慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	身体動作に伴う視覚効果による運動感覚への影響
Sub Title	The influence of motion sensation by visual effect accompanying body movement
Author	邵, トウ暉(Shao, Tong Hui) 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	2017
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2017年度メディアデザイン学 第606号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002017-0606

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 2017年度(平成29年度)

身体動作に伴う視覚効果による運動感覚への影響

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

邵　トウ暉

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。

邵 トウ暉

審査委員:

南澤 孝太 准教授 (主査)

杉浦 一徳 准教授 (副査)

古川 享 教授 (副査)

修士論文 2017 年度(平成 29 年度)

身体動作に伴う視覚効果による運動感覚への影響

カテゴリー: サイエンス/エンジニアリング

論文要旨

近年のエンターテイメント体験では，人の五感を絡めたインタラクションを利用することで，ゲームキャラクターとの一体感をもたらすことが重視される．現在盛り上がっている臨場感の高いゲーム体験では，キャラクターの身体と似たような感覚を提示させるインタラクションの試みがされている．

本研究は，ユーザが知覚する自身の動きを錯覚させ，特殊な能力を持つゲームキャラクターの身体になったような感覚を生み出すことを目指す．本論文は，ゲームキャラクターと近い感覚を喚起するため，MR を用いてユーザの身体動作に伴い移動する実物体へ視覚効果を付与するシステムを実装した．そして，本提案によりユーザの身体運動感覚への影響について検証実験を行った．

キーワード:
複合現実，クロスモーダル，ビジュアルエフェクト，擬似触覚，運動主体感

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

邵 トウ暉

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2017

The Influence of Motion Sensation by Visual Effect accompanying Body Movement

Category: Science/Engineering

Summary

In recent entertainment experiences, it is important to bring a sense of unity with game characters by using interactions involving people's senses. In the gaming experience which is now exciting and has a realistic sense of reality, an attempt has been made to interact to present a sense similar to the character's body.

This research aims to create illusion of own movement perceived by the user and to create a feeling like a body of a game character having special ability. In this paper, I implemented a system that gives a visual effect to real objects moving with user 's body movements using MR in order to evoke a feeling close to that of game characters. And I verified the influence of the user on the physical exercise sensation by this proposal.

Keywords:
Mixed Reality, Cross Modal, Visual Effect, Pseudo Haptics, Sence of Agency

Keio University Graduate School of Media Design
TongHui Shao

目　　次

第 1 章 序論 1
1.1.研究背景 1
1.2. 複合現実感 3
1.3. 研究目的 4
1.4.本論文の構成 6

第 2 章 関連研究 7
2.1. 複合現実感 7
2.1.1 MR ディスプレイ技術 7
2.1.2 MR を用いたコンテンツデザイン 9
2.2.運動主体感 12
2.3.視覚に基づいた身体感覚変容 13
2.3.1 多感覚を絡めたインタラクション 13
2.3.2 Pseudo haptic 15
2.4.触覚に基づいた身体感覚変容 18
2.5.聴覚に基づいた身体感覚変容 21
2.6.本章のまとめ 22

第 3 章 視覚効果による身体運動感覚の変容 23
3.1. コンセプト 23
3.2. 提案手法 26
3.3. 全体の体験デザイン 27
3.4. キャラクターの特徴に合わせたエフェクトデザイン 28
3.4.1 速度感表現 29
3.4.2 パーティクルの付加により表現 31
3.4. 本章のまとめ 32

第 4 章 実装と検証 33
4.1. システム構成 33
4.2. 動作速度知覚を変化させるための視覚効果 35

4.3. 検証実験 37
4.1.1 実験目的 37
4.1.2 運動速度感覚を変調する効果の検証 37
4.1.3 実験結果 40
4.1.4 考察 41
4.4. ユーザビリティテスト 42
4.4.1 体験者の反応による評価 42
4.4.2 バリエーションを変化させた場合の評価 42
4.5. 総合考察 46

第 5 章 結論 47

謝辞 49
参考文献 50

図　目　次

1.1. wii リモコン....2
1.2. ヘッドマウントディスプレイ....2
1.3. レイア姫のホログラム....3
1.4. Mircosoft Hololens コンセプト....4
1.5. Magic Leap コンセプト....4
1.6. キャラクターへの身体像の投射....4
1.7. 現実空間におけるファンタジーな体験....5
1.8. 他人の身体感覚を得る....5
1.9. 球技などにおける MR の活用....6
1.10. 身体像を変化する MR の活用....6

2.1. MR TV Mozaik....7
2.2. HaptoMIRAGE....8
2.3. Magic Bench....9
2.4. フェムト秒レーザー技術....9
2.5. 「RoboRaid」....10
2.6. 「Fragment」....10
2.7. 「LIV」....11
2.8. 「LIV Cube」....11
2.9. 「Magic-Reality:Corridor」....11
2.10. ラバーハンドイリュージョン....12
2.11. Malleable Embodiment....13
2.12. オプティカルフローの出力....14
2.13. オプティカルフローにより速度感覚の増強....14
2.14. エビングハウス錯視....15
2.15. VisualHaptics....16
2.16. 拡張持久力....17
2.17. Shape-COG Illusion....17

2.18. 拡張満腹感 18
2.19. 「ガチガチ感」提示装置 19
2.20. 身体材質感の変調 19
2.21. Haptics for VR walls and other objects 20
2.22. Hybrid Assistive Limb 20
2.23. Moff バンド 21
2.24. Motion Sonic Project 21
2.25. 音によって腕が伸びたように感じる錯覚 22

3.1. キャラクターの必殺技 23
3.2. 格闘ゲームのエフェクト 23
3.3. 「集中線」 23
3.4. 「カケアミ」 23
3.5. アニメの残像演出 24
3.6. 走っている電車 25
3.7. 擬似的な残像表現の提案 27
3.8. 作業するへの視覚効果付加 28
3.9. 球技競技への視覚効果付加 28
3.10. 腕の移動 30
3.11. 動きの速いキャラクターの表現 30
3.12. 動きの遅いキャラクターの表現 30
3.13. 火属性キャラクター 31
3.14. エフェクトスケッチ 31
3.15. ロボット 32
3.16. エフェクトスケッチ 32
3.17. 精霊キャラクター 32
3.18. エフェクトスケッチ 32

4.1. see-through HMD の仕組み 34
4.2. see-through HMD の画面投射 34
4.3. 手と 3D モデルのマッチング調整 35
4.4. 使用する 3D モデル 36

4.5. 手のテクスチャ 36
4.6. 作成したエフェクト 36
4.7. 残像効果の有無により身体感覚への影響の検証 37
4.8. エフェクトの量と移動方向の影響検証 38
4.9. 実験環境 38
4.10. 被験者が本システムを装着する 38
4.11. 実験手順 39
4.12. 各タスクの平均速度 40
4.13. エフェクトの量と平均速度 40
4.14. エフェクトの方向と移動速度 41
4.15. 焔 43
4.6. 電気 43
4.17. エネルギ 43
4.18. KMD Forum での展示台 44
4.19. KMD Forum での展示様子 45
4.20. 精霊のエネルギ演出 45

表　目　次

3.1 各キャラクターの特徴と使用するエフェクト 27

4.1 ファンタジーエフェクトの実装 39

第 1 章

序　論

1.1. 研究背景

昔はファミリーコンピュータのコントローラーを握ってディスプレイの向こうの世界を見つめ，当時はゲーム世界と繋ぐ手段はコントローラーのボタンを連打する行動であった．テレビゲームを楽しんできた自分は，ファンタジーの世界に入り込むことは夢のようなものであった．日々進化するテクノロジーと伴い，日常のエンターテイメントも変化し，このような夢を形にしつつある．任天堂社が 2006 年で開発した家庭用ゲーム機 Nintendo Wii では，今までのボタン操作と全く異なる直感的なゲーム操作を提供した. Wii のコントローラである「Wii リモコン」は内蔵のスピーカーでゲームの臨場感を演出し，同じく内蔵の赤外線センサーと加速度センサーの機能を生かした体験ゲームも次々と開発されている．こうした臨場感と没入感を生み出すゲーム体験への期待が高まっている．

近年普及しているバーチャルリアリティ技術は，まさにゲームの中に入り込む感覚を提供しており，ゲーム体験の概念を根本から変えている．VR ZONE などの VR アミューズメント施設では専用の体感機器を使うことで，視覚だけでなく，ゲームのシチュエーションに合わせ送風や振動などの体感ギミックも提供でき，圧倒的にリアルな VR 体験を可能にした．また，Oculus Rift や PlayStation VR といったようなヘッドマウントディスプレイの普及により，家庭用向けの VR 機器が手頃な値段で手に入れるため，多くの人が臨場感の高い Virtual Reality コンテンツを提供している. 2D 画面の中にしかなかったゲームの世界が, HMD を被ることにより全身をバーチャル世界に没入することが可能になってきた.

図 1.1 wii リモコン[1]

図 1.2 ヘッドマウントディスプレイ[2]

そうした現状を踏まえ，視覚と聴覚以外にバーチャル世界で感じられたことを家庭用ゲームデバイスでも再現する需要も高まっている．従来のコントローラーでは振動フィードバックによりゲームとの一体感をもたらし，最近ではヘッドセットを使う状態の操作に対し，指の動きまで再現できる専用の HTC VIVE コントローラーや腕に電気刺激を与えるウェアラブルデバイス Unlimited Hand などが開発され, バーチャル空間においての操作感と没入感を高めることができる．

そういった個人用 VR デバイスはコストが高くつくことが課題になっており，それを解決する例として，触覚デバイスを使わず，複数の感覚情報の相互作用で生じた錯覚現象により，実際に生じていない感覚をユーザに与える手法が存在する．PSVR のゲームである「サマーレッスン」では，キャラクターの吐息を感じられるような体験を疑似的に与え話題になった．2016 年にリリースされたスマートフォンゲーム「Pokémon GO」では，手持ちのスマートフォンのカメラを使って，現実空間を舞台でゲーム体験を楽しめる．バーチャル世界との一体感を向上させ，ゲーム世界の主人公になりきるためにいろんな試みがなされている．今後も VR の手軽な体験ができるよう進んでいくことが予想される．

以上より，将来のゲーム体験は，プレイヤーの動作がバーチャル世界で反映するだけにとどまらず，バーチャルと現実世界の融合が進んでいく可能性が高い．そこで，ゲームキャラクターと同じような感覚を獲得することで，現実とバーチャルの区別がつかなくなる没我の境に入るのではないかと考える．

[1] https://www.nintendo.co.jp/wii/features/wii_remote.html より引用
[2] https://www.goglasses.fr/oculus-rift より引用

1.2. 複合現実感

一方で MR 技術は複合現実(Mixed Reality)の略語で，現実の環境で実物体とのインタラクションを可能にしながらも，現実環境での操作がバーチャル世界に反映できる技術である．MR 技術のアプローチは VR(仮想現実)のように現実世界と切り離れることなく，コンピュータで作られた 3D ホログラムを，現実世界と融合させる特徴があり，VR と AR の発展させた技術とも言われる．SF 映画のワンシーンのようにデジタルコンテンツを日常の生活空間に組み込むことで注目されている．「スター・ウォーズ」シリーズの第一作では，R2-D2 ロボットがレイア姫の立体映像を投影するシーン(図 1.3)が非常に印象的である．

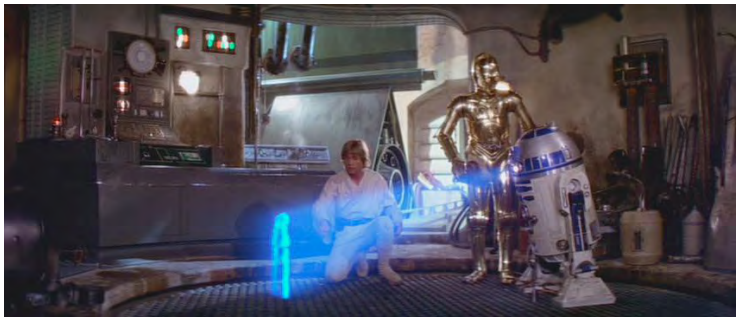


図 1.3 レイア姫のホログラム[3]

この技術は現実の景色に CG 映像を重ねる据え置き型の See-through display から，頭部搭載型のディスプレイまで発展している．2017 年，マイクロソフト社により透過型ディスプレイ「HoloLens」(図 1.4)を発売し，MR の概念が広く知られていた．HoloLens は半透明なゴーグルで装着する状態でも自分の身体を観察でき，現実世界での作業と同時にコンピュータグラフィックスによる物体を用いた作業を行うことを可能させた HMD である．HoLolens は空間マッピング技術を用いて日常の空間をスキャンすることで，現実の部屋がゲームの戦場に変えることができるなど注目を集めている．

また，自然な MR 映像を投影する HMD とされる Magic Leap(図 1.5)は，Google など世界で有名な企業から巨額の資金調達を行っている．MR 自体はまだ実験段階，MR を活用した没入感の高いエンタメはもちろん，医療，教育など分野での業務活用が今後も増加していくことが予想される．

[3] SF 映画「スター・ウォーズ エピソード 4/新たなる希望」より引用

図 1.4 Mircosoft HoloLens コンセプト[4]

図 1.5 Magic Leap コンセプト[5]

1.3. 研究目的

ゲームなどのエンタメでは，ユーザにとって主人公キャラクターはユーザの分身のような存在である．自分と異なるキャラクターの感覚を獲得するのは没入感をもたらすアプローチとして考える．例えば，異性キャラクターが近づいてきた時に，心のドキドキを感じたり，敵を薙ぎ払う瞬間の爽快感を得たりする．バーチャルの映像を現実の世界の起きことと錯覚するのが，没入感を生む大きな条件である．

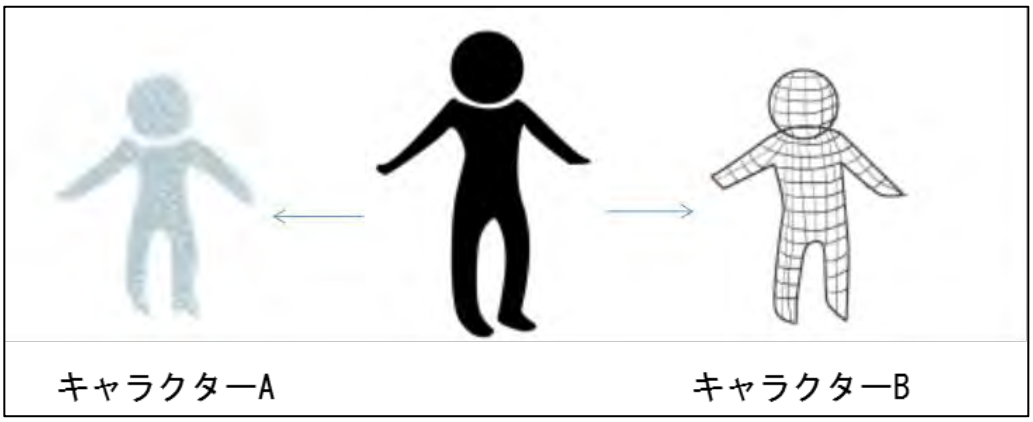


図 1.6 キャラクターへの身体像の投射

[4] http://vrhardware.com/microsoft-hololens-product-review/より引用
[5] https://www.engadget.com/2017/12/20/magic-leap-one-details-questions-dont-know/より引用

SF やファンタジーの世界において，簡単に素早い動きができる俊敏なキャラクタや重いものを軽々と持ち上げる怪力のキャラクタなど，様々な能力を持ったキャラクタが登場する．ただ，実際は自分の身体動作は自分の身体能力に依存しており，素早く動いたり，重いものを軽々と持ち上げたりすることは現実世界ではできない．今までのゲーム体験では，視聴覚と振動刺激を使用することでユーザと自分が操っているキャラクターへの没入感を高めるのがほとんどである．

将来のゲーム体験も，キャラクターになりきり，現実とバーチャルの区別がつかなくなる境界に入り，一層高い没入感を楽しめ，プレイヤーの動作がバーチャル世界で反映するだけにとどまらず，バーチャルと現実世界の融合が進んでいき，没入感を重視する MR 体験が今後も増加していくのではないかと考える．例えば，図 1.7 のように，自分の部屋で休憩しながら，身体の一部がモンスターになり，ファンタジーの世界と触れ合い，格闘家のキャラクターの筋肉質も MR 技術を通じて身に付ける体験などである(図 1.8)．また，球技などにおける MR を活用することで，日常のスポーツと運動をより面白くし(図 1.9)，CG 技術により身体像を変えることで(図 1.10), スポーツ競技における他人との繋がりを変化する未来を可能にするのではないかと考える．

図 1.7 現実空間におけるファンタジーな体験

図 1.8 他人の身体感覚を得る

図 1.9 球技などにおける MR の活用

図 1.10 身体像を変化する MR の活用

本研究は，ユーザの実際の身体で特殊な能力を持つキャラクターになりきる体験を提供するため, VR と AR を繋いだ MR 技術でキャラクターとの一体感の向上を目指す．触覚デバイスの使用でユーザの行動へ負担をかける場合があるため，本研究は擬似的な力を視覚刺激で提供する．日常生活の環境で実物体とのインタラクションを可能にしながらも，特殊な能力を持つキャラクターになる体験を作り出す.

1.3. 本論文の構成

本論文は，本章を含めて 5 章から構成されている．本章は研究の社会的な背景と研究目的を述べる．第 2 章では，MR に関する作品を取り上げ，そして視覚はどのように人の感覚に影響し，錯覚を生み出す関連研究を論じ，バーチャル身体との一体感を得るアプローチを述べる．第 3 章では，第 1 章で述べた没入対象と操作者の身体性ダイナミクスが一致していないという課題に対し，ビジュアルエフェクトを複合現実環境で身体に付与し，普段の自分と異なる身体感覚を呈示するというコンセプトと設計アプローチについて述べる．第 4 章は第 3 章の設計を実装する上，検証実験を行い，ユーザテストで得た考察について述べる．第 5 章にて結論と展望について述べる.

第 2 章

関　連　研　究

2.1. 複合現実感

2.1.1 MR ディスプレイ技術

MR は医療，教育，建築デザイン，工場の組み立てライン，アミューズメントなど多岐にわたる応用例が存在する．本論文はアミューズメント分野の MR 技術の応用であるため，アミューズメントにおける関連研究を 4 つほど挙げる．

1 つ目にあげるのは，MR を用いた新たなインタラクティブ TV 体験のためのアプリケーションである「MR TV Mozaik」[1]である(図 2.1)．これは，ホームエンターテイメントが MR 技術によって将来的にどのようなかたちになるかを研究するものである．MR TV Mozaik はディスプレイに重畳された MR 空間にドラックアンドドロップなどのタッチ動作でインタラクションすることでテレビのチャンネルを直接的に変更したり，MR 空間自体の情報を変化させたりすることができる.通常のディスプレイを MR デバイスであるタブレットや HMD を通し，ディスプレイのシーンを解析することでジオメトリや仮想空間における光景を変化させ，インタラクションが行えるようになっている．

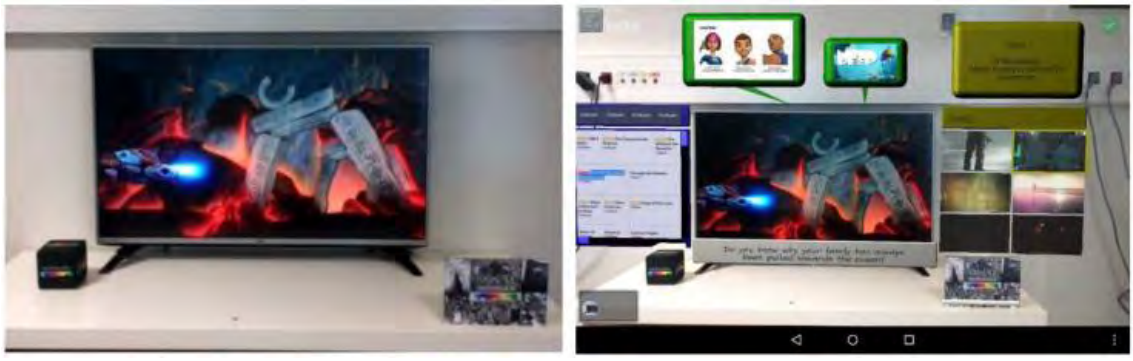


図 2.1 MR TV Mozaik[1]

3D ディスプレイにより現実空間にホログラフィックな CG 映像を投射する MR 技術も注目されている．2 つ目にあげるのは．空間投影型立体ディスプレイ「HaptoMIRAGE」[2](図 2.2)である．実空間中にバーチャル映像を映し，実物体にホログラフィックな 3D 映像を重畳し，3D 映像を実物体のように動かせる操作方法によって，バーチャル物体の存在感と臨場感を発揮した．

図 2.2 HaptoMIRAGE[2]

3 つ目にあげるのは，複数人で MR 空間を共有するシステムである Disney Research の Magic Bench[3]である．図 2.3 で示すように，このシステムは通常の MR がタブレットや HMD を通して観察するユーザ 1 人のみの属人的な MR システムであることを問題意識としてもっており，第三者の FOV を通すことで，複数人で同一 MR 空間上でインタラクションを行えるようになっている．上の図からもわかるように，ベンチの上で MR 空間上に存在する動物を見ることができ，さらに触覚フィードバックを通してインタラクションを行うことができるようになっている．システムとしては Kinect を使用して位置を推定し，超音波によるハプティックアクチュエータとスピーカーを用いてインタラクションを行う．

4 つ目にあげるのは，フェムト秒レーザー技術を用いた空中投影型のインタラクション可能なホログラフィック装置「Fairy Lights in Femtoseconds 」[4]である(図 2.4)．レーザーを使用した任意の空間上にホログラフィックを表現でき，なおかつそれにふれることでホログラフィックが形を変えることができるようになっている．このシステムは MR 空間を現実空間に重畳するやりかたではなく，現実空間にプラズマを用意することでインタラクションが可能になってい

る．その点でいえば既存の MR 技術の枠内ではなく，あたらしい MR の表現手法といえる．VR 元年と言われる 2016 年と比べ，VR 技術は 2017 年で飛躍的に成長し，今後も一層進化すると考えられる．

図 2.3 Magic Bench[3]

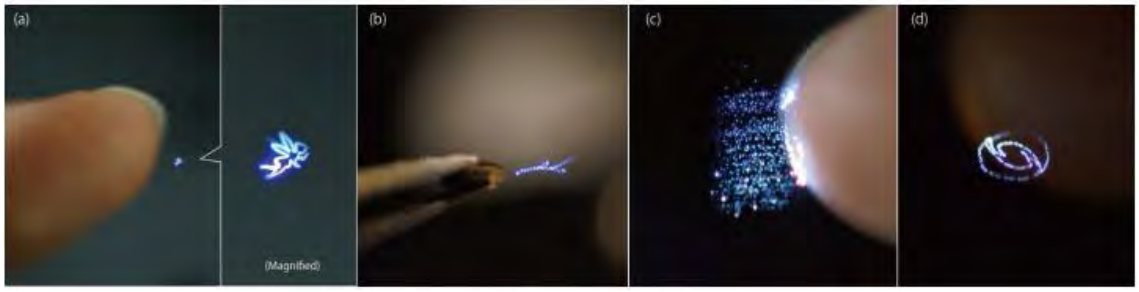


図 2.4 Fairy Lights in Femtoseconds [4]

2.1.2 MR を用いたコンテンツデザイン

MR 技術の発展によって，実世界上にディスプレイを通してバーチャルな物体を現像しよりリアリティのあるインタラクションを楽しめるようになってきている．またそれと同時に HMD の発展によってユーザの視界により近いディスプレイ上にバーチャルな物体を現像することも可能になった. このような MR 技術の発展と HMD 自体の発展よって，さまざまな分野で複合現実感を体験させてくれるようになり，その手法は作品によって異なっている．この章では，

そうしたさまざまな分野で行われている，複合現実感体験の関連研究を述べる．

1つ目はデジタルエンターテイメント分野の前述の透過型ディスプレイHololensを利用したゲームである．デジタルエンターテイメント分野では，このような現実世界に近いディスプレイ上にコンピュータグラフィックス技術を用いて加工を行い，主観的な視点から実物体とバーチャルの物体を同時に操作できるような，リアルな複合現実感を体験できるゲームが提案されている．HoloLensを用いたシューティングゲーム「RoboRaid」(図2.5)と，謎解きゲーム「Fragment」(図2.6)では，現実の部屋で歩き回りながら，スマートフォンをタップするように空間上をタップすることで，ジェスチャー操作ができるようになっており，自然なインタラクションができるようになっている．ロールプレイングゲームのようにユーザが主人公などのキャラクターを演じる概念をなくし，自分がゲームの主人公になることで一体感をもたらした．また，立体音響で周囲の環境音を聞くことによって，自分以外のゲームキャラクターの実在感を一層向上させることに成功している．

図 2.5 「RoboRaid」[6]

図 2.6 「Fragment」[7]

また，VRの没入体験では現実空間から遮断し，操作するキャラクターと現実の身体像との不一致で没入感が損なわれる場合が多い．そこで，ユーザの身体像を仮想空間に投射することで一体感をもたらすMR体験も作られている．図2.6で示す「LIV」では，一人称のVR体験を提供する同時に，ユーザの全身をVR空間に映すことができる．また，「LIV Cube」(図2.8)は設置しやすいroom scaleの工作室を提供し，このような技術のコストが高いとコンテンツの併用が難しいなどの問題を解決した．「TYFFON」社が開発したMRホラーコンテン

[6] https://medium.com/futurepi/best-practices-for-mixed-reality-design-in-2017-7dab602574eb より引用
[7] https://www.pcworld.com/article/3038227/hardware/here-are-the-first-amazing-games-and-apps-for-microsofts-hololens.html より引用

ツ　「Magic-Reality:Corridor」(図 2.9)では，体験者が没入型ヘッドマウントディスプレイを被るそのままの姿で複数人と一緒にホラーゲームの世界に入り込み，自分の足で歩き回る上に，HTC Vive のカメラで撮ったユーザの映像ゲーム中の照明方向や色に合わせて再合成することで，より臨場感を向上させる．これらの複合現実体験の特徴なのは，自分の実在の身体でバーチャルの映像とインタラクションし，没入感を高め，より多く身体感覚に影響を及ぼす．

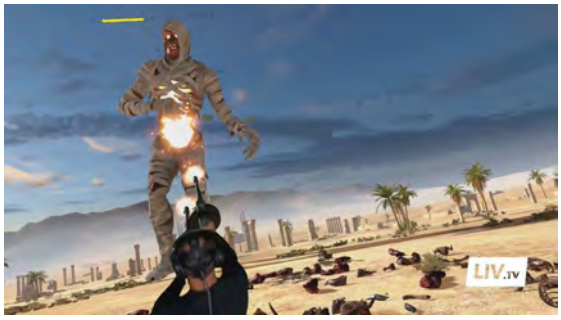


図 2.7 「LIV」[8]

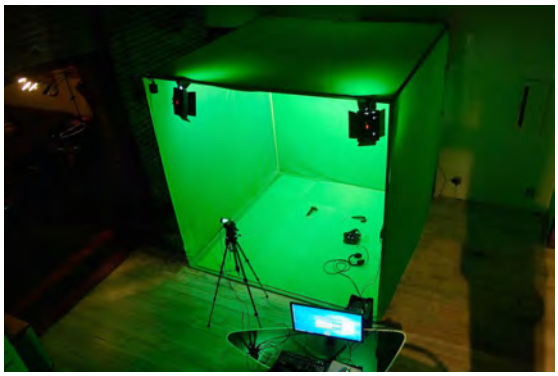


図 2.8「LIV Cube」[9]

図 2.9 「Magic-Reality:Corridor」[10]

[8] https://www.yelp.com/biz_photos/liv-san-francisco?select=IbHBL41MVEI9lKygucbCHg より引用
[9] https://uploadvr.com/cix-liv-mixed-reality-name/より引用
[10] Thttps://travel.mdpr.jp/travel/detail/1720953 より引用

2.2. 運動主体感

人間の自分の身体表象への認識は主に身体所有感(sense of ownership)と運動主体感(sense of agency)の２つがある．身体所有感とは，自分の身体を自分のものだと感じる感覚であり，脳により視覚や触覚などの情報を統合し，自分の身体であるかどうかを判断するものである．Botvinick らのラバーハンドイリュージョン[5]は自分の手と似たようなゴム製の手(フェイク)を机に置き，被験者はラバーハンドを観察させながら，ブラシーなどで実在の手とラバーハンドを同時に刺激する(図 2.10)．実在の手が見えない状態では，ゴム製の手で発生した触覚を実在の手であることに錯覚する現象である．人間の身体感覚を論じる上で代表的な発見であり，身体所有感の錯覚の生起条件として，触覚刺激の同期と身体イメージの類似の二つの点が重要だと指摘した．

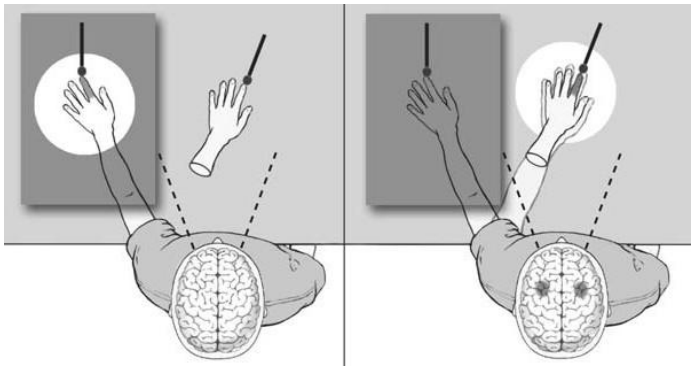


図 2.10 ラバーハンドイリュージョン[5]

運動主体感とは，自由自在に体を動かせることができ，ある運動をした際，これが自分の動作と感じられる感覚である．このように，人間が自分の身体に対する知覚を変化させるには，身体表象の変調と体性感覚の統合により知覚をコントロールすることの可能性を示唆している．本研究は自らの運動に対し，変調した運動イメージにより異なる運動感覚を提供することを目的とし，それを利用すれば，ユーザの身体運動に対する知覚に影響を与えるのではないかと考える．

アバタへ身体像の投射する際，視覚と運動間の不一致表現により運動主体感の喚起に関する先行研究として，Malleable Embodiment[6]ではモーションキャプチャスーツを被験者に着用させ，自身の動きを没入型ディスプレイを通じ

て観察することができる(図 2.11). バーチャル空間では実際の運動とずれた運動イメージを提供し，身体の動きが軽くなったり，重くなったりすることを感じる．被験者が仮想に運動イメージを実在の運動と錯覚したため，身体感覚が無自覚的に変調するためである．

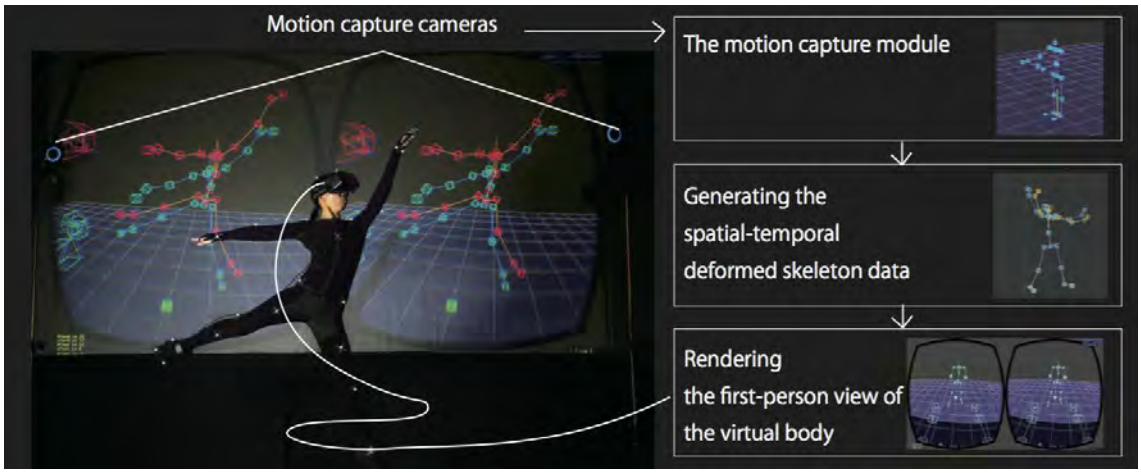


図 2.11 Malleable Embodiment[6]

2.3. 視覚に基づいた身体感覚変容

前項ではキャラクターとの一体感はゲーム体験を向上させる重要な要素として注目されることを紹介した．本研究は視覚刺激によって対象のキャラクターとさらなる一体感をもたらすことを目標としており，そのために人間の知覚特性によりマッチした手法の提示を行う必要がある．具体的には，人間の運動感覚を変化させるために，どういった工夫したほうがいいのか，運動への認識の原理を探ることが必要とされる．

2.3.1 多感覚を絡めたインタラクション

脳と視覚の相互作用のメカニズムに関する研究[7]では，人間が外界から得る情報はおよそ８割を視覚で支配されると指摘されている．近年も「視覚」を中心とした感覚を支配することで没入感を生み出す体験を提供するデジタルメディアやゲーム機器が多い．

例えば，自己移動感への認識では，人間が体全体を動かせると，目で観察す

る回りの環境もダイナミックに変化する．その際に，視野の周辺はオプティカルフロー(図 2.12)という放射線のような軌跡が生じ, このオプティカルフローが自分の移動の方向と速度を判断する重要な手がかりとなっている[8]．このようなオプティカルフローの特徴を用いた先行研究として，岡野らは周辺環境へオプティカルフローの付与により自己運動感を変化させ[9]，実際に動いてない被験者に速度感覚を増強するシステムを提案した．この論文は視覚刺激により身体動作の錯誤効果を生み出す可能性を示唆した(図 2.13). この特徴を把握すれば, 複合現実技術によりユーザの運動感覚の拡張を可能にしている.

人間の錯覚は昔から研究されており，錯覚を利用した有名な作品も数多く存在している. 例えば, エビングハウス錯視[10]はその中でも有名な錯覚の一つで, 実際は大きさの変わらない 2 つの円の大きさを，その周りの円模様の影響によって，異なる大きさだと知覚してしまう錯覚である(図 2.14)．このように，人間の知覚は物理量を正確に捉えているわけではなく，実際には物体の周囲の環境に大きく影響を受けてしまうことが研究により明らかにされている.

図 2.12 オプティカルフローの出力[8]

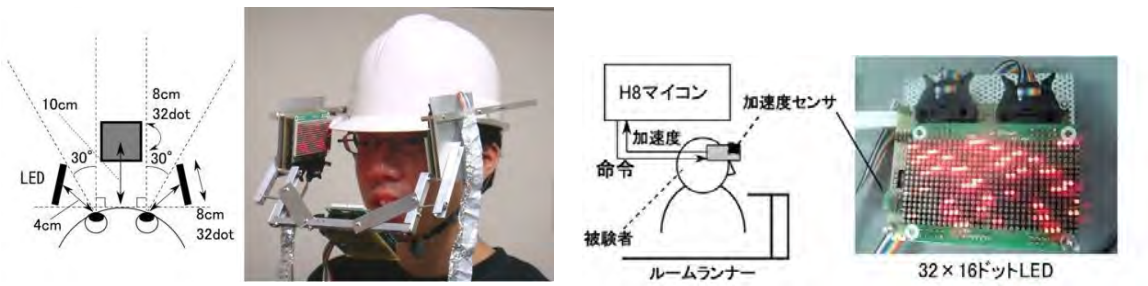


図 2.13 オプティカルフローによる速度感覚の増強[9]

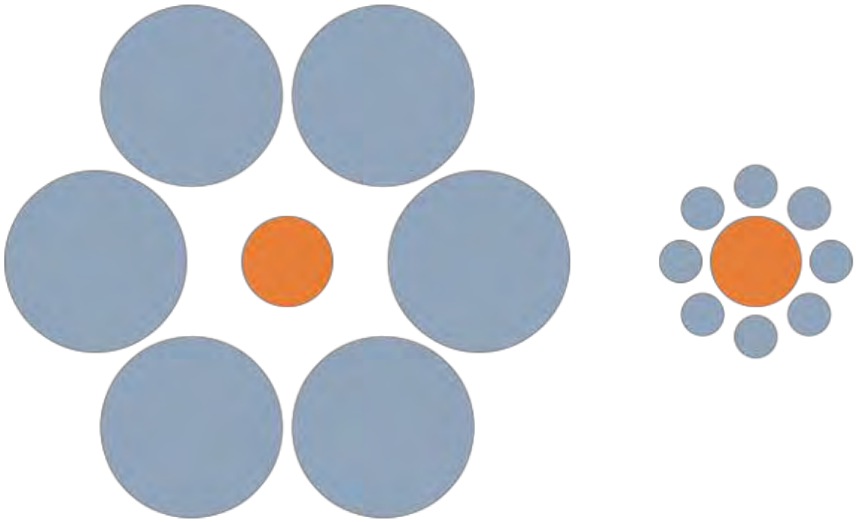


図 2.14 エビングハウス錯視[10]

2.3.2 Pseudo-haptics

多感覚の間の相互作用の可能性に関する研究が盛んに行われている．その中，ユーザが疑似的な触覚フィードバックを得るための Pseudo-Haptics[11]では，視覚上の変化と実際の操作との不一致でお互いで影響・補完で生じた知覚の変化という錯覚現象として注目されている．Pseudo-Haptics の現象により，ユーザが予測の運動とずれた運動イメージを提供することにより，実際に発生してない触力覚を引き起こす現象が証明されている．

渡辺らの VisualHaptics[12]では，マウスカーソルの動きに変化をつけることによって，ユーザは擬似的な触感を知覚することがわかっている(図 2.15)．これは，視覚情報の入力によって，実際は変化していない触覚情報の入力を知覚するというクロスモーダル知覚の一つである．

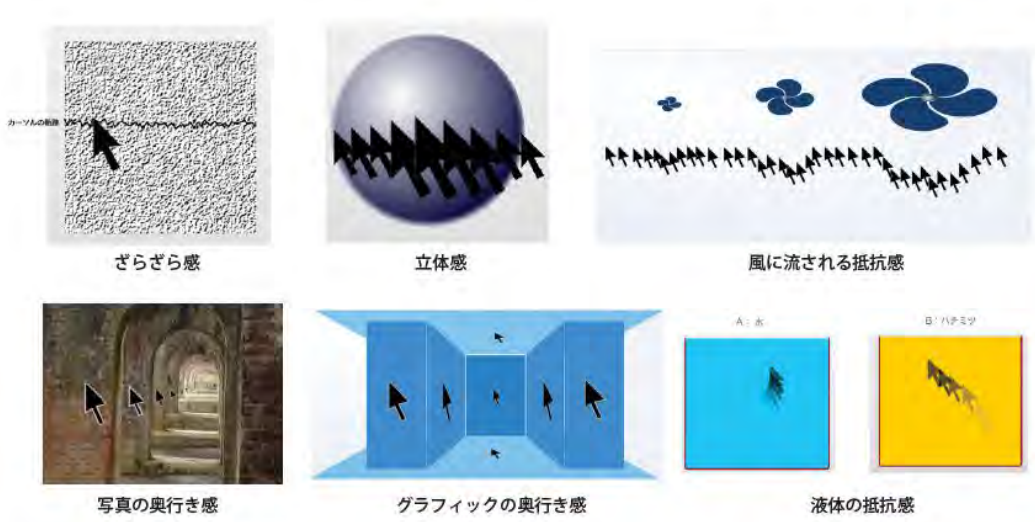


図 2.15 VisualHaptics[12]

複合現実感を用いた先行研究として，図 2.16 で示す拡張持久力[13]は MR 技術を用いて実物体の色を変化させることによって，実物体とのインタラクションは維持したまま重量知覚を変化させ，少ない疲労度で物体を持ち上げることを可能にした研究である．また，Shape-COG Illusion[14]では，実物体の重心と異なるビジュアル表現を MR 環境で提示し，ユーザの持ち物の重心位置を錯覚させた(図 2.17).

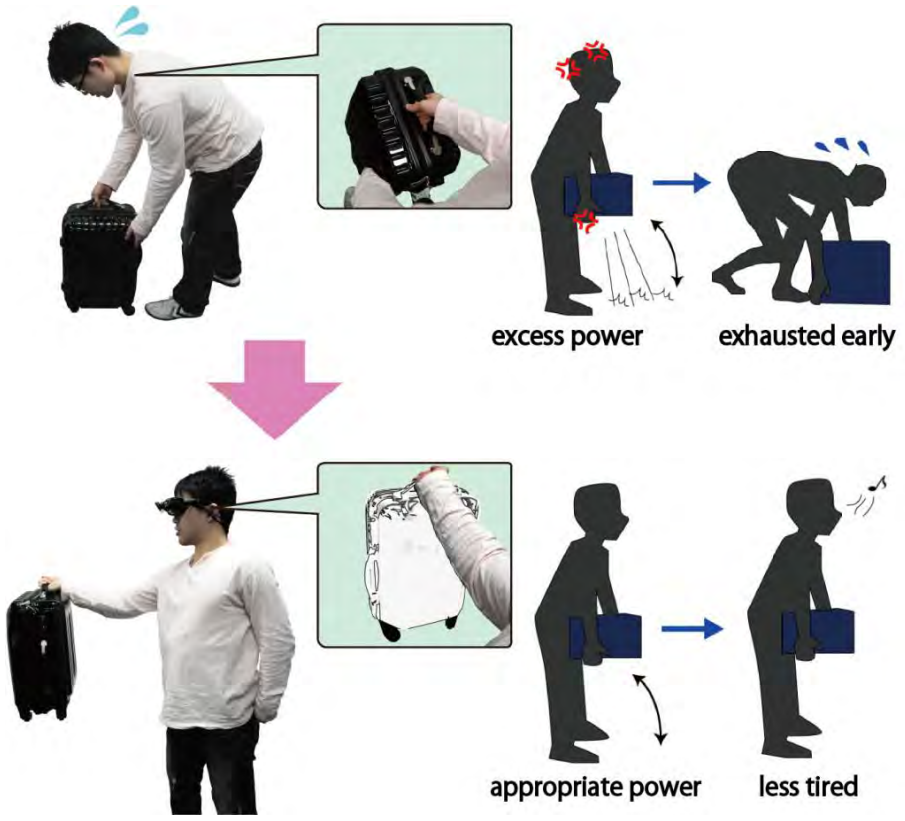


図 2.16 拡張持久力[13]

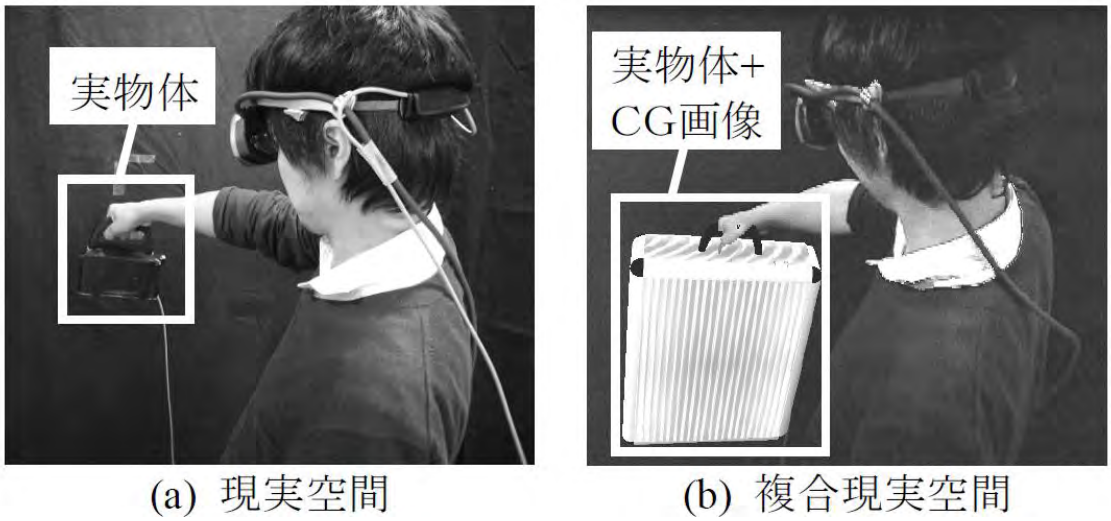


図 2.17 Shape-COG Illusion[14]

また，前叙した人間の情報処理のメカニズムでは，感覚情報を処理する際に，聴覚と味覚といったような感覚より，視覚を処理する優先度が高い．日常の体験は幾つの感覚を統合したものであり，近年の VR 分野や人間の五感に関する研究が進むにつれて，クロスモーダル知覚という分野が大きく進展している．これは，クロスモーダル現象は VR 技術と心理学的な知見により，実際に得ってない感覚を脳の補完機能により異なる知覚をユーザが得ることができる現象である．鳴海らの拡張満腹感[15]の研究では，拡張現実技術を使い，食品の見た目のサイズとその周辺環境をリアルタイム CG 生成技術で変化することで，食事で得られる満腹感を操作する(図 2.18)．ユーザを HMD に表示した映像を注目しながら食事することで，食事行為でもたらした満腹感に影響を与えることを確認した．

これらの関連研究により，視覚刺激と触力覚の統合で生じさせた錯覚はユーザの実際の感覚を変えることが効果的である．このようなクロスモーダル知覚は視覚と触覚の間だけではなく，視覚と聴覚や嗅覚と味など，様々な領域で確認，システム化されており，今後のエンタメへの活用が期待されている．

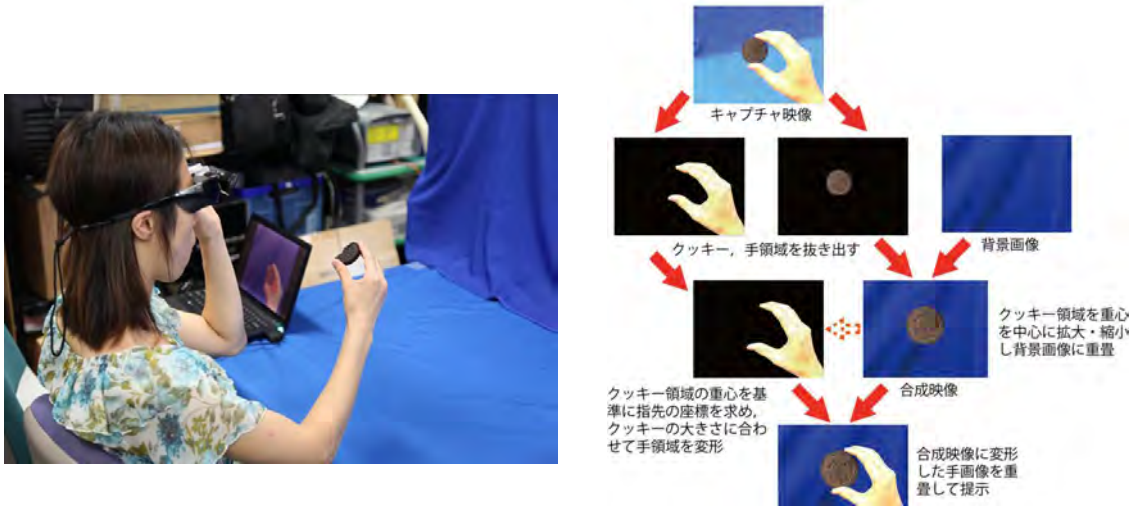


図 2.18 拡張満腹感[15]

2.4. 触覚に基づいた身体感覚変容

一般のゲーム体験では，ディスプレイとコントローラーから自分が操作している主人公自身から見た回りの環境情報と外界のインタラクションを知覚す

る．しかし，実際にキャラクターが経験する感覚を映像やコントローラーを通じて直接的に理解するのは難しい．近年ではバーチャルのゲーム世界の感覚を現実のユーザに体験させるため，ハプティクス技術との融合で五感を刺激する研究も進んでいる．

キャラクターと似たような身体感覚を引き出す手段として，拡張した触覚提示によって身体運動感覚を変調させる研究[16]が存在する．筋力トレーニングする際に実際より多く運動した擬似的な達成感をもたらすため，「ガチガチ感」を肘部への触覚提示により，実際の運動量よりも大きな運動をしていると感じる運動量錯誤効果が得られる研究が挙げられる(図 2.19)．また，栗原らは物体衝突時で生じた振動フィードバックの特性を利用し，人間の主観的な身体材質感を周期的な衝突感により再現し，被験者に現実と異なる材質で作られた身体を持つような感覚提示システムが提案されている[17](図 2.20)．これらの先行研究は，対象のアバタへ身体感覚を乗り移る際に，実際と異なる体性感覚を人工的に喚起する可能性を示唆している．

図 2.19 「ガチガチ感」提示装置[16]

図 2.20 身体材質感の提示[17]

Lopes らは[18]，ハプティクス技術を活用し，ウェアラブルデバイスをユーザーの皮膚に装着させ，筋肉に微量な電気刺激を与える EMS（Electrical Muscle Stimulation）をつけることで，バーチャル世界で物体に触れたような感覚を再現した(図 2.21)．これまで仮想空間でのインタラクションでは，ユーザーは単純な情報の受け手としての存在が多く，新しいアプローチによってインタラクティブな VR 体験を実現していると考えられる．

一方で，ユーザに普段と違う身体感覚を持たせるため，Hybrid Assistive Limb[19]のようなユーザがパワードスーツを着ることで力の補助を受け，自分自身の身体能力を物理的に拡張するためのシステムも存在する(図 2.22)．これらを応用すれば，ユーザがゆっくりと動かした動作を拡張して素早く動かすことも可能であると考える．しかしこれらのシステムは複雑で大掛かりであるため，費用や運用に大きなコストがかかってしまうことが問題である．

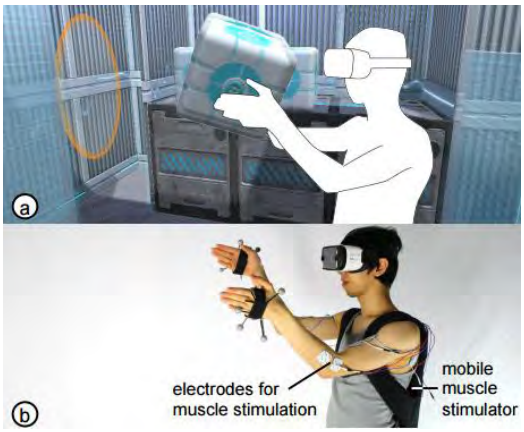


図 2.21 Haptics for VR walls and other objects[18]

図 2.22 Hybrid Assistive Limb[19]

2.5. 聴覚に基づいた身体感覚変容

聴覚により身体感覚を拡張するアプローチとして，株式会社 Moff が開発したスマートトレ「Moff バンド」(図 2.23)は三次元の動作認識技術を使い，手首や足首にデバイスを付けることでユーザの日常の動きのデータを計り，身体でゲームを遊ぶことができる．そうすることで，動くたびにアプリから音が鳴り，フィードバックにより動きの効果を実感できる上，様々なゲームキャラクターを連想させることができる．また，ソニー社が TOKYO DESIGN WEEK 2016 で披露したウェラブルデバイス Motion Sonic Project(図 2.24)では，身体の動きを音で拡張する．普段の動作で引き起こした音は聞こえないが，このデバイスはマイクによって動く際の「風切り音」を収集し，モーションセンサーで細かい動きのパラメーターを計測し，エフェクトを掛け，動きに伴った効果音を増幅できる．

図 2.23 Moff バンド[11]

図 2.24 Motion Sonic Project[12]

自分が意識している身体像を変容する研究として，NTT コミュニケーション科学基礎研究所では，ユーザの目を隠し，床を叩く音を実際より遠い場所に鳴る状況[20]を作った．結果として，ユーザに「音が鳴るのは自分の手が叩いた場所のはず」と思わせ，腕が伸びる感覚を作り出した(図 2.25).

[11] https://jp.moff.mobi/?page_id=3345 より引用
[12] http://mag.onyourmark.jp/2016/12/motionsonicproject/99835 より転載

図 2.25 音によって腕が伸びたように感じる錯覚[20]

2.6. 本章のまとめ

近年では，触覚提示や身体像の変容など，いろんなアプローチからユーザの感覚を変化させるための研究が行われている．本章はまず，ユーザの実在の身体でデジタルの情報とインタラクションできる MR 体験の発展から，キャラクターとの一体感はエンターテイメント体験での重要性が見られた．

次は，生理学的アプローチから，人間が移動速度などの情報を知覚する際，視覚と脳の相互作用で知覚に影響を与える．Pseudo haptic とクロスモーダルの知見に基づき，五感の統合により知覚を変化できる可能性があると考えられる．

また，キャラクターとの一体感を引き出し，バーチャルの身体所有感をつくるため，VR 技術によりユーザがアバタと同じような身体感覚を持たせ，新しい体験を創出する関連研究を挙げた．視覚，触覚，聴覚の 3 つの視点から，身体感覚を変調する手段を検討する．これらの先行研究で得られた知見を統合し，視覚と能動的な運動感覚の相互作用を活用することで，MR 空間のインタラクションにおける運動知覚の変化が期待される．

第 3 章

視覚効果による身体運動感覚の変容

3.1. コンセプト

ゲームやアニメーション作品において，シーンやアクションの演出効果を向上するために，様々なビジュアルエフェクトが使われている．例えば，ストリートファイターシリーズのキャラクターが必殺技を放つ時(図 3.1)，様々なファンタジーなエフェクトが画面上に表現される(図 3.2)．また，コマの中でキャラーを目立たせる集中線(図 3.3)，擬似的に濃淡をつけ，雰囲気を作るカケアミ(図 3.4)などから示唆をえられた．

図 3.1 キャラクターの必殺技[13]

図 3.2 格闘ゲームのエフェクト[14]

図 3.3 「集中線」

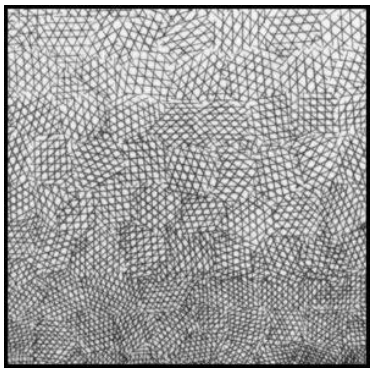


図 3.4「カケアミ」

[13] 「大乱闘スマッシュブラザーズ for Nintendo 3DS / Wii U」より引用
[14] 「ストリートファイター V」,© CAPCOM U.S.A.,INC.2017 ALL RIGHTS RESERVED より引用

その中でも，筋肉が発達している格闘家キャラクター陣がすばやく移動している身体に伴って，反対方向に運動していたような残像エフェクトを提示する特徴が印象的である(図 3.5)．ここの「残像効果」は，フィクションではなく，物理現象に基づいたモーションエフェクトであり，日常生活でも目が運動している物体を捉える際に，影が視野に残る現象である．例えば走っている電車の静止画一枚だけ(図 3.6)を見せても，残像効果の付加により速度感と移動方向の情報を推定できる．物体が高速で移動しているような表現を行う際，移動している物体に残像などの視覚効果を加える手法として，幅広い分野の作品で使われている．

ただ，実際に身体の作り(筋肉の量，身長，体重，腕の長さなど)がユーザがキャラクターで異なり，実物体とインタラクションをする時に，キャラクターとの感じ方も異なる．例えば，同じ力で走らせても，動きの早いキャラクターは簡単に素早く移動できる一方，プレイヤーには難しいことのはずである．このような感じ方の違いを埋めるためには，前述のように人間の日常経験に基づき，誇張した残像効果を身体に再現し，自身の速度知覚を擬似的な残像でコントロールする．そうすることで，特殊な能力を持つキャラクターの身体感覚をを体験できるではないかと考える．

図 3.5 アニメの残像演出[15]

[15] 集英社「ドラゴンボール」より引用

図 3.6 走っている電車[16]

第三者としてゲームをする時に，視覚と聴覚とコントローラーから伝わってきた振動で臨場感を味わうような仕組みは PlayStation のデュアルショックコントローラや Wii リモコンなどから存在している．また，第 1 章で述べたように送風などを用いてキャラクターとの一体感を高める複雑な体感ギミックも存在する．従来の感覚拡張システムは，触覚デバイスを経由したものが多く，手など身体部位の動作を妨げるため，デバイスを装着する状態で普段の行動を行うのが難しい．MR において，実物体をユーザの手で直接操作することが出来なくなると複合現実感であることのメリットが損なわれてしまう．利用者は本システムを使いながらも，現実空間での作業ができる，現実空間と自分の身体像をそのまま観察し，実物体と直接インタラクションできることは必要となる．

そういう課題に対し，先行研究[11]では錯覚を利用して擬似的な触力覚を生み出せることがわかった．前述の拡張持久力[13]では，物体の明度を MR により変化させ，持ち上げるものの重量が軽く感じる錯覚を実現した．クロスモーダルによって知覚を変化させる研究を考えると，これらは大掛かりなシステムを用いなくても，視覚情報によって様々な知覚を変化させられることを示した．また，エビングハウス錯視[10]や実物体を変化させずに周辺環境を変化させることによって実物体の存在感を変化させる研究は，実物体そのものを変化させなくても，実物体から得られる知覚はその周囲の影響を大きく受けて変化することを示している．それらの研究では，対象の身体部位の運動知覚を変化させる課題はまだ検討されていない．本研究では複合現実環境で Visual Feed Back のみでゲームキャラクターの身体感覚のデザインを行う．

[16] http://you.ctrip.com/travels/hangzhou14/2272657.html より引用

3.2. 提案手法

本研究はMR環境において身体に視覚効果を付与することによって，Pseudo Hapticを喚起し，ユーザの身体感覚を変調させるため，漫画やアニメで使われているような身体変化に関する誇張表現をMRゲームに適用することを考え，ゲームキャラクターの特徴的な身体能力を表す視覚効果をMR空間で実装する．

提案するコンセプトは複合現実感により，CGで作成した残像の視覚効果で実際に変化してない触覚情報の変化を知覚し，クロスモーダル現象を利用し，無意識的に動く速度出力の調整を誘導するシステムである．実際の速度とは異なる速度を知覚することによって，身体動作速度が強化されたような感覚を得られると考える．残像効果を利用した運動感覚の変調を達成するために，本論文は図3.7で示した視覚効果により運動感覚を拡張するシステムを提案する．

身体の一部の運動感覚の変化を錯覚させることの実現を目指すにあたっては，まずは身体の任意部分の動きを対象とする．コスト面と操作の利便性や，本システムは個人用のゲームやエンタメへの利用を前提としているため，ユーザの物理的な身体動作は変更させずに，その周囲へ視覚効果を表示することによって錯覚現象を生じさせる．個人利用できないような大掛かりなシステムや複雑なシステムを要しないこととする．

そこで，本研究ではエンターテイメント分野への応用を考え，速度感覚を提示する様々な視覚効果に着目した．例えば，映画やアニメ，ゲームであればビジュアルエフェクトが存在し，漫画であれば効果線などが存在している．これらの手法は，物理法則に正確には則っていない表現もあるが，視聴者から見たときの違和感は少なく，また物理法則を正確に再現した場合よりも動きや表現をより分かりやすく伝えることを可能にしている．前節で述べた要件を満たすために，現実の身体と異なる状態や動きをする対象への一体感(運動主体感)を喚起するアプローチとして，本研究複合現実環境において実際の身体の動きとリアルタイムで残像効果を擬似的に表示するシステムを提案する．これにより，ユーザが自身の動作の速度への知覚を変調できると考える．

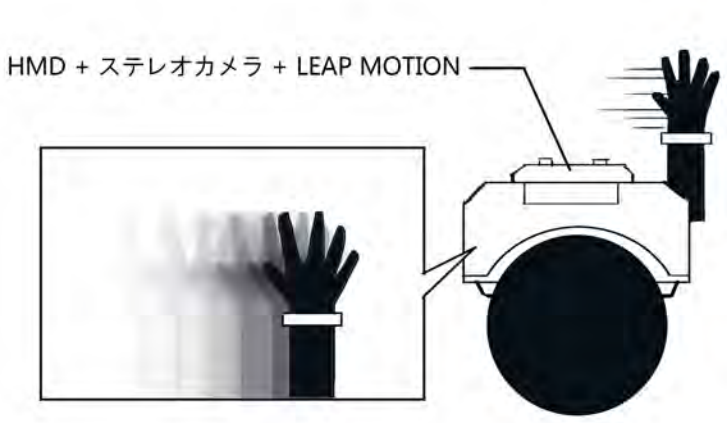


図 3.7 擬似的な残像表現の提案

一方，高速な動作以外にも様々な特殊身体感覚が存在しているので，対象のキャラクターの特徴に合わせて相応しい視覚効果を付与すれば身体感覚の変調をもたらせるを考える．以上の構想を実現するために，システムとエフェクトのデザインは以下の指針に基づき，デザインを行う．

1. 視覚効果は身体の動きに合わせること
2. 身体の見た目の形を保つままで視覚効果を設計すること
3. 各キャラクターの特性にあわせ，視覚効果をデザインすること

3.3. 全体の体験デザイン

本研究で構築するシステムは，身体動作を反映できる See-through HMD に基づいて，ハンドトラッキングで腕の情報を収集し，腕を動かすたびに，手の位置とジェスチャーに応じて，運動の軌跡と伴ってエフェクトを表示する．ユーザへの負担を軽減するため，MR 技術を使い，ユーザの物理的な身体動作は変更させずに，その周囲へ視覚効果を表示することによって錯覚現象を生じさせる．これにより，ユーザがあたかも自分がゲームのキャラクターに変身したような感覚が得られ，更なる高い没入感を向上させる効果があるのではないかと考える．

MR により実装するイメージは図 3.8 のように想定する. 室内で掃除する際に視覚効果を手につけることにより，パーティクルで奇妙な感覚をもたらし，単

調な作業を面白くする．スポーツ競技の場合にラケットを持った腕，またはボールを蹴る足に視覚効果をつけると，動作の幅を前もって予測できる上，正しい動き方に導く(図 3.9)．周囲の風景と身体の形を変容させない状態で，身体に付加する視覚効果で日常で新しい体験を可能とする．

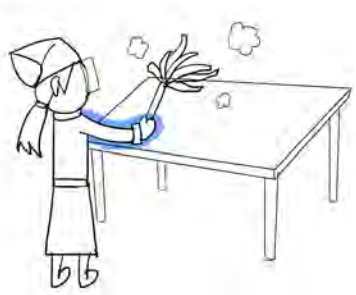


図 3.8 作業するへの視覚効果付加

図 3.9 球技競技への視覚効果付加

3.4. キャラクターの特徴に合わせたエフェクトデザイン

特殊な能力を持つキャラクターの身体構造は一般な人間と異なる．第 2 章では触覚デバイスなどでキャラクターが動く時の身体状況を反映した．視覚効果を使用する場合，実際の運動の速度感を変化させるには，身体部位と似たような残像エフェクトで表現する．また，実際に存在していない特殊能力を発揮する感覚を提示するには，パーティクルにより自然な視覚効果を表現する．対象キャラクターの特徴と相応しいエフェクト種類を表 1 で示す．

表 1：各キャラクターの特徴と使用するエフェクト

キャラクター属性	特徴	使用するエフェクト
俊敏なキャラクター	動きが速い	残像を素早く出す
体が重いキャラクター	動きが遅い	残像の遅延，濃い色使い
炎の魔法使い	炎を自在に操作できる	腕がバチバチ燃えている
ロボット	電気で動かす	漏電現象，スパーク
精霊	体が軽く感じる	エネルギが体内から湧き出す

3.4.1 速度感表現

アニメーションや漫画の分野などでは早い速度を表現する際に，物体の残像効果を誇張して表現することがある．また，映画や写真などでは，高速で動作している物体はわざとモーションブラーを発生させることによって動きや速さを表現することがある．

そこで任意の部位の身体動作の速度知覚変調を実現するために，本稿では，ユーザの身体が動いた際にその身体の軌跡に沿って身体の残像を表示することにより，同じ動作速度であってもユーザの知覚する身体の速度が変化するのではないかと考えた．これによってユーザの任意の部位のみの速度知覚を変化させる．

残像効果を使用した速度感覚の変調では，最終効果はパラメーターの変化に大きく影響されると考える．図 3.10 で示す普段の腕を動かす動作を表現する際，図 3.11 のように俊敏なキャラクターの動作を表現する時には，動きの逆方向から素早く出す半透明な残像によりデザインする．また，動きの遅いキャラクターを表現する時では，ユーザに動きがにぶくなってきた感覚を提示する必要がある．図 3.12 で示したように残像のイメージを透明度の高い色で表示し，残像の発生する位置を動きと同じ方向から出す．

図 3.10 腕の移動

図 3.11 動きの速いキャラクターの表現

図 3.12 動きの遅いキャラクターの表現

3.4.2 パーティクルの付加により表現

今まで体験したことがないファンタジーな感覚，または人間の身体構造と異なるキャラクターの感覚を実現するには，身体に付加するパーティクルの形状，大きさ，数量，方向によりコントロールする．

前記の設計指針に基づき視覚効果のデザインについて，下図のような例が挙げられる．例えば，火属性の魔法使いキャラクター(図 3.13)は自在に炎を操作することができる．このような感覚に近づくためには，ユーザに体がバチバチ燃えているような視覚効果を提示し，燃焼によりもたらした触覚と温度感覚を錯覚させる(図 3.14)．また，ロボットキャラクター(図 3.15)は電力で機体を駆動するため，電流が体の中に転流し，動作に出力することに伴って漏電も起こったりする感覚をユーザに感じさせる(図 3.16)．最後に，精霊のキャラクター(図 3.17)は翼と軽い身体を持つ特徴があり，エネルギフローが体外に湧き出すようなしなやかな身体感覚をユーザに提供する(図 3.18)．視覚効果のイメージは図のように示す．

身体動作に視覚効果の付与により以上のキャラクターの身体感覚を達成できるかについて，検証実験を行う．

図 3.13 火属性キャラクター

図 3.14 エフェクトスケッチ

図 3.15 ロボット

図 3.16 エフェクトスケッチ

図 3.17 精霊

図 3.18 エフェクトスケッチ

3.5. 本章のまとめ

特殊な身体構造を持つゲームキャラクターになりきるには，単なる映像表現であったり，そもそもデバイスとして標準コントローラを利用するのでは難しい．前章で述べたように，体性感覚と視覚の相互作用で生じた錯覚を利用する手法が効率的でコストを抑えることに優れている．本章はまず，格闘ゲームの主人公など身体の作りが特殊なゲームキャラクターの感じ方をユーザにも感じさせられるため，身体動作に伴う視覚効果によって運動感覚を変調させるというコンセプトを述べた．次に，ユーザと対象のキャラクターとの感じ方の違いを埋めるため，複合現実環境における運動感覚の錯覚を生起させる要件を分析した．最後に，ユーザが see-through HMD を経由し，腕の動きと同期した残像エフェクトが観察できる手法を提案した．次章では，本提案手法に基づき実装し，運動感覚を変化させる可能性を検証するための実験を述べる．

第 4 章

実　装　と　検　証

本章はゲームやアクションムービーでよく使用されている視覚効果を取り上げ，運動感覚を変化させる手法について検討し，実装する．

4.1. システム構成

本論文では，身体動作に残像を付与することで，実際の動作よりも速く感じさせるという目標を実現させる．ユーザが自分の腕を観察ながら腕の移動に伴って付加した残像エフェクトを提示するために，ユーザは See-through HMD を装着させ，目の前で腕の動きを観察する．その際，モーションキャプチャによって腕の動きと位置を取得し，腕の軌跡に合わせて CG で作成した残像を表示する．

See-through HMD の構造は図 4.1 で示す．HoloLens は視野角がやや狭く，ゲームへの没入感を損なわる問題があるため，没入型ヘッドマウントディスプレイとステレオカメラの組み合わせで，没入感の高い広い視野角を作った．See-through HMD には Oculus Rift DK2 とそれにマウントできる軽量なステレオカメラ，OVR Vision を使用する．自然に動きが早くなってきた感覚をユーザに提供するため，腕の動きと伴って現れる残像エフェクトはユーザの実在の腕と完全一致な見た目と動きを提示することが必要となる．ユーザのジェスチャーと行動を 3D モデリングに反映できる高精度なモーションキャプチャ, Leap Motion を使用する．システム全体の外観イメージを図 4.2 に示す．

図 4.1 see-through HMD の仕組み

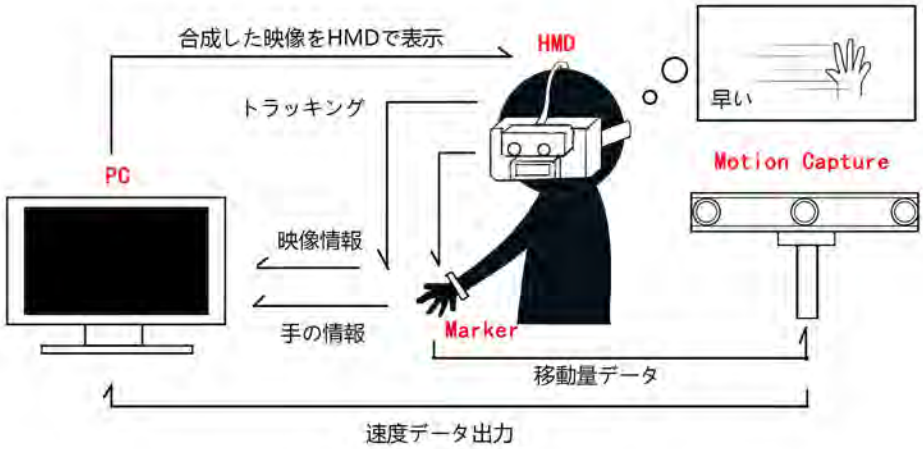


図 4.2　see-through HMD の画面投射

また，実験データをとしてユーザの腕の位置を取得するためのモーションキャプチャには OptiTrack Trio を使用し，OptiTrack Trio のマーカはユーザの手首へ装着した．リアルタイムで残像を表示するためのソフトウェアは Unity で作成した．

4.2. 動作速度知覚を変化させるための視覚効果

ゲームと映画の制作において，シーンやアクションの演出効果を向上するために，流体，ライト，パーティクル，モーションエフェクトなどといったような様々なビジュアルエフェクトが使われ，シーンでの用途もそれぞれ異なる．本研究で移動の速度と軌跡を表現する残像効果に着目した．現実世界で普段の生活を過ごしながらも，ゲーム世界で登場する俊敏なキャラクターの特殊な身体を持つような感覚を実現するために，残像エフェクト表現と身体動作へのマッチング手法について述べる．

このシステムは，腕を前に伸ばすと，ヘッドマウントディスプレイの表面につけた Leap motion が手を検出する．腕を動かす際に生じる残像は，フィルムに刻んだように，移動の軌跡に沿ってたくさんの映像が残り，また時間の過ぎるとともにだんだん薄くなり，一定の時間を経つと順番に消えるイメージを想定した．

残像効果は Unity エンジンの 3D モデルのモーションにより表示する．Unity エンジン対応の Leap motion core assets での hand module に基づき，手の形と近い RiggedSaltCutHands を 3D モデルとして使用する．複合現実環境を作るため，Unity 内のバーチャル空間座標と現実空間座標を同時に利用する．ここでは Leap Motion センサーと Ovr Vision Pro Camera の位置を丁寧に調整することが必要となり，3D モデルの手(残像)を実在の手とマッチングし(図 4.3)，大きさも位置もちょうど同じような表示で，同じように動かせる．

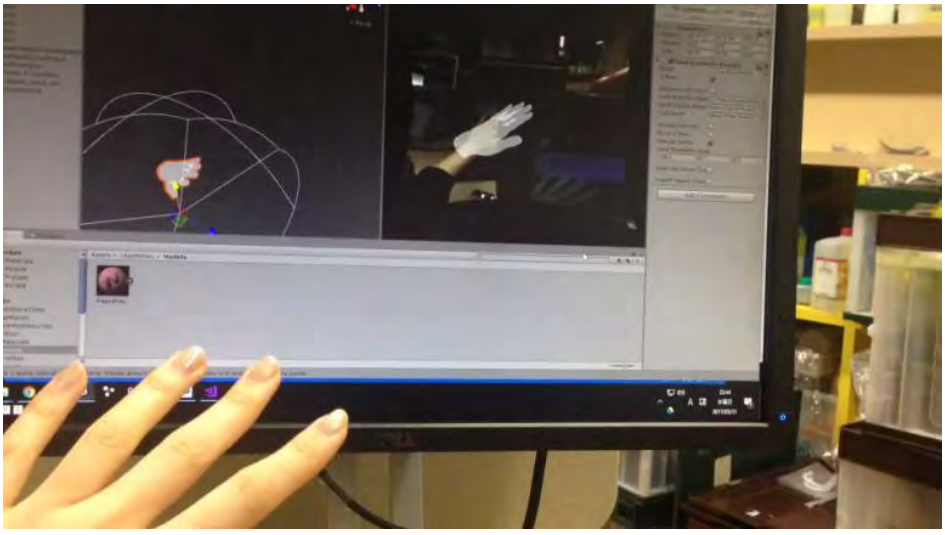


図 4.3 手と 3D モデルのマッチング調整

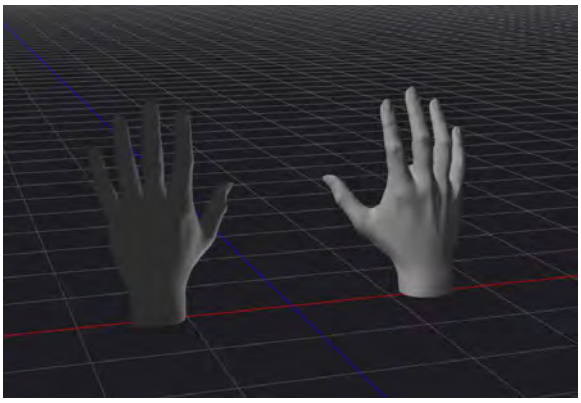


図 4.4 使用する 3D モデル

図 4.5　手のテクスチャ

腕が止まる状態では何も現れず，腕を動かすと，影分身のように現れ，そして速やかに消えるインタラクションを作るため，残像表示は unity スクリプト(C#言語)とシェーダー言語で作成する．自然な残像効果を表現するため，3D モデルの色はやや暗い肌色テクスチャにした(図 4.5)．ディフォルトのパラメーターでは，腕を動かすたびに最大の残像数は 20 個で，明度(アルファ値)がだんだん下がり，1 秒以内に自動的に消滅する．実際に作成した視覚効果は図 4.6 のように腕の動きに応じて残像が表示される．

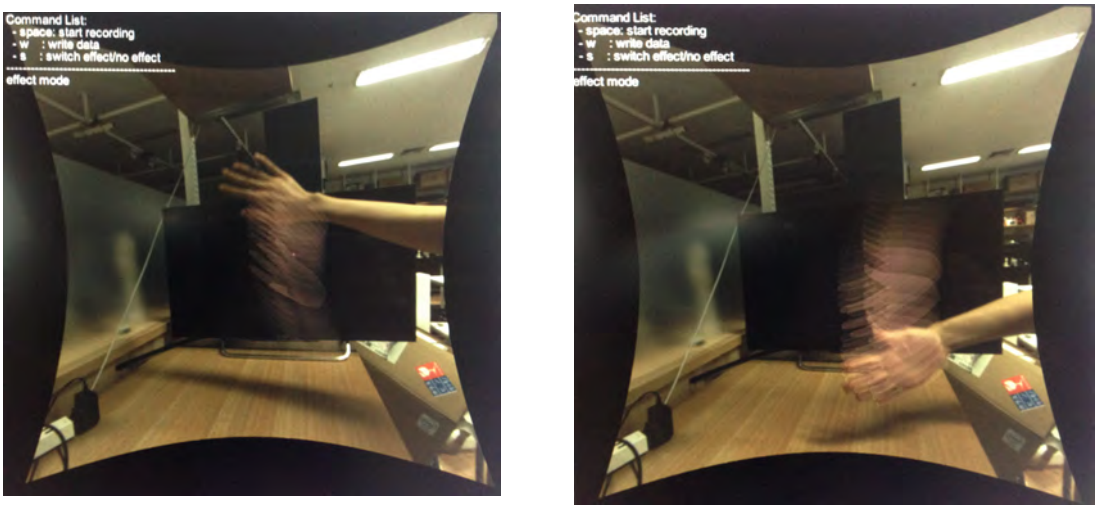


図 4.6 作成したエフェクト

4.3. 検証実験

4.3.1 実験目的

残像効果がフィクションの作品で速度感を表現している．特に，運動後の跡のような長い残像を残したのは「速度が速い」ことの象徴と思われる．現実でこのような現象が自分の身体で起こしたら，自分の動きの速さが変わったと感じられると考えた．行為を行ったのは自分自身である運動主体感をビジュアルエフェクトにより強化する発想について，バーチャルの残像効果を実際に発生している現象をユーザに錯覚させ，主観的な感覚を変調する必要がある．

そこで，この実験ではユーザが残像エフェクトを実在の腕に付加する本システムを使用する際の反応を取得し，評価することを目的とする．MR 環境における残像エフェクトを表示，または表示しないシーンをランダムで 5 回ずつ設置する．被験者がシステムを装着し，腕を動かしている間，モーションキャプチャで被験者の腕の動きを計測し，比較実験を行う．

4.3.2 運動速度感覚を変調する効果の検証

検証したい視覚効果の比較実験は下記の２つのタスクとなっている．

一つ目は残像エフェクトの有無によりユーザーの身体感覚への影響を検証するため，実際の手とインタラクションできるような擬似的な残像を作する(図 4.7).

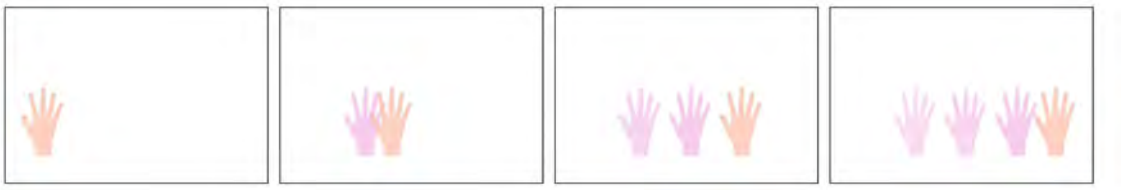


図 4.7 残像効果の有無により身体感覚への影響の検証

二つ目はエフェクトの量(Amount)と移動方向(Direction)の変化によりユーザー身体感覚への影響を検証するため，シンプルなパーティクルによりエフェクトを作成した．エフェクトの量をなし(0 個/1s)，小(30 個/1s)，中(60 個/1s)，大

(90 個/1s)の四つのパラメーターを設定し，移動方向は Y 軸により上昇，止まる，沈むの 3 つのパラメーターを設定した(図 4.8).

図 4.8 エフェクトの量と移動方向の影響検証

実験を行う際の実験環境は(図 4.9)の通りである．まず，被験者は図このような環境に座り，顎を台にのせ，頭を固定し実装したシステムを装着する(図 4.10).

図 4.9 実験環境

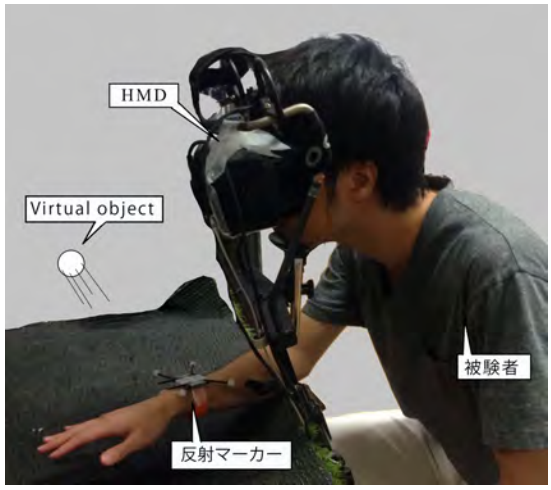


図 4.10 被験者が本システムを装着する

タスク A の実験条件は 2 条件で，バーチャルオブジェクトが消えた後ユーザが腕を動かす際に腕の残像が表示される状態と表示されない状態である．タスク B の実験条件は 2 条件で，ユーザが腕を動かす際にエフェクトの量と移動方向のバリエーション変化である．

4.11 の実験手順に示すように，図実験を開始すると，画面にバーチャルオブ

ジェクトが現れ，左から右，右から左へ片道 25[cm]程度の距離を 2 回往復する．ユーザはそれを 1 回往復目は観察し，2 回往復目には自分の腕をバーチャルオブジェクトと同じ速度で同じ位置まで動かしてその速度を記憶してもらう．バーチャルオブジェクトは 2 回往復した後，画面から消える．その後ユーザは先ほどのバーチャルオブジェクトと同じ速度，同じ位置まで自分の腕を動かす．実験はバーチャルオブジェクトが現れたことろから，バーチャルオブジェクトが消えてユーザが自分で腕を動かすところまでを 1 セットとする．

最後のステップでは，タスク問わず各パラメーターをランダム順で 5 回ずつ設置する．また，腕を動かしている際に腕とは関係のない場所を見ていると残像の影響を正確に計測できないため，自分の腕を注視するように事前に指示を与える．被験者が腕を動かしている間，モーションキャプチャで被験者の腕の動きを計測する．

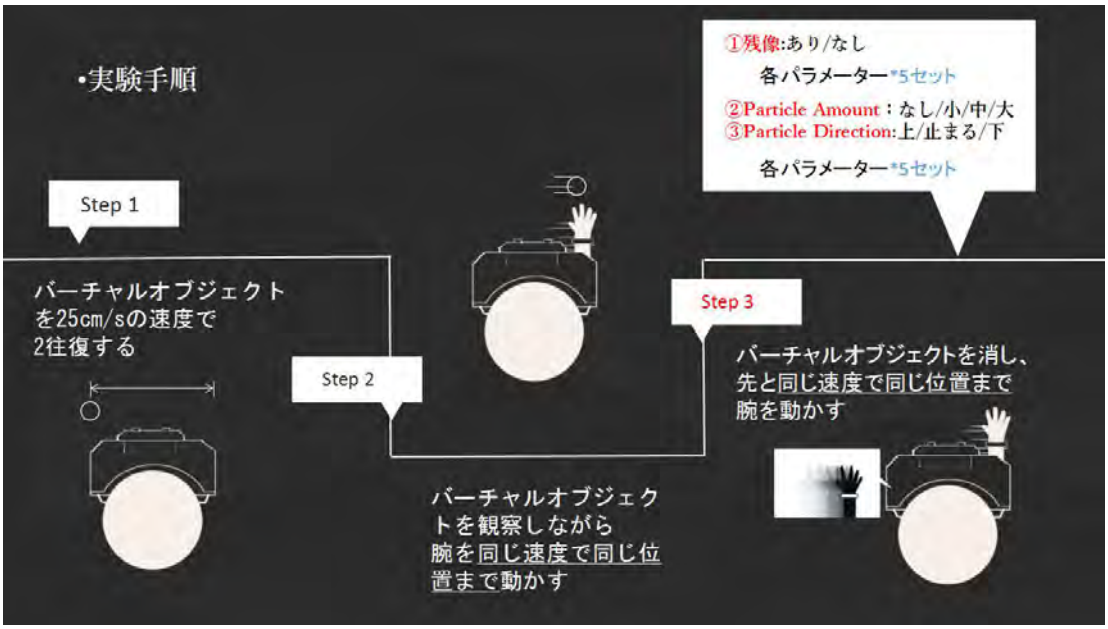


図 4.11 実験手順

4.3.3 実験結果

実験中の被験者の腕の移動量から移動速度を求めた．タスク A の各試行の平均移動速度を実験条件ごとにまとめたものを図 4.12 に示す．残像がない場合の速度平均は 0.304[m/s]， 残像がある場合の速度平均は 0.269[m/s]となった．タスク B の平均移動速度を実験条件ごとにまとめ，エフェクトの量を変化させる場合の速度変化を図 4.13 で示し，エフェクトの方向を変化させる場合の速度変化を図 4.14 で示す．

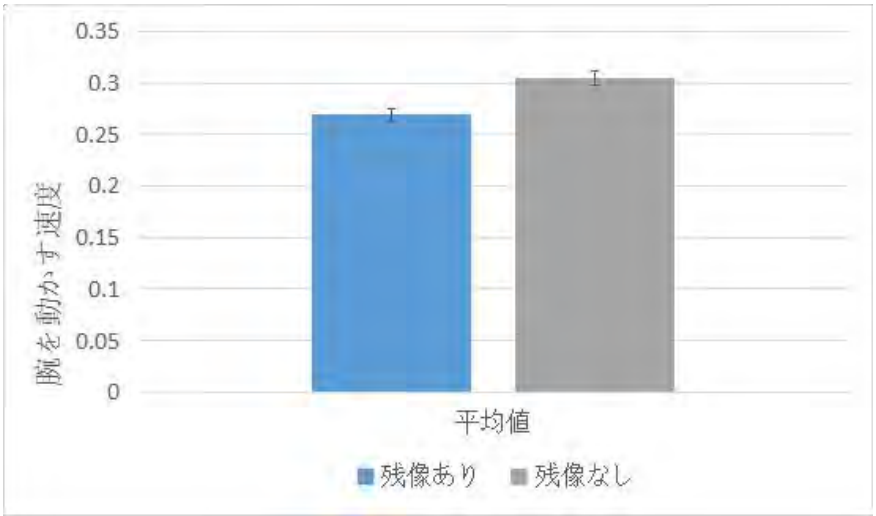


図 4.12 各タスクの平均速度

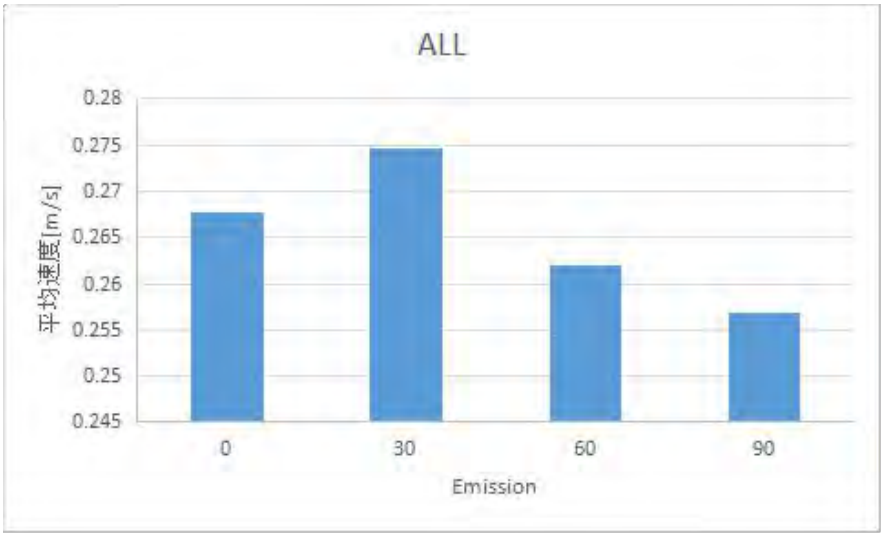


図 4.13 エフェクトの量と平均速度

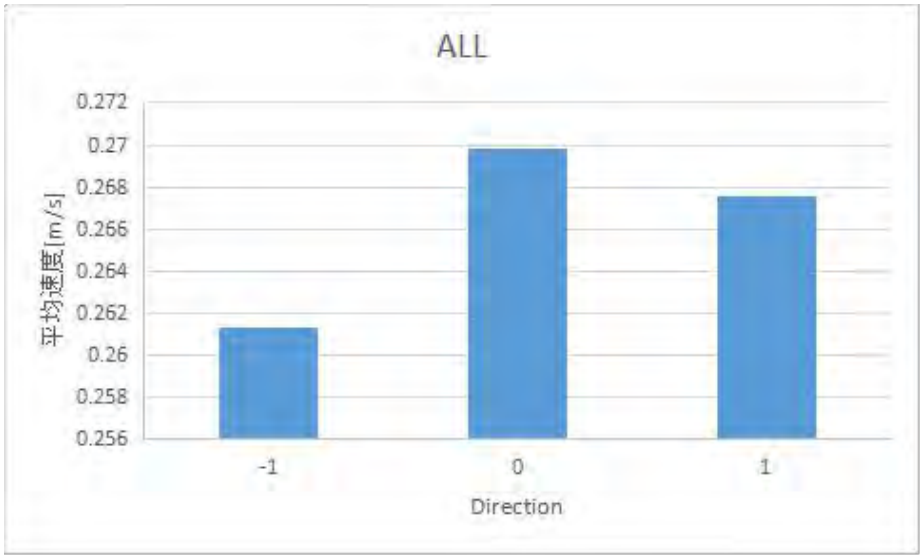


図 4.14 エフェクトの方向と移動速度

実験結果より，残像あり条件の方が残像なし条件よりも被験者の腕を動かす速度が遅くなる傾向が見られた．また，パーティクルの量が多くなると伴って，腕の移動速度が下がる傾向がみられ，パーティクルの移動方向によって腕の速度変化してないという結果がわかった．

4.3.4 考察

これは残像表示によって，物理的にはゆっくりとした動きでも被験者の身体動作速度知覚としては素早く動いていると認識している身体動作速度錯誤効果の可能性を示唆している．シンプルなパーティクルエフェクトが身体感覚に対する影響は，パーティクルの量に影響される．ユーザの物理的な身体動作は変更させずに，視覚的なエフェクトの入力によってユーザの身体動作に対する知覚への影響をもたらした．

4.4. ユーザビリティテスト

本節は，システムを来客に展示する際，提案システムの使いやすさと効果に

ついて，利用者の観点からの情報をまとめる．また，複合現実環境における擬似的な触覚で特殊な身体能力を持つゲームのキャラクターになりきるという目標を実現するため，フィクション作品でよく登場する魔法のエフェクトのコンテンツもユーザに体験させる．残像エフェクトとファンタジー系のエフェクトが没入感への効果をユーザのフィードバックで，効果の有り無しを比較する．

4.4.1 体験者の反応による評価

2017 年 9 月徳島で開催された日本バーチャルリアリティ学会大会で残像エフェクトのデモ展示を行った．研究者と大学生を中心とした多数の来場者に体験してもらった．格闘ゲームの主人公のような素早く動ける身体を持つような残像エフェクト体験をテーマとし，展示では，体験者に本 See-through HMD を装着させる上，腕を前に伸ばし，自由に動かすよう指示した．

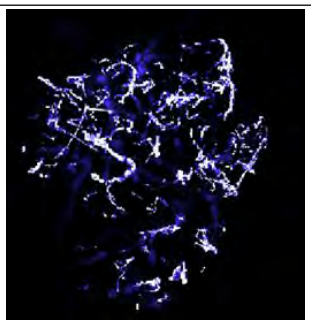
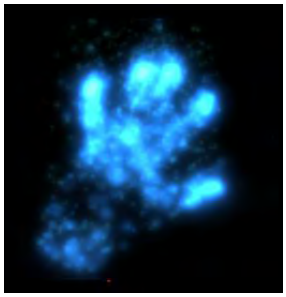
全体に対して，ほとんどの体験者が「運動の感覚は変わった」「力が感じる」などの感想をいただいた．多くの体験者が，素早く腕を振ってないのにも関わらず，腕の動作が早くなったことと，運動が軽快になったといったような感想が報告された．また，残像エフェクトを利用した運動感覚の変調手法には，腕の移動速度が変化しただけじゃなく，移動後に残った弓形の影により，自分の動きの軌跡が変化したような感じがするというコメントから，本提案手法により斬新な感覚を生み出す可能性が評価された．

4.4.2 バリエーションを変化させた場合の評価

前項での評価結果から，残像エフェクトが実在の身体動作に付加することにより，腕の動きが早く見えて，素早い格闘家キャラクターになったような主観的な感覚の変化を示した．実際にアニメやゲーム，漫画などで使用されているエフェクトは数多く存在しており，また速度感を表現するもの以外も多くのものが存在している．例えば，「ファンタジー系キャラクター」を対象キャラクターにした場合，視覚上で身体の「加速」ではなく，「変異」を感じさせるには，違うコンテンツが必要だと考える．システムを変わらない状態で，ほかのビジュアルエフェクトを身体に付与する場合，キャラクターへの一体感はどうなるかについて，違う視覚効果を提示することにより検証を行い，エフェクト

のバリエーションを色々検討する．Unity エンジンのパーティクルシステムにより三つのパターンのファンタジー能力を作成した. 作成したエフェクトは表 2 で示す.

表 2：ファンタジーエフェクトの実装

	炎の魔法使い	ロボット	精霊
特徴	手が熱そうな溶岩になる感覚	壊れかけた機械になる感覚	水色で漂うエネルギで軽い身体を持たせる
エフェクト	*図 4.15 焔*	 *図 4.16 電気*	 *図 4.17 エネルギ*

これらを 2017 年 11 月，慶應義塾大学日吉キャンパスで開催されたオープンキャンパス「KMD Forum」で二日間展示を行った．子連れの家族を始め，学生，研究者，イベント関連者など大勢な来場者に体験してもらった．展示する内容は，魔法使いの能力(炎，エネルギ，電気属性エフェクト)と格闘家の能力(残像エフェクト)の合計 4 つのパターン，ボタンによりコンテンツを切り替えることができる．デモンストレーションの様子は(図 4.18)に示す.

図 4.18 KMD Forum での展示台

残像エフェクトに対して，「自分の手が早くなってきた」「爽快感がすごい」という報告が多かった．来場者のなか子供が多数，残像エフェクトを見る状態でパンチするのが一番興味を示した．男性の体験者が本システムを使いながら，演技用のナイフを上手に遊んだ(図 4.19)．「普段の演出より強い迫力が出た」というフィードバックをいただいた．魔法使い能力のコンテンツ(図 4.20)を体験した来場者から，「エフェクトが面白い」「妙な感じ」「動く際に漂うパーティクルのシミュレーションが心地よくてたまらない」といったような評価をいただいた．

図 4.19 KMD Forum での展示様子

図 4.20 精霊のエネルギ演出

結果として，違う年齢層，もしくはゲームをプレイする経験により，エフェクトに対する感じ方が異なっている．フィクションの作品に基づいた魔法エフェクトより，物理現象に基づいた残像エフェクトでは，身体感覚に対する影響が一番大きかった．

4.5. 総合考察

ここまでは，体験者の報告から，身体動作と伴った視覚効果は運動感覚に影響を及ぼすことを示唆した．「動きが速く見えた」という体験者から多く報告されたコメントについて，人間が自身の運動の幅に対する認識は，身体動作の出力と身体部位の見た目の変化という二つの点から多く影響されている．ユーザが出力の動きは変わりがないが，残像効果で見た目の移動量を変化させ，速度が速くなってきたと錯覚させた．日常経験から残像効果は高速で移動しているものの特徴だとみられ，この特徴を利用し，実際の運動のに付加することで，より強い速度感を生み出せると考える．また，三種類の魔法の視覚効果を使う展示では，腕の移動により飛び出したパーティクルの方向が同じ場合，パーティクルの見た目が軽い「エネルギ」に対する「心地よい」という体験者からのコメントが一番多かった運動する際で生じた風力で吹き落とした砂のような表現は現実には滅多にいないが，この視覚効果を身体動作に付加することで運動で得られた感覚を変化した．

どのような視覚効果を使い運動感覚の変化を生じやすいの検討については，体験者と対象キャラクターの間の異なる身体感覚を埋めるため，ヘッドマウントディスプレイで提示する映像は自分で出力した動作だと認める運動主体感と関連していると考える．その為，本研究では格闘ゲームの素早い動作に着目し，体験者の動作と伴った残像効果を複合現実環境で提示した．対象の身体感覚と合う視覚効果を提供することは錯覚の生起にとって大切な要因だと考える．

キャラクターとの一体感の達成の検証考察について，従来の研究では触覚デバイスを使う手法が多いが，複合現実環境で運動のイメージを変化することで，日常の行為を妨げなく自由自在に運動できるというメリットがあり，触覚デバイスとの組み合せにより一体感を一層向上させることが可能である．身体動作を反映する視覚効果を実装した MR ゲームとアプリケーションでは，日常で新しい体験を提供できる．

第 5 章

結　論

本論文は，視覚刺激のみで身体運動知覚を変化させるため複合現実環境における身体動作に視覚効果の付加に着目し，自分と異なる身体能力を持つキャラクターとの感じ方の違いを埋めるという課題に対し，運動感覚をどいうふうに変化させるの課題に対して，身体の一部の動作速度知覚を変化させるシステムを提案し，プロトタイプを実装し実験を行った．エフェクトを表示するか表示しないの比較について実験を行った結果，ユーザの腕を動かす速度は身体動作と共に表示される残像を使った手法は効果があったと証明した．

第 1 章では，ユーザがゲーム世界とのインタラクションではテクノロジの発展に伴って変化していく．コントローラーを中心とした操作方法と体感を取り込んだ直観的な操作を述べた．また，バーチャルリアリティ技術の普及により，高い没入感のエンターテイメントへの期待や，未来のゲームデバイスに向かってインタラクションの方式を論じる．従来のゲーム体験では，キャラクターとの一体感をまだ完全に達成していないという問題点を指摘した．視覚効果の付与によってユーザの身体感覚を変化させるという本研究の目的を示した．

第 2 章では，第 1 章で述べたユーザの身体感覚を変化させ，アバタとの一体感をもたらす研究目的に対し，今まで取り組まれている関連研究について述べる．MR 技術のディスプレイの進化と複合現実感を利用したコンテンツデザインから，自己動作の錯覚をもたらすために，バーチャル身体との運動主体感を喚起する方法，そして視覚，触覚，聴覚の三つの面から外界の刺激で違う身体感覚を生み出す方法を紹介する．これらの流れで関連研究を述べた後，本研究は MR 技術により視覚と触力覚で生じた錯覚を利用し，身体運動感覚を変化する可能性を示す．

第 3 章では，ゲームのキャラクターの身体感覚をユーザに感じさせる研究のコンセプトを述べた．まず，コンセプトを実現するための要件を分析し，複合現実環境における視覚効果を使用する提案の必要性を述べた．続いて see-through ヘッドマウントディスプレイを使い, 実際の身体像に視覚効果を付加し，ユーザの運動感覚を変調させる提案手法を述べた．システムの設計に踏

まえて，視覚へ大きく影響する視覚効果のデザインを行った．

第 4 章では, まず, 第 3 章で述べた設計に基づいて, 実装を行った. See-through ヘッドマウントディスプレイの構造と使うデバイスを説明し，さらにソフトウェア面から unity により視覚効果の制作方法を述べた．そして，本システムによりユーザの運動感覚を変調できることを検証するため，視覚効果を使用しない場合と使用する場合を対比する検証実験を行った．結果として，本システムにより運動感覚を錯覚できることを示した．その上，対象キャラクターの属性により残像エフェクト以外の視覚効果を作成し，実験で作成したシステムへ実装し，ユーザテストを行った．異なる種類の視覚効果を体験したユーザからのフィードバックから，視覚効果の特徴と違う結果を得られた原因を調べた．

以上の知見を踏まえて，本研究では，MR ゲームにおけるキャラクタへの没入感を高めることを目指し，クロスモダリティを利用して身体の一部の動作速度知覚を変化させることを目指す．これにより，ユーザは素早く身体を動かしたつもりでも物理的にはゆっくりと動いているため，動きの早いキャラクタに対する没入感が向上すると考える．また，怪我などによって身体を素早く動かしてはいけない人が利用すると，自然と身体をゆっくりと動かすようになり，症状悪化の防止に繋がると考える．本手法はゲームや映画などのエンターテイメントシや医療への応用を期待する．

謝　辞

まず初めに，本研究を行うにあたって，ご指導賜りました，慶應義塾大学メディアデザイン研究科南澤孝太准教授，同研究科杉浦一徳准教授，古川享教授，稲蔭雅彦教授，石戸奈々子准教授，チャリス・フェルナンド特任講師に感謝します．

南澤先生には本論文の主査をしていただいたことに加え，日頃より研究の進捗と研究の方向性など様々なことでお世話になりました．杉浦准教授には本論文の副査を務めていただいたことに加え，日々研究で悩む自分に対し，的確なアドバイスを頂きました．古川教授にも本論文の副査を勤めていただいた上に，公聴会に際しての発表の校正などの指導を賜りました．改めて御三方に感謝申し上げます．

次に，メンターとして自身の研究を支えてくださった博士課程に所属する黒木さんに感謝を申し上げます．黒木さんには，自身の研究を進める上で，論文の具体的な添削や校正などはもちろんのこと，実験の環境構築や評価の仕方などに至るまで指導をしていただきました．黒木さんがご多忙にも関わらず，自身の論文にとことん付き合っていただいたことを心より感謝申し上げます．次に，博士課程に所属するヤーメンさんが実験用機器を貸していただき，アドバイスをいただきました．同研究科博士課程の花光さん，早川さん，柴崎さん，研究員の Ben さん,神山さんにもアイディアの交換やに技術面などでお世話になりました．感謝いたします．この論文の評価をとる上で，実験に協力していただきましたヒョウさん，後藤さん，平野さん，冨安さん，山内さん，高橋さん，土屋さん，村田さん，濱辺さんに感謝いたします．研究室を通じた院生生活の中で多くの示唆を与えてくれた先輩，佐々木さん，Ivy さん，柳原さん，それ以外にも KMD Embodied Media Project の皆様に感謝いたします．皆様がご協力くださったおかげで本研究を遂行することができました．次に，慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の同期である皆さんには学校の日常の中でお互いを励まし合い，切磋琢磨し合いました．感謝いたします．

最後に，私の学業と生活を支えてくれた家族，多くの友人に感謝し，謝辞と致します．

参 考 文 献

［1］Matthieu Fradet，Caroline Baillard，and Anthony Laurent．MR TV Mozaik:A New Mixed Reality Interactive TV Experience．2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct Proceedings.

［2］Ueda, Y., et al. “HaptoMIRAGE: Mid-air Autostereoscopic Display for Seamless Interaction with Mixed Reality Environment”, ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, Vancouver(2014.8).

［3］Kyna McIntosh，John Mars，James Krahe，and Jim McCann.Magic Bench － A Multi-User & Multi-Sensory AR/MR Platform.SIGGRAPH ’17 VR Village, July 30 - August 03, 2017, Los Angeles, CA, USA.

［4］Yoichi Ochiai, Kota Kumagai, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki: Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields, Proc. ACM SIGGRAPH 2015, Talks, accepted, Los Angeles, California (USA), 9-13 Aug., 2015.

［5］Botovinick and J. Cohen: Rubber Hands ‘Feel’ Touch that Eyes See, Nature, 391, 756 (1998).

［6］Shunichi Kasahara，Keina Konno，and Richi Owaki．Malleable Embodiment: Changing Sense of Embodiment by Spatial-Temporal Deformation of Virtual Human Body. CHI 2017, May 6-11, 2017, Denver, CO, USA.

［7］教育機器編集委員会．産業教育機器システム便覧．日科技連出版社，1972.

［8］Warren, W., Jr.: Self-motion: Visual Perception and Visual Control (Epstein, W. and Rogers, S. (Ed), Perception of Space and Motion, 1995), pp263-325

［9］岡野裕,雑賀慶彦，橋本悠希，野嶋琢也．梶本裕之."速度感覚増強のための周辺視野への刺激提示手法の検討." 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピューターインタラクション(HCI) 2008.11(2008-HCI-127) (2008): 145-150.

［10］A. Goodale & David Milner (January 1992). “Separate pathways for perception and action”. Trends in Neuroscience 15 (1): 20-25.

［11］Lecuyer, Anatole, et al. "Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?." Virtual Reality, 2000. Proceedings. IEEE.IEEE,2000.

［12］Keita Watanabe, Michiaki Yasumura. VisualHaptics: Generating Haptic Sensation Using Only Visual Cues, ACE2008, Proceedings of the International Conference on ACE2008, pp405, December 2008.

［13］鳴海拓志, et al. "拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援(< 特集> 3 次元インタラクション)." 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 17.4 (2012): 333-342.

［14］木村朝子, 杣田明弘, 面迫宏樹, 柴田史久, 田村秀行. Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象(特集:複合現実感 5). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌．日本バ-チャルリアリティ学会. (2011) vol.16, no.2, p.261-269.

［15］鳴海拓志，伴祐樹，梶波崇，谷川智洋，廣瀬通孝：拡張満腹感：拡張現実を利用した食品の見た目の操作による満腹感のコントロール，インタラクション 2012(2012).

［16］Kurihara, Yosuke, et al. "Augmentation of kinesthetic sensation by

adding rotary switch feeling feedback."Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference. ACM, 2012.

［17］栗原洋輔，蜂須拓，佐藤未知，福嶋政期，KUCHENBECKER Katherine J，梶本裕之．Reality-Based な周期的衝撃感呈示による身体材質感の変調．ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要
集,2013 "2A2-G03(1)"-"2A2-G03(4)" 2013 年 5 月.

［18］Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch,Providing Haptics to Walls & Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation,Full paper at CHI'17, p1471-1482 & demo at SIGGRAPH'17

［19］Y.Sankai, ”HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernics”, Robotics Research, The 13th International Symposium ISRR, pp.25-34, 2010.

［20］北川智利. 聴くことと身体を感じることのかかわり. NTT 技術ジャーナル 2013.9.