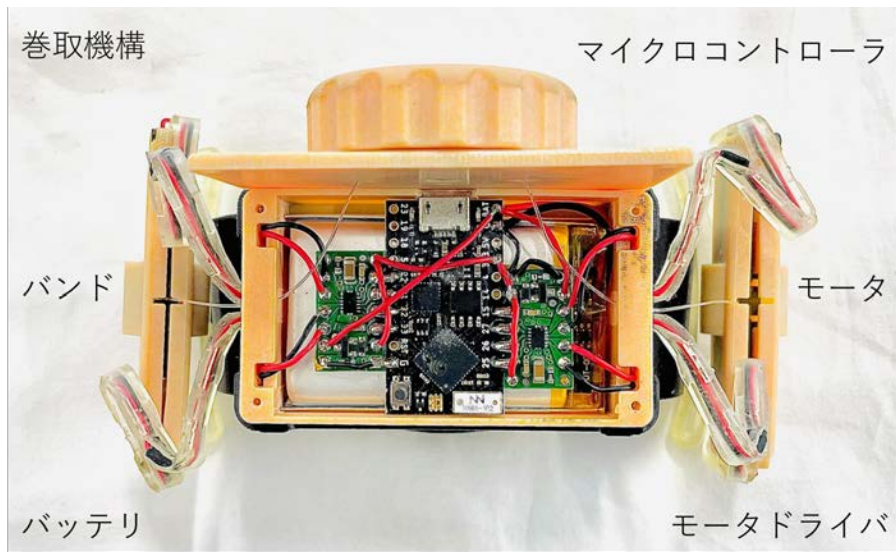


図 3.10: 掌装着型触覚デバイスの構成



図 3.11: 掌装着型触覚デバイスの動作例

また、デバイスの位置情報を直接取得するため、上記のデバイスに RTK-GNSS モジュールを搭載したプロトタイプも作成した。製作したデバイスを図 3.12 に示す。このデバイスの大きさは $78 \times 52 \times 32$ mm、重量は 159 g であり、RTK-GNSS によってデバイスの位置情報取得を行う。このデバイスでは位置情報の取得と触覚提示を一つのデバイスに統合した一方で、デバイス重量が 159 g と重く、また

3. 屋外 MR 空間における触覚フィードバックの提案

GNSS の精度により手の位置が 20 mm 以上ずれてしまうことから、インタラクションに違和感ができてしまった。

このことから最終的には、RTK-GNSS モジュールを搭載していない掌装着型触覚デバイスを使用した。



図 3.12: RTK-GNSS モジュールを搭載した掌装着型触覚デバイス

3.7. 触覚インタラクションが可能な MR 空間の構築

前項で作成した掌装着型触覚デバイスを用いた触覚インタラクションを行うため、ゲームエンジン (Unity³) を使用して触覚インタラクションが可能な MR 空間を構築した。

MR 空間上には、使用者が手で触れると強い圧力提示を受ける壁 (図 3.13), 触れると弾け, 軽い圧力提示と減衰する振動を受けるクリスタル (図 3.14), 押し込

3 <https://unity.com/ja>

3. 屋外 MR 空間における触覚フィードバックの提案

触覚フィードバックが可能な MR 空間の構築
み量に応じて変化する圧力提示を受ける球体 (図 3.15), 触れると軽い圧力提示を受ける風船 (図 3.16) などを配置した.

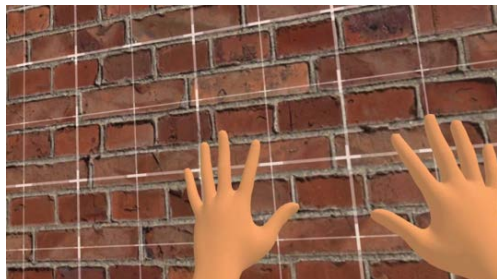


図 3.13: 壁

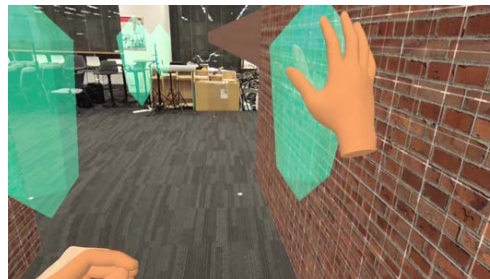


図 3.14: クリスタル



図 3.15: 弾性のある球体

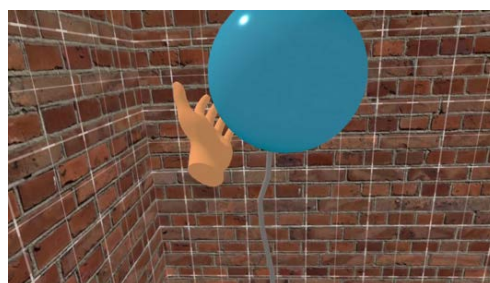


図 3.16: 風船

また, 複数人で触覚インタラクション可能な MR オブジェクトとして, 触れると強い圧力提示を受ける押し合いが可能な立方体と球体, 相手側の押し込み量によりこちら側の圧力提示が強くなる球体を作成した. これらの MR オブジェクトの中でも特に MR 空間上で球体を転がしあうインタラクション (図 3.17) では, 転がる球体を追いかけるために現実空間のドアを開けて部屋を移動するなど現実空間とのシームレスなインタラクションが行われ, また体験者の動きが大きくなるため, 特に屋外でのインタラクションに適していると考えた.



図 3.17: 屋内 MR 空間での複数人インタラクション

3.8. 屋内 MR 空間におけるテスト

ここまでに作成したデバイスとインタラクションの屋内での動作テストとして SIGGRAPG Asia 2023 Emerging Technologies においてデモンストレーションを行った。デモンストレーションの様子を図 3.18 に示す。

デモンストレーションの内容は、Maeda ら [28] の前後左右に引っ張られる感覚が得られる触覚ナビゲーションデバイスのデモに、今回作成したデバイスとインタラクションを実装したものとなっており、ナビゲーションに沿って MR 空間の迷路を探索するものである。体験者は右手に触覚ナビゲーションデバイスを持ち、左手に掌装着型触覚デバイスを装着することで、両手で壁やクリスタルに対する触覚インタラクションが可能となっている。本デモンストレーションは、歩行中の触覚ナビゲーションが有効であることを示すことを目的としていたため、体験者が可能な限り長距離歩行する体験設計が求められていた。一方で、使用可能なエリアが $4\text{ m} \times 3\text{ m}$ と限られていたため、Suma ら [29] の考案したリダイレクションを実装した。リダイレクションは体験者の視野外で MR 空間上のマップを更新することにより、体験者に現実空間上の移動距離と MR 空間上の移動距離を錯覚させる技術である。また現実空間では体験者は移動せずに、ナビゲーション

3. 屋外 MR 空間における触覚フィードバックシステムの提案

デバイスによる牽引感覚を与えながら MR 空間上の体験者の位置のみを移動させることにより、体が落下，上昇する感覚を提示するなどして空間を広く感じられるように設計した。

これにより、体験者からは実際のブースの狭さを感じずに、10 m 規模のより広い空間を歩行しながら触覚コンテンツを楽しむことができたなどの感想が得られた。また、掌装着型触覚デバイスの動作は圧力と振動の提示という比較的簡単なものであるが、MR 空間上の視覚コンテンツと組み合わせることで、より多様な体験を提供可能であるという知見が得られた。



図 3.18: デモンストレーションの様子

3.9. GNSS による位置情報取得システム

RTK-GNSS による位置情報を取得し、屋外 MR 空間における触覚インタラクションを実現するため、図 3.19 に示すような触覚インタラクションシステムを構築した。

3. 屋外 MR 空間における触覚フィードバックシステムの提案 GNSS による位置情報取得システム

使用者の位置情報を取得するための RTK-GNSS システムは、HMD に取り付けられる移動局と、固定設置される基地局を併用するものであり、20 mm 程度の精度の位置情報を約 10 Hz で取得可能である。また、スマートフォンの専用アプリ (Drogger GPS⁴) を用いて、スマートフォンの位置情報を移動局と基地局の位置情報にそれぞれ上書きし、制御用 PC 上に構築した HTTP サーバー (Google Chrome) を介して移動局と基地局の位置情報を HMD に送信した。この際 HTTP サーバー上で、現実空間上の位置情報 (緯度, 経度, 標高) を MR 空間上の位置情報 (x, y, z 座標) に変換している。

HMD には、受信した位置情報をもとに MR 空間上に使用者の位置を反映し、使用者の手が MR 空間上のオブジェクトに触れた際に触覚デバイスへ制御信号を送信するという処理を行なうアプリケーションをビルドしている。これにより HMD は位置情報の取得から触覚デバイスへの制御信号送信までの処理を、有線接続することなく行っている。

以上の通信はすべて WiFi ルーターを通した UDP 通信を利用しており、WiFi の通信範囲内であればシステムを使用可能であり、中継器を利用することで通信範囲を拡大することが可能である。

このシステムにより、屋外空間においてもワイヤレスなデバイスでありながら、広範囲の位置情報の取得が可能となる。

4 <https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.bizstation.drgps>

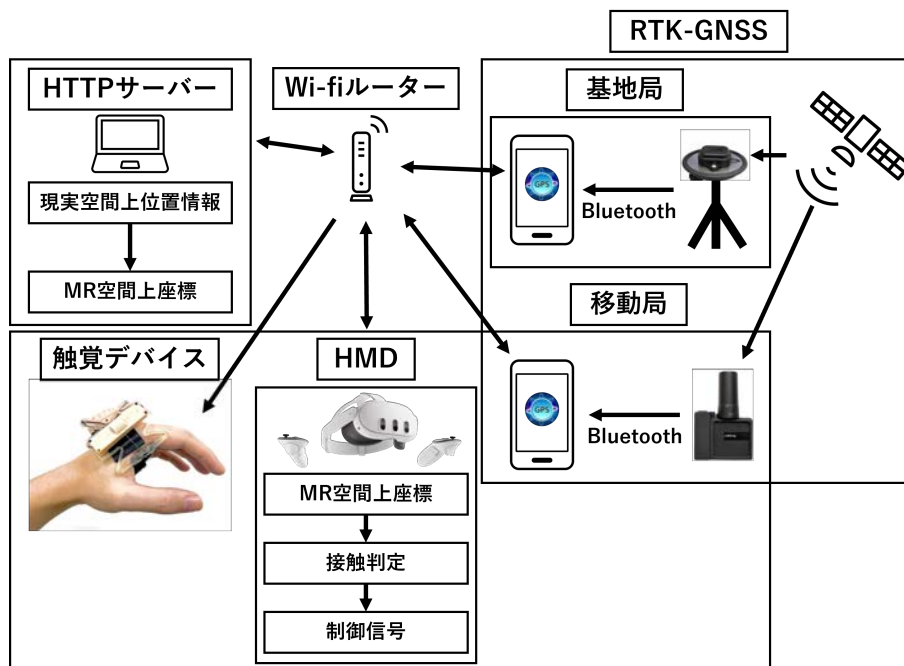


図 3.19: 触覚インタラクションシステム

3.10. 本章のまとめ

本章では本研究のコンセプト提案として、まず第2章の内容を踏まえた本研究の目標設定を行い、共同研究の目的と体制について述べた。次に屋外 MR 空間におけるインタラクションを考慮し、屋外 MR 空間における触覚インタラクションシステムの要件定義とコンセプト提案を行った。最後に屋外 MR 空間での使用を前提とした、触覚デバイスを含む触覚インタラクションシステムの設計を行った。

第 4 章

デバイスとシステムの実装と評価

4.1. 屋外 MR 空間におけるインタラクション

屋外 MR 空間上で触覚インタラクションを行うため、GPS による位置情報を基に Unity を用いて図 4.1 に示すような簡単なデジタルツインの空間を作成した。



図 4.1: 屋外 MR 空間

この空間には以下のような触覚インタラクションが可能な MR オブジェクトが配置されている。

- 座標が固定された 1 辺 1 m の立方体。オブジェクト表面に触れた際にデバイスによる圧力提示を受ける。

- 座標が固定された直径 1 m の球体. オブジェクト表面に触れた際にデバイスによる圧力提示を受ける.
- 座標が固定された高さ 0.5 m の壁. オブジェクト表面に触れた際にデバイスによる圧力提示を受ける.
- 弾性のある直径 1 m の球体. オブジェクトへの押し込み量に応じた圧力提示を受ける.
- 触れると弾けるクリスタル. オブジェクトに触れた際に振動とともに圧力提示を受ける.

立方体, 球体, 壁では, オブジェクト表面に触れた際に最大出力の圧力提示を行う. 弾性のある球体では, オブジェクト表面に触れた際に最大出力の半分の出力で圧力提示を行い, オブジェクトの中心に近づくほど出力を増加させ, 中心からの距離が 0.25 m となる位置で最大出力となる圧力提示を行う. 弾けるクリスタルでは, オブジェクトに触れた際に最大出力の半分の出力で圧力提示を行い, その後 3 s にわたって減衰する振動提示を行う.

またこれらの MR オブジェクトに加え, 図 4.2 に示すような複数人で触覚インタラクションが可能なオブジェクトも作成し, 実際に屋外 MR 空間において 2 人の体験者が同一のオブジェクトに対して触覚インタラクションが可能な体験を作成した.



図 4.2: 屋外 MR 空間における複数人インタラクションの様子

4.2. 技術的評価

4.2.1 掌装着型触覚デバイスの技術的評価

作成した触覚デバイスの技術的評価を行うため、掌に与える最大圧力と応答性の測定を行った。

測定では、まず図 4.5 に示すように手とデバイスの中に Arduino UNO R3 Board (ELEGOO) に接続された圧力センサー FSR402 (Interlink) を挟む。Arduino では圧力センサーからの出力電圧から圧力を計算し、接続された PC のシリアルモニタ上にタイムスタンプとともに圧力を表示する。これによりデバイスを最大出力で動作させた際の最大圧力と、デバイスの動作開始から最大圧力になるまでの時間を測定した。測定の様子を図 4.4 に示す。

また測定した圧力の時間変化を図 4.3 に示す。この結果より、デバイス動作開始時点から最大圧力となるまでの時間は 169 ms であり、その際の最大圧力は 14.1 N であることが確認された。

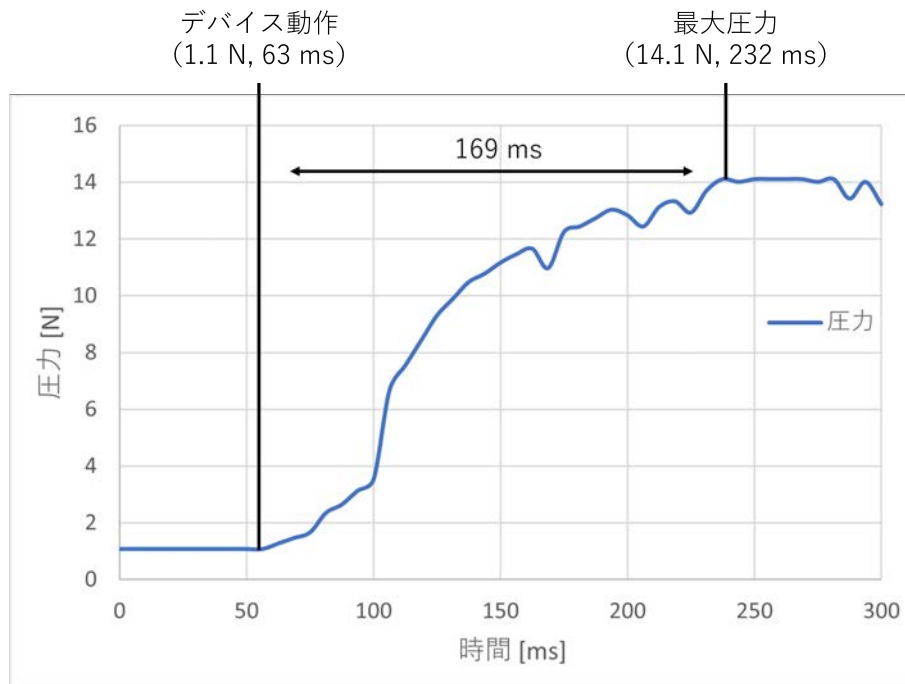


図 4.3: デバイス動作時の圧力変化

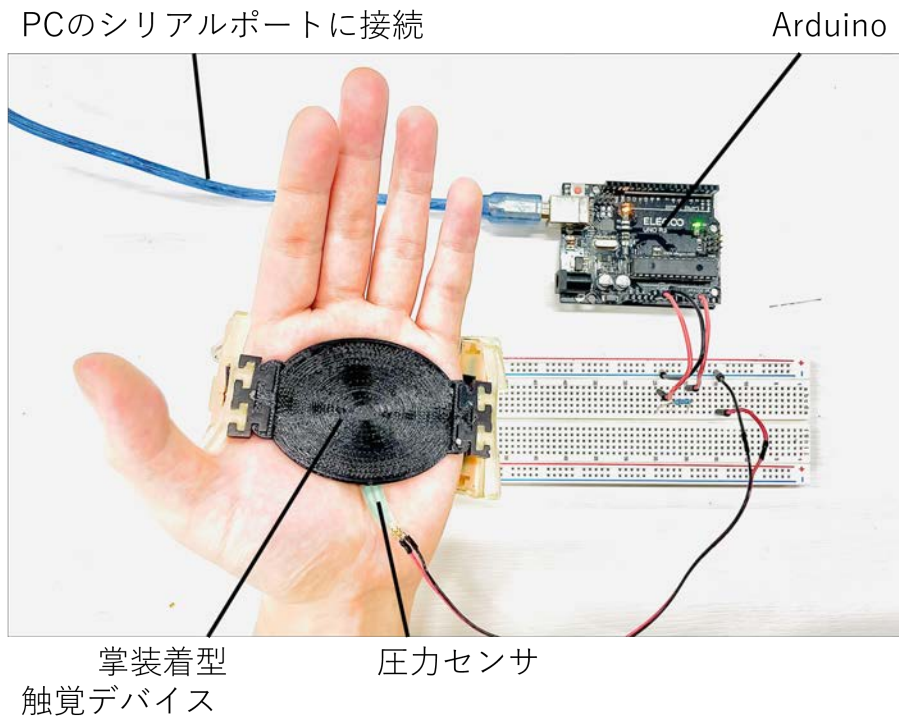


図 4.4: 掌装着型触覚デバイスの測定の様子

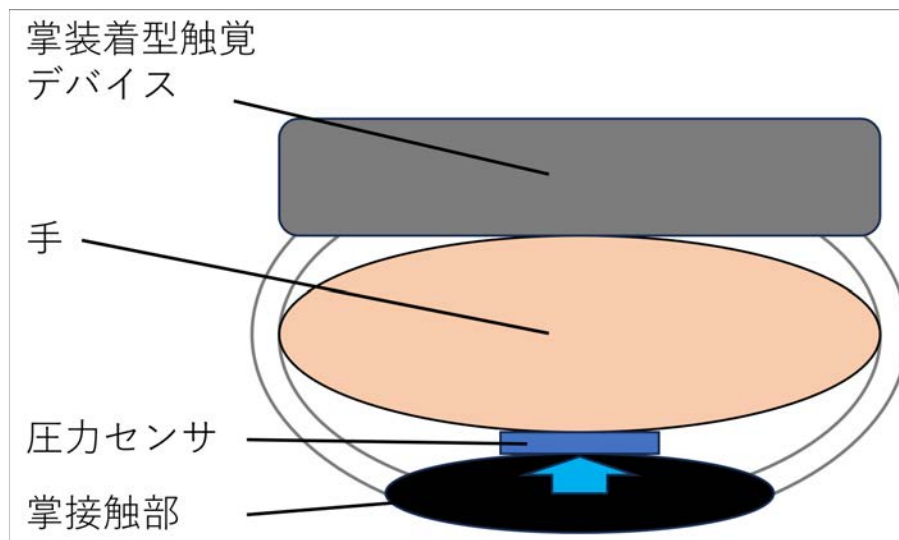


図 4.5: 掌装着型触覚デバイスの技術的評価

4.2.2 触覚インタラクションシステムの技術的評価

触覚インタラクションシステムの技術評価を行うため、位置情報精度と応答性を測定した。

まず位置情報精度の測定では、快晴かつ周囲に遮蔽物が少ない環境（図 4.6）において Grogger GPS アプリ上に表示される水平精度を記録した。その結果、静止時の精度は 14 mm で安定することが確認された。ただし、屋内では位置情報の取得ができず、また悪天候時には精度は安定せず 3 m 以上まで低下した。

またシステムの応答性の測定では、掌装着型触覚デバイスの技術的評価と同様に圧力センサを使用し、圧力センサの出力値が変化した時間をデバイスの動作開始時間として、Unity 上で接触判定が発生した時間の差を記録した。その結果、システム上の接触判定発生からデバイスが動作するまでの時間は平均で 124 ms であることが確認された。この値については、通信環境や使用する WiFi の回線速度に影響を受けるため、最小で 87 ms、最大で 182 ms と、100 ms ほどの大きな振幅が見られた。



図 4.6: 位置情報精度測定場所

4.3. 屋外 MR 空間における触覚インタラクションの検証

屋外 MR 空間における圧力提示による触覚インタラクションの検証として、提案した触覚インタラクションシステムを用いて屋外 MR 空間上オブジェクトに触れる検証を行った。

目的

この検証では、本システムを用いた屋外 MR 空間上のオブジェクトとの触覚インタラクションの評価を目的として、屋外 MR 空間上のオブジェクトに触れた際の触覚提示の有無による、MR 空間上のオブジェクトに対する被験者の手の沈み込み量の比較を行った。本検証では、触覚提示がある場合に被験者はオブジェクトの接触面に対する空間位置の知覚精度が向上し、手の沈み込み量が減少するという仮説を立てた。

実験参加者は 20 代の男性 1 人であり、実験は竹芝客船ターミナル 2 階デッキにおいて晴れの日の午後に実施した。

図 4.7 に実験のセットアップを示す。MR 空間上には、一辺 1 m の座標が固定された立方体と、直径 1 m の座標が固定された球体の一つずつ配置されている。実験の様子を図 4.8 に示す。



図 4.7: 実験のセットアップ

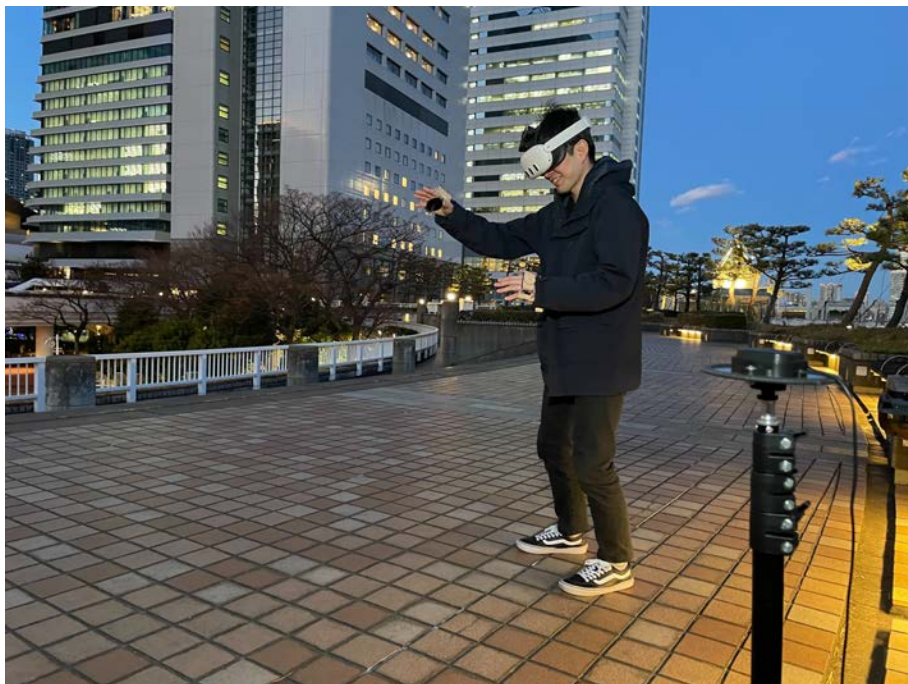


図 4.8: 実験の様子

検証手順

実験において被験者は以下の手順に従った

1. 実験に関する説明を受けたのち、HMD と触覚デバイスを装着した
2. 実験開始位置から 3 m 離れた位置にある、MR 空間上の立方体に両手で触れ、オブジェクトの存在を感じた時点で手をもとの位置に戻す動作を 5 回繰り返す、開始位置に戻った。この間、触覚デバイスは動作させなかった。
3. MR 空間上の立方体に近づき、触れる動作を 5 回繰り返したのちに開始位置に戻った。この間、触覚デバイスは動作させた。
4. MR 空間上の球体に近づき、触れる動作を 5 回繰り返したのちに開始位置に戻った。この間、触覚デバイスは動作させなかった。
5. MR 空間上の球体に近づき、触れる動作を 5 回繰り返したのちに開始位置に戻った。この間、触覚デバイスは動作させた。
6. 2-5 の手順を 3 回繰り返した
7. 体験に関するインタビューに回答した

この手順において、被験者の現実空間の手が MR 空間上のオブジェクトに触れた際に沈み込む量を記録した。

結果

図 4.9 に、MR オブジェクトへの手の沈み込み量の平均と標準偏差を示す。

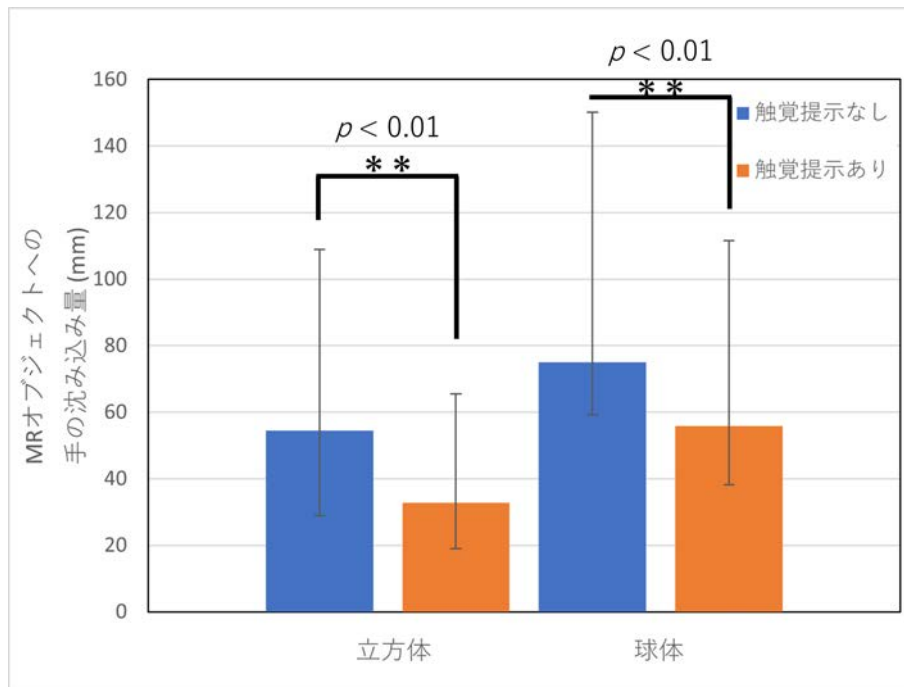


図 4.9: 屋外 MR オブジェクトへの手の沈み込み量の平均と標準偏差

この結果に対し t 検定を行ったところ、触覚デバイスを動作させることで手の沈み込み量は優位に減少していることが確認された。(立方体: $t(29) = 5.11$, $p < 0.01$, 球体: $t(29) = 4.96$, $p < 0.01$)

また弾性のある球体とクリスタルについては上記の実験とは別に触れる動作を行い、以下の項目について被験者に対しインタビューを実施した。

- 対象物に触れたと感じたタイミングと触覚インタラクションは同期していたか
- 触覚インタラクションにより対象物の存在を感じることができたか
- 触覚インタラクションに現実感を感じたか

4.4. 考察

屋内 MR 空間におけるテストでは、視覚コンテンツと触覚コンテンツを組み合わせて、圧力提示という比較的簡単な触覚提示でも多様な体験を実現可能であることを確認した。

技術的評価の項目について、システムの応答性は Unity 上の接触判定からデバイスが動作するまでの時間は 124 ms であった。ヒトは視覚的にものに触れたと認識した時間と、触覚的な知覚を受けるまでに 200 ms 以上の遅延があると遅延が大きいと認知してしまう [30] が、本システムでは 124 ms であったため、大きな遅延は知覚されないと考えられる。一方で、デバイスが最大圧力をとるまでの遅延は 169 ms であり、これを含めるとシステム全体の応答性は、システム上の接触判定からデバイスが最大圧力となるまで 293 ms と 200 ms を越えてしまうため、壁に触れるなどの強い圧力提示を与える触覚インタラクションを行う場合には遅延を認知してしまうと考えられる、これについては、MR オブジェクトの接触判定を実際より大きく設定することで解消可能であると考えられるが、どの程度変化させるかについては詳細な検討が必要となる。

また屋外 MR 空間における検証では、触覚提示がある場合に優位に手の沈み込み量が減少していることが示された。このことから、本システムにより屋外 MR 空間上のオブジェクトに対する接触面の空間位置の知覚精度の向上が見られたといえる。

実験において被験者は、立方体より球体のほうが現実感を感じたと述べていた。これは、掌接触部が楕円形であるため、より形状に近い球体の評価が高くなったと考えられる。また、平面に触れる場合と球体に触れる場合では、平面に触れる場合は指先から対象に接触するのに対し、球体に触れる場合は掌から対象に接触しより掌へ圧力がかかる触れ方となるため、本研究で採用したような指先に触覚提示がない触覚デバイスでは、球体のオブジェクトへ対する触覚インタラクションの現実感が大きいと考えられる。

一方で現状のデバイスの制限としては、位置情報精度が天候や障害物に影響を受けることがあげられる。また、本研究で作成した掌装着型触覚デバイスにおいて使用したマイクロコンピュータは、2.4 GHz 帯の通信のみに対応しているため、

本システムでは同じ 2.4 GHz を称する Bluetooth や WiFi 通信が多い状況では混線する可能性がある。

第 5 章

結 論

本論文では、現実空間とデジタル空間の境界をなくすことを目的として、屋外 MR 空間において使用可能な触覚インタラクションシステムの提案を行い、屋外 MR 空間上のオブジェクトの空間位置知覚の評価によりシステムの検証を行った。

第 1 章では、本研究の背景として現実空間とデジタル空間の間に存在する境界について示し、これらを接続するものとしてデジタルツインと空間型 XR を挙げ、都市型 XR における個人の体験の重要性を示すことで目的について述べた。

第 2 章では、まず空間型 XR を実現するデバイスとして HMD とスマートフォンを取り上げ、自己位置推定方法と周辺環境のマッピング方法について紹介し、これを用いた体験やサービスについて述べた。次に地理空間情報技術の中でもセンチメートル単位の精度での位置情報取得を実現する RTK 測位に着目し、地理空間情報技術を活用する空間型 XR 体験として AR アプリケーションやスマートシティについて述べた。最後に体験におけるアクティブタッチの重要性について述べ、これまで研究されてきた装着型触覚提示装置について述べた。

第 3 章では、これまで屋内での使用を前提として開発されてきた触覚デバイスに対し、屋外での使用を前提として開発を行うために、屋外 MR 空間における触覚インタラクションの変化を考慮した触覚インタラクションシステムのコンセプトについて述べた。また、作成した触覚デバイスのプロトタイプとこれを用いた触覚インタラクションが可能な MR 空間について述べ、屋内 MR 空間において行ったデモンストレーションについて述べた。このデモンストレーションでは、掌への比較的単純な触覚提示のみでも、MR 空間上での視覚インタラクションと組み合わせることで、多様な体験を創ることができるという知見を得た。

最後に、屋外 MR 空間における触覚インタラクションを実現するシステムにつ

いて述べた。

第4章では、まず作成した屋外MR空間とそこでの触覚インタラクションについて述べ、屋外MR空間における複数人触覚インタラクションが可能であることを確認した。次に、作成した掌装着型触覚デバイスと触覚インタラクションシステムの技術的評価として、最大圧力、精度、応答性を測定した。最後に、屋外MR空間における触覚インタラクションの検証として、MRオブジェクトに触れた際の手の沈み込み量の測定を行った。その結果、触覚インタラクションがある場合に手の沈み込み量は有意に減少していることが確認でき、触覚インタラクションによってMRオブジェクトの空間位置知覚精度の向上が見られた。これにより、本システムによって屋外空間における触覚インタラクションが可能であることが示された。

今後の展望として、現実とデジタルが常に接続されているスマートシティにおけるシステムの運用を想定すると、RTK-GNSSのみでなくスマートシティに存在する多数のセンサ情報と連動させることで、周辺環境に影響されない位置情報取得が可能になると考えられる。また本システムを基に、屋外MR空間上の触覚インタラクションが日常的となった世界では、冒頭に述べたソードアート・オンラインのような現実空間とデジタル空間の境界を感じないような生活の実現が期待できる。

謝 辞

本研究の指導教員である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は、研究における多大なご指導を賜りました。ご多忙の中においても多くの時間を割いていただき、幅広い知見からの的確な指導と研究方針に関する多くの核心的なご指摘をしていただきました。心より厚く御礼申し上げます。

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。

論文執筆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陳敦雅准教授に心から感謝いたします。

研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の堀江新特任助教に心から感謝いたします。

共同研究者である株式会社豊田中央研究所の堺浩之さんと吉村貴克さんには、議論やアドバイス、実験実施における助言を数多くいただきました。同じく共同研究者であり、Embodied Media Project 博士2年でもある前田智祐さんには、研究方針や資料作成、研究機材の使用方法など多岐に渡り、非常に丁寧かつ細かに指導していただきました。深く感謝いたします。

Embodied Media Project の皆様にも感謝申し上げます。

特に修士2年の同輩の皆様とは毎日のように夜遅くまで共に研究に没頭し、切磋琢磨しながら大変充実した研究室生活を送ることができました。心より感謝いたします。

最後に、いつも支えてくださり、研究に集中できる環境を整えてくれた家族に感謝の意を表し、謝辞に代えさせていただきます。

参 考 文 献

- [1] Xudong Jiang, Lifeng Zhu, Jia Liu, and Aiguo Song. A slam-based 6dof controller with smooth auto-calibration for virtual reality. *The Visual Computer*, Vol. 39, No. 9, pp. 3873–3886, Sep 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s00371-022-02530-1>, doi:10.1007/s00371-022-02530-1.
- [2] 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.
- [3] Lynette A. Jones and Susan J. Lederman. *Human Hand Function*. Oxford University Press, 05 2006. URL: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195173154.001.0001>, doi:10.1093/acprof:oso/9780195173154.001.0001.
- [4] Kotaro Yamaguchi, Ginga Kato, Yoshihiro Kuroda, Kiyoshi Kiyokawa, and Haruo Takemura. A non-grounded and encountered-type haptic display using a drone. In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction, SUI '16*, p. 43–46, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/2983310.2985746>, doi:10.1145/2983310.2985746.
- [5] Arata Horie, MHD Yamen Saraiji, Zendai Kashino, and Masahiko Inami. Encounteredlimbs: A room-scale encountered-type haptic presentation using wearable robotic arms. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 260–269, 2021. doi:10.1109/VR50410.2021.00048.
- [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] Kouta Minamizawa, Sho Kamuro, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. A palm-worn haptic display for bimanual operations in virtual environments. In Manuel Ferre, editor, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, pp. 458–463, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- [8] Robert Kovacs, Eyal Ofek, Mar Gonzalez Franco, Alexa Fay Siu, Sebastian Marwecki, Christian Holz, and Mike Sinclair. Haptic pivot: On-demand handhelds in vr. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, p. 1046–1059, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3379337.3415854>, doi:10.1145/3379337.3415854.
- [9] Yudai Tanaka, Alan Shen, Andy Kong, and Pedro Lopes. Full-hand electro-tactile feedback without obstructing palmar side of hand. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3544548.3581382>, doi:10.1145/3544548.3581382.
- [10] 河田光博, 稲瀬正彦. カラー図解 人体の正常構造と機能 第8巻 神経系 (1). 日本医事新報社, 2012.
- [11] S. Balakrishnan, M.Syed Shahul Hameed, K Venkatesan, and G Aswin. Interaction of spatial computing in augmented reality. In *2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*

- (*ICACCS*), Vol. 1, pp. 1900–1904, 2021. doi:10.1109/ICACCS51430.2021.9442010.
- [12] Carlos E. Mendoza-Ramírez, Juan C. Tudon-Martinez, Luis C. Félix-Herrán, Jorge de J. Lozoya-Santos, and Adriana Vargas-Martínez. Augmented reality: Survey. *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 18, 2023. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/18/10491>, doi:10.3390/app131810491.
- [13] Blume P Julier S Rovira A, Fatah gen Schieck A. Guidance and surroundings awareness in outdoor handheld augmented reality. *PLoS ONE*, Vol. 15, No. 3, 2020.
- [14] Hitoshi Araki, Hiroshi Fukuda, Takuma Motoki, Tsuyoshi Takeuchi, Naoki Ohta, Ryosuke Adachi, Hiroshi Masuda, Yasuyuki Kado, Yoshiki Mita, Daisuke Mizukami, and Nayu Kakeya. “hado” as techno sports was born by the fusion of it technology and sports. In Akihiko Shirai, Laurent Chretien, Anne-Sophie Clayer, Simon Richir, and Shoichi Hasegawa, editors, *ReVo 2017: Laval Virtual ReVolution 2017 “Transhumanism++”*, Vol. 1 of *EPiC Series in Engineering*, pp. 36–40. EasyChair, 2018. URL: <https://easychair.org/publications/paper/1Fbg>, doi:10.29007/8stx.
- [15] Michael Bonfert, Inga Lehne, Ralf Morawe, Melina Cahnbley, Gabriel Zachmann, and Johannes Schöning. Augmented invaders: A mixed reality multiplayer outdoor game. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST ’17*, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3139131.3141208>, doi:10.1145/3139131.3141208.
- [16] Francesco De Pace and Hannes Kaufmann. A systematic evaluation of an rtk-gps device for wearable augmented reality. *Virtual Reality*, 10 2023. doi:10.1007/s10055-023-00863-3.

- [17] Yang Zheng, Tolga Birdal, Fei Xia, Yanchao Yang, Yueqi Duan, and Leonidas J. Guibas. 6d camera relocalization in visually ambiguous extreme environments. *ArXiv*, Vol. abs/2207.06333, , 2022. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250492911>.
- [18] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. De Bondi, M. Morris, and W. Piekarski. Arquake: an outdoor/indoor augmented reality first person application. In *Digest of Papers. Fourth International Symposium on Wearable Computers*, pp. 139–146, 2000. doi:10.1109/ISWC.2000.888480.
- [19] Steve Benford, Andy Crabtree, Martin Flintham, Adam Drozd, Rob Anastasi, Mark Paxton, Nick Tandavanitj, Matt Adams, and Ju Row-Farr. Can you see me now? *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 13, No. 1, p. 100–133, mar 2006. URL: <https://doi.org/10.1145/1143518.1143522>, doi:10.1145/1143518.1143522.
- [20] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (lt; 小特集 gt; バイオダイナミックス). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 607, pp. 881–888, 1997. doi:10.1299/kikaic.63.881.
- [21] 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.
- [22] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological Review*, Vol. 69, No. 6, pp. 477–491, 1962. doi:10.1037/h0046962.
- [23] Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342–368, 1987. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010028587900089>, doi:[https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9).
- [24] Víctor Rodrigo Mercado, Maud Marchal, and Anatole Lécuyer. “haptics on-demand”: A survey on encountered-type haptic displays. *IEEE Transactions*

- on Haptics*, Vol. 14, No. 3, pp. 449–464, 2021. doi:10.1109/TOH.2021.3061150.
- [25] Adilzhan Adilkhanov, Matteo Rubagotti, and Zhanat Kappassov. Haptic devices: Wearability-based taxonomy and literature review. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 91923–91947, 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3202986.
- [26] Bukun Son and Jaeyoung Park. Haptic feedback to the palm and fingers for improved tactile perception of large objects. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, p. 757–763, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3242587.3242656>, doi:10.1145/3242587.3242656.
- [27] Evan Pezent, Brandon Cambio, Marcia K.O’ Malley. Syntacts: Open-source software and hardware for audio-controlled haptics. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 1, pp. 225–233, 2021. doi:10.1109/TOH.2020.3002696.
- [28] Tomosuke Maeda, Junnosuke Yamamoto, Takayoshi Yoshimura, Hiroyuki Sakai, and Kouta Minamizawa. Waylet: Self-contained haptic device for park-scale interactions. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3610541.3614567>, doi:10.1145/3610541.3614567.
- [29] Evan A. Suma, Seth Clark, David Krum, Samantha Finkelstein, Mark Bolas, and Zachary Warte. Leveraging change blindness for redirection in virtual environments. In *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, pp. 159–166, 2011. doi:10.1109/VR.2011.5759455.
- [30] Markus Rank, Zhuanghua Shi, Hermann J. Müller, and Sandra Hirche. Perception of Delay in Haptic Telepresence Systems. *Presence: Teleop-*

erators and Virtual Environments, Vol. 19, No. 5, pp. 389–399, 10 2010.
URL: https://doi.org/10.1162/pres_a_00021, arXiv:https://direct.mit.edu/pvar/article-pdf/19/5/389/1621619/pres_a_00021.pdf,
doi:10.1162/pres_a_00021.