

令和3年度修士論文

四肢から独立した翼で 羽ばたいて飛ぶ感覚の提示

Presenting the sensation of flying with flapping
virtual wings independent of the limbs

指導教員印	提出印

指導教員 水内 郁夫 教授

東京農工大学
工学府 機械システム工学専攻

令和2年度入学
20643010
遠藤 健

目 次

第1章 序論	7
1.1 本研究での羽ばたいて飛ぶ感覚の定義	9
1.2 研究の背景と目的	10
1.3 本論文の構成	11
第2章 身体像の拡張	13
2.1 はじめに	15
2.2 身体像	15
2.3 身体像拡張	16
2.3.1 ラバーハンド錯覚	17
2.3.2 道具の身体化	17
2.4 身体像拡張のアプローチ	17
2.5 おわりに	18
第3章 四肢から独立した翼の提示方法	19
3.1 はじめに	21
3.2 身体像拡張を行う方法	21
3.3 ヒトから仮想翼への情報伝達	21
3.3.1 筋電の計測	22
3.4 仮想翼からヒトへの情報伝達	22
3.4.1 視覚の提示	23
3.4.2 觸覚の提示	24
3.5 おわりに	24
第4章 提案手法を用いた身体像拡張の主観評価実験	25
4.1 はじめに	27
4.2 主観評価実験を行う実験環境	27
4.3 操作・提示方法の検討	29
4.3.1 翼の操作方法の比較	31
4.3.2 觸覚提示方法の比較	33
4.3.3 視覚提示方法の比較	34

4.4 操作・提示位置の検討	34
4.4.1 操作位置の検討	36
4.4.2 提示位置の検討	36
4.5 おわりに	36
第 5 章 位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験	37
5.1 はじめに	39
5.2 実験の目的	39
5.3 人研究倫理審査	39
5.4 被験者実験を行う実験環境	39
5.5 実験方法	43
5.6 実験結果と考察	45
5.7 おわりに	48
第 6 章 結論および今後の展望	49
6.1 結論	51
6.2 今後の展望	51
参考文献	52

第1章

序論



Fig. 1.1: Flying with flapping virtual wings independent of the limbs

ヒトは古くから空を飛ぶことに憧れを抱いている。これまで私たちは、飛行機やハンググライダーといった乗り物を用いることで飛行体験をしてきた。また、個人飛行装置¹のような、ウェアラブルな装置で空を飛ぶ研究も行われている [1]。しかし、実際に空を飛ぶことは墜落などのリスクや燃料といったコスト、機器を操縦するための技術が必要となる。VR (Virtual Reality: 仮想現実) システムを使用することで、それらリスクやコストを回避し、乗り物・ウェアラブルな装置を問わず簡単に飛行体験が可能となる。

図 1.1 は、四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ様子を示した図である。本研究では、VR システムを用いて図 1.1 のように、ヒトの背中から翼が生えた生物になり羽ばたいて飛ぶ感覚の提示手法を提案する。

1.1 本研究での羽ばたいて飛ぶ感覚の定義

本論文では「浮遊感」「飛ぶ感覚」「羽ばたいて飛ぶ感覚」を図 1.2 のように位置付ける。

¹Portable Personal Airmobility System... ジェットパック、動力式ウイングスーツ、動力式パラフォイル(風により展開される柔軟構造を持つ翼。Ex. パラグライダーの翼)

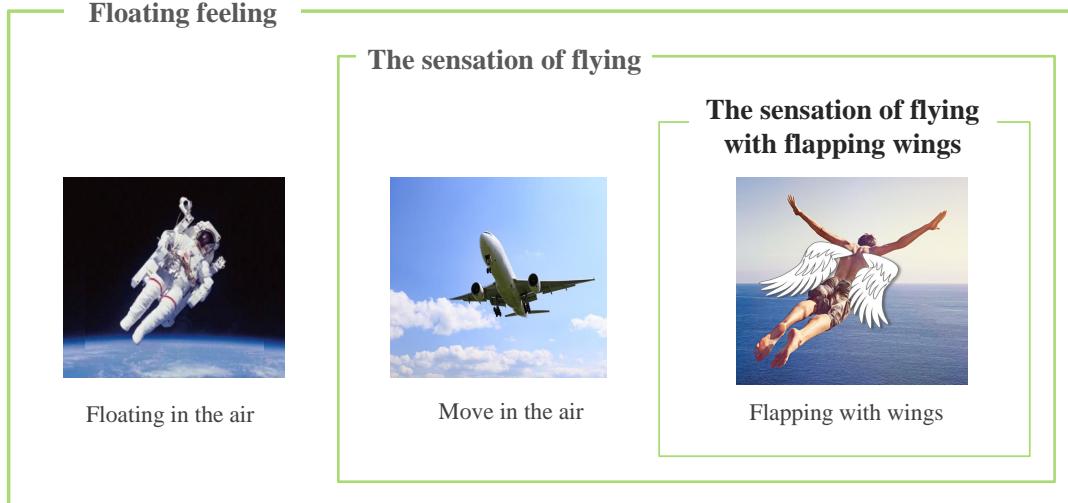


Fig. 1.2: Classification of floating feeling

- 「浮遊感」
... 空中に浮いて漂っている感覚 .
- 「飛ぶ感覚」
... 「浮遊感」に，空中を移動する感覚を追加した感覚 .
- 「羽ばたいて飛ぶ感覚」
... 「飛ぶ感覚」に，翼を羽ばたかせる感覚を追加した感覚 .

1.2 研究の背景と目的

VR 装置を用いた「浮遊感」や「飛ぶ感覚」を与える研究は多く行われてきた。視覚刺激によって発生する落下感覚に関する研究 [2] や身体帮助メカニズムを用いた飛行体験装置の提案 [3] 等がある。また、飛行しているドローンを上半身のジェスチャーで制御し、ドローンからの映像を HMD (Head Mounted Display: ヘッドマウントディスプレイ) によって与えることで飛ぶ感覚を提示する研究 [4] もある。



Fig. 1.3: System of presenting the sensation of flying with flapping wings[5]

「羽ばたいて飛ぶ感覚」を与える研究について、図 1.3 のような操縦装置に搭乗し、飛行中の鳥の体験をすることができる装置の研究が行われている [5][6]。上記装置は、操縦装置にうつ伏せで搭乗し手と腕を用いて翼を動かしながら、鳥視点での景色の映像を提示することで、飛行中の鳥のような体験できる装置である。この方法の場合、大がかりな装置が必要であることや、手足の動きが制限されるといったデメリットが存在する。また、羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究はまだ知見が少なく、鳥になり飛ぶ感覚を与える研究が大半であり、トビトカゲのような四肢から独立した翼を持つ生物になり、飛ぶ感覚を与える研究は未だ着目されていない。

本研究では、四肢の動きを用いずに背中から生えた翼を操作し羽ばたく感覚を提示する手法を提案する。四肢の動きを用いないことで、VR 飛行体験中に手足を用いた動作、例えば飛びながら物を投げるといった行為、が可能となり VR 飛行体験の幅が広がることが期待できる。

1.3 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成される。以下に各章の概要を述べる。

- 第1章「序論」では、羽ばたいて飛ぶ感覚の定義、本研究の背景と目的について述べた。

- 第2章「身体像の拡張」では、身体像について説明し、身体像の拡張の仕組みと方法について示し、本研究での身体像拡張のアプローチについて述べる。
- 第3章「四肢から独立した翼の提示方法」では、四肢から独立した翼の提示方法について述べる。
- 第4章「提案手法を用いた身体像拡張の主観評価実験」では、提案した身体像拡張の手法を用いて主観評価実験を行う。操作・提示方法の検討、操作・提示位置の検討を行い、それぞれの組み合わせの評価を下す。主観評価実験の結果を踏まえ、被験者実験で比較する対象について述べる。
- 第5章「主観評価実験を踏まえた位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験」では、主観評価実験を踏まえた位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験を行う。筋電計測位置と羽ばたく感覚の提示位置を変化させた場合の、羽ばたいて飛ぶ感覚の感じ方の違い、触覚提示として振動と電気刺激を用いた装置を比較し検証を行う。
- 第6章「結論および今後の展望」では、本研究の結論と今後の展望について述べる。

第2章

身体像の拡張

2.1 はじめに

本研究において以下の要素が重要となる。

- ヒトが本来所有しない「翼」を感じさせる（所有）
- その翼で「羽ばたいて飛ぶ感覚」を提示する（運動）

上記の感覚を与えるために、身体像の拡張について注目する。本章では、身体像について説明し、身体像の拡張の仕組みと方法について述べる。

2.2 身体像

ヒトは身体像（Body image）[7]と呼ばれる、自身の身体形状を知覚する能力を有している。それにより自己とそれ以外を区別することができる。

身体像の基盤となる概念に身体図式（Body schema）がある。身体像が意識された身体の形状情報に対し、身体図式は習慣としての身体の表像、つまり無意識下に身体運動を調整している経験であり顕在的な知識があるとは限らない。身体像は身体図式を基盤として構成される顕在的な自己身体に関する知識を指す[8]。

身体像や身体図式は、幻肢痛[9]の観察により生じた概念である。幻肢痛とは、事故で存在しないはずの失った手や脚に痛みを感じる症状である。幻肢痛が発症する仕組みのとして、脳における各機能の分布（脳内地図[10]）が書き変わり、幻肢を自分の意思で動かせないことが原因として挙げられる。

また、身体像と密接に関係する概念に自己がある。認知科学では、自己は永続的に存在する自己（Narrative self）と一時的な自己（Minimal self）から構成されていると考えられている[11]。Narrative selfは、過去過去の記憶から未来の展望まで含めたアイデンティティとしての自己、一方、Minimal selfは一時的な自己、つまり経験から即時的に形成される身体的な自己である。Minimal selfは、さらに自己所有感（または身体所有感）（Sense of self-ownership）と自己主体感（または行為主体感）（Sense of self-agency）に分類ができる。自己所有感は、自分の身体部位が自分自身の身体の一部に属していると感じる感覚や経験である[12]。自己主体感は、自分自身である行為を行っている、その身体部位制御しているのは自分であるという感覚や経験である[13]。



Fig. 2.1: Body image expansion

身体像の形成において、自己所有感・自己主体感は密接に関係している。従って、仮想翼の身体像を得て飛ぶこと、つまり身体像拡張して動作することで、本研究における以下の要素を満たすことができると考える。

- ヒトが本来所有しない「翼」を感じさせる（自己所有感）
- その翼で「羽ばたいて飛ぶ感覚」を提示する（自己主体感）

2.3 身体像拡張

自己以外の部分に身体像がダイナミックに変化することがある（図 2.1）。このことを身体像の拡張（Body image expansion）と呼ぶ。身体像拡張の例として、手に持った道具（テニスラケットや野球バット）を、その形状を意識せず自分の体の一部であるかのように球を打ち返すといった事が挙げられる [14]。身体像の拡張は、言い換えると感覚の情報処理を神経系から拡張する能力（錯覚）の事である。

身体像拡張は、大きく分類して 2 種類存在し、1 つはラバーハンド錯覚（RHI : Rubber Hand Illusion）[15] のような感覚のリマッピング、もう 1 つは先に挙げた道具使用時に身体像がダイナミックに拡張すること（道具の身体化）である。

2.3.1 ラバーハンド錯覚

ラバーハンド錯覚とは、ラバーハンドをあたかも自分の手のように感じる錯覚である。視界から隠れた本物の手と目の前にあるラバーハンドに絵筆等で2分から20分程度同期した触覚刺激を与え続けると、ラバーハンド上に触覚刺激を知覚するという錯覚現象である。RHI系の身体像拡張の特徴として、元の自分の身体部位と、リマッピングされた部位が共存できないという条件がある。

ラバーハンド錯覚と同様な身体像拡張の例について、視触覚を同期することで、遠隔にあるロボットやアバターへ乗り移ったような感覚を生成する研究がある[16][17][18][19][20]。

2.3.2 道具の身体化

道具の身体化について、道具使用による身体像拡張をニホンザルを用いて神経生理学的に示した研究がある[21]。この研究では、道具使用時のニホンザルの頭頂連合野における手の体性感覚受容やと手近傍の視覚受容野を持つバイモーダルニューロンの活動を観測することにより、サルの身体像が道具先端まで拡張している事を示した。

道具の身体化について、指や腕を追加する例があり、指の本数を増やす研究[22]、余剰筋力を用いて第3の腕となるロボットアームを操作する研究[23][24]や顔面ベクトルを用いて第3の腕を操作する研究[19]、両足を用いて第3・第4の腕を操作する研究が挙げられる[25]。

2.4 身体像拡張のアプローチ

本研究では、身体像拡張の中でも道具への身体像拡張に注目する。

ヒトと自由度やダイナミクスが類似した遠隔ロボットやアバタを、身体動作と完全に同期させることで、RHIのような乗り移ったような感覚の生成や、道具への身体像拡張のように身体の一部として認識可能ということが知られてる¹。

また、ラバーハンド錯覚について、感覚情報（視覚や触覚）の時間的一致の重要性が高いことが示されている[26][27][28]。従って、道具への身体像拡張においても感覚情報の時間的一致が重要となると考えられる。他方で、空間的な情報一致に関しては柔軟だと考えられて

¹身体像拡張の研究において身体像をヒトと異なる構造の対象に投射することや、四肢以外から身体像を拡張させる知見はまだ少ないので現状である。

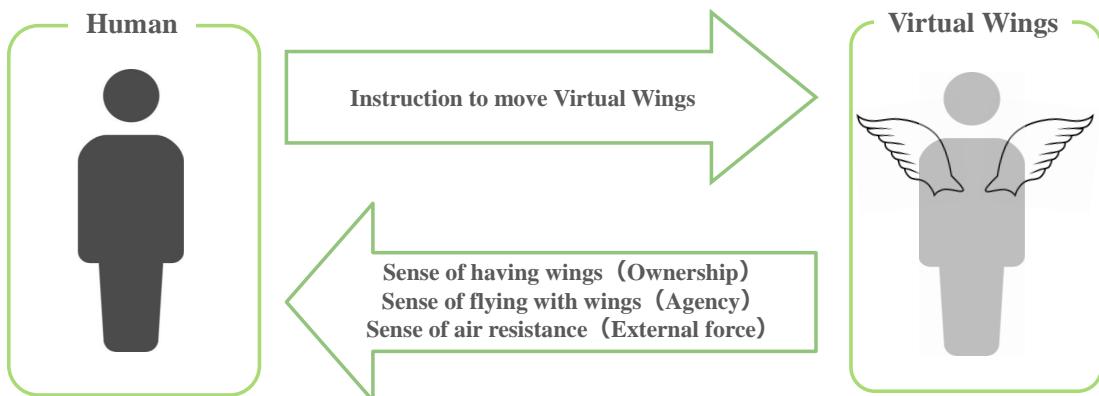


Fig. 2.2: Method of body image expansion

おり、RHI が生じた状態でラバーハンドを叩くと、被験者が自分の手をたたかれたかのような反応を示す例がある [29]。

以上より、複数感覚の統合、提示する感覚情報の時間的一致させることで身体像拡張（道具の身体化）が期待できる。そこで、本研究では図 2.2 のようにして身体像拡張を試みる、ヒトから翼へは、翼を動かす指令を与え、翼からヒトへは、翼が生えている様子・翼を動かして飛んでいる様子・翼へ作用する空気抵抗の感覚を伝え、複数感覚の統合を試みる。上記より、四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ感覚を提示する。

2.5 おわりに

本章では、身体像の概要と身体像拡張の例と方法について述べた。そして身体像の拡張に着目しヒトに本来無い「翼」を感じさせる方法、その翼で羽ばたいて飛ぶ感覚の提示方法について述べた。

第3章

四肢から独立した翼の提示方法

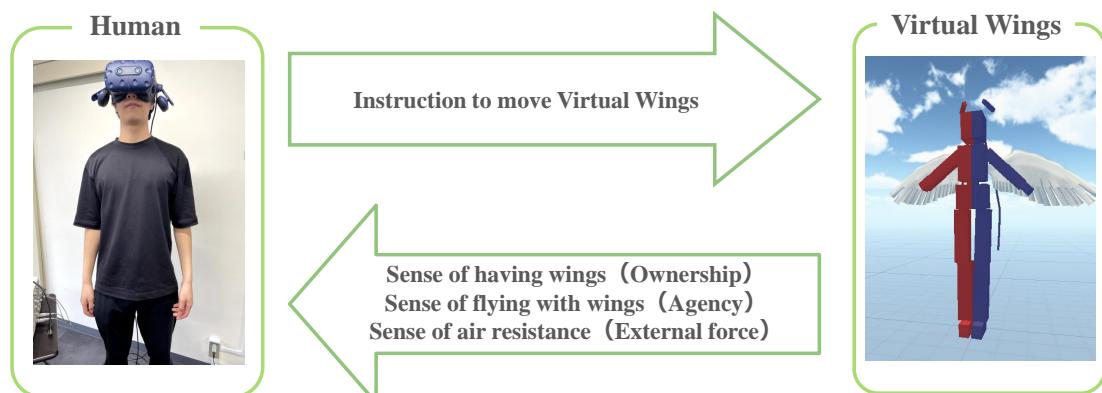


Fig. 3.1: Method of body image expansion

3.1 はじめに

本章では、四肢から独立した翼の提示方法について述べる。前章の身体像の拡張では、身体像についての概要と身体像拡張の原理と方法について述べた。本章では、前章の内容を踏まえた四肢から独立した翼の提示方法を提案する。

3.2 身体像拡張を行う方法

身体像の拡張には情報の双方向性が重要であることを踏まえ、本研究では図3.1のような形で身体像の拡張を行う。ヒトから仮想翼へは、翼を動かす指令を与える。仮想翼からヒトへは、翼が生えている様子（自己所有感）、翼を動かして飛んでいる様子（自己主体感）、翼へ作用する空気抵抗の感覚（外力）を伝える。上記より、四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ感覚を提示する。

3.3 ヒトから仮想翼への情報伝達

まず、ヒトから仮想翼へ翼を動かす指令を与える方法について述べる。

VR空間でのヒトからシステムへの情報提示方法として、コントローラやジェスチャによる操作や、生体信号を用いることが挙げられる。本研究では、四肢以外で翼を操作することを目的としているため、主に手を用いるコントローラや、手足の動きが必要となるジェスチャではなく、四肢の動きが伴わずに計測が可能な生体信号を用いる。また、生体信号の中でも数値の取得が容易な筋電位によって仮想翼を操作する。

3.3.1 筋電の計測

筋電位とは、筋肉が収縮する際に発する微弱な活動電位の事を指す。筋電センサは、筋肉の発する微弱な信号を增幅し計測を行う機器である[30]。筋電センサには、乾式タイプと湿式タイプが存在し、それぞれの以下の特徴を持つ。本章では乾式と湿式どちらも使用する。

- 乾式筋電センサ

- 金属製の電極を皮膚へ接触させて計測を行う
- 電極を交換する必要が無い
- 激しい動きで、電極がズレてノイズが生じる可能性がある
- 汗の影響を受けやすい
- Ex. MYO (Thalmic Labs)

- 湿式筋電センサ

- ジェル状の電極を皮膚へ貼り付けて計測を行う
- 電極が使い捨てなため、費用がかかる
- 皮膚との密着性が高く、信号にノイズが生じにくい
- Ex. MyoWare (Advancer Technologies)

3.4 仮想翼からヒトへの情報伝達

次に、仮想翼からヒトへ情報を与える方法について述べる。

ヒトへ働きかける感覚として五感が挙げられる。その中でも、身体像の拡張におけるヒトへ働きかける情報として、視覚と触覚が用いられることが多い。これは、身体像拡張におい

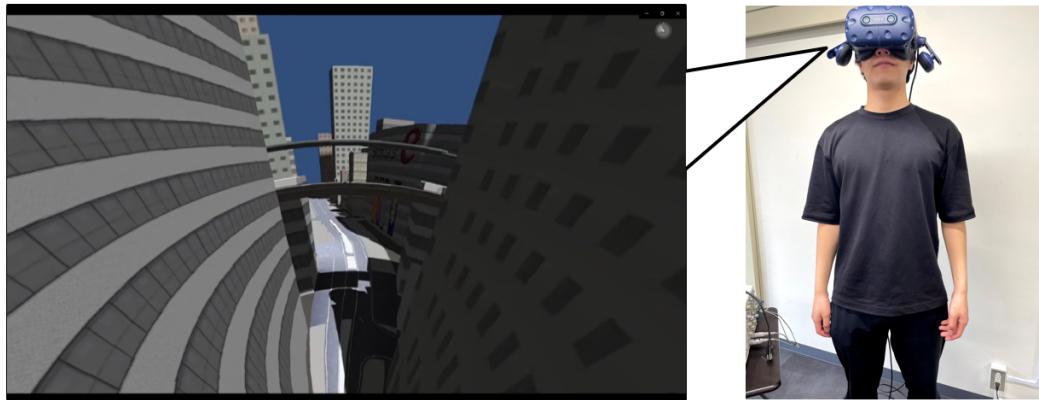


Fig. 3.2: Presentation of visual information by using the virtual environment

て視触覚の統合が有効であることを示す。本研究でも、視覚と触覚を用いて仮想翼からの情報提示する。

3.4.1 視覚の提示

視覚を用いた提示は、図 3.2 のように Unity で作成した映像を視覚ディスプレイに出力することで行う。出力される映像は、空中を移動している様子と、背中からはえた翼の一部が見える様子を提示する。

空中を移動している様子の提示について述べる。空中を移動する様子の提示として、ベクション（自己誘導性自己運動感覚）と呼ばれる錯覚を用いる。ベクションとは、視野の大部分に一様な運動刺激を提示すると刺激の運動方向と反対の方向に体が動いているように感じる錯覚である [31][32]。例として、停車中の電車から動き出す他の電車の視覚情報を受け取ると、観測者側の電車が動いているように感じる現象が挙げられる。

背中から翼が生えている様子・翼を動かして飛んでいる様子は、後ろを振り返ると使用者の背中から翼が生えている様子を描画されるようにする。また、翼を羽ばたかせる際に、視界に翼を広げたり閉じたりする様子の描画を行う。以上より、背中から翼が生え羽ばたく様子を提示する。

3.4.2 触覚の提示

触覚を用いた提示は、翼の根元に触覚を提示することで、翼が生えている様子・翼を動かして飛んでいる様子・翼に作用する空気抵抗の感覚を提示する。これは、ある1つの領域への触覚提示による身体像拡張を促すものあり、道具の身体化の手で所持した棒の先端まで身体像が拡張される事象と同様な例である。

また本研究では、触覚ディスプレイとして振動を用いた触覚提示と電気刺激を用いた触覚提示の2つを準備する。

触覚提示として一般的な振動を用いた触覚提示は、偏心モータによる振動を提示を行う。振動を用いた触覚提示の例として、ゲームのコントローラに振動機能を追加[33]、携帯電話やスマートフォンのバイブレーション機能などが挙げられる。

電気刺激を用いた触覚提示は、筋収縮により疑似的に触覚を提示する方法を用いる。この方法はEMS(Electro Myo Stimulation: 神経筋電気刺激療法)と呼ばれる、筋肉や運動神経へ電気刺激を与えることで筋収縮を促し、運動効果を得ることで筋肉の増強や萎縮の予防等をする治療法を用いた手法である。EMSにより筋肉を収縮させることで、疑似的に触覚(重量の知覚)を提示する研究がある[34]。本研究では、EMS機器により筋収縮を起こすことで触覚を生じさせ、仮想翼からの情報を提示する。

3.5 おわりに

本章では、前章の身体像の拡張の内容を踏まえた、四肢から独立した翼の提示方法について述べた。身体像拡張の方法として、ヒトから仮想翼への情報伝達・仮想翼からヒトへの情報伝達の内容と方法について述べた。

第4章

提案手法を用いた 身体像拡張の主観評価実験

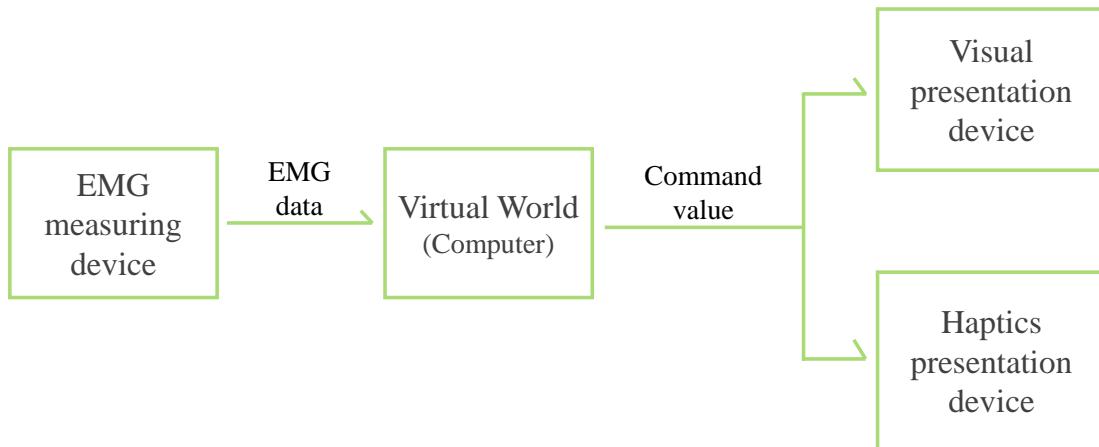


Fig. 4.1: Experimental environment system

4.1 はじめに

本章では、前章に提案した身体像拡張の手法を用いて主観評価実験を行う。操作/提示方法の検討、操作/提示位置の検討を行い、それぞれの組み合わせの評価を下す。主観評価実験の結果を踏まえ、被験者実験（客観評価実験）で比較する対象について述べる。

4.2 主観評価実験を行う実験環境

主観評価実験を行う実験環境について述べる。本章では、図 4.1 のような、筋電計測装置で計測した値を、端末上のソフトウェア（Unity¹）へ送信し、Unity 上から視覚提示装置と触覚提示装置を動作させるシステムを用いる。

まず、筋電計測装置として、ジェスチャと力みによる操作を比較するために Myo（図 4.2）[35] と MyoWare（図 4.3）[36] の 2 つを用意する。Myo は Thalmic Labs が開発した、筋電センサを搭載したマルチジェスチャバンドであり、上腕部の筋肉位から、腕・手首・指の

¹Unity Technology Inc. が開発したゲームエンジン及びゲームの統合開発環境。2005 年に配信され、ポケモン GO（任天堂）や Fall Guys（Mediatonic）といった様々なゲームの開発に用いられている。



Fig. 4.2: Myo (Thalmic Labs)

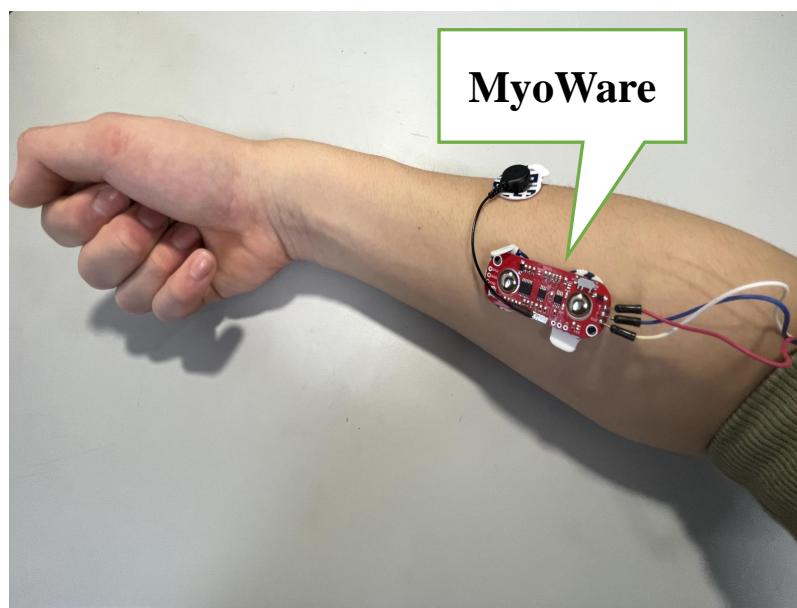


Fig. 4.3: MyoWare (Advancer Technologies LLC)

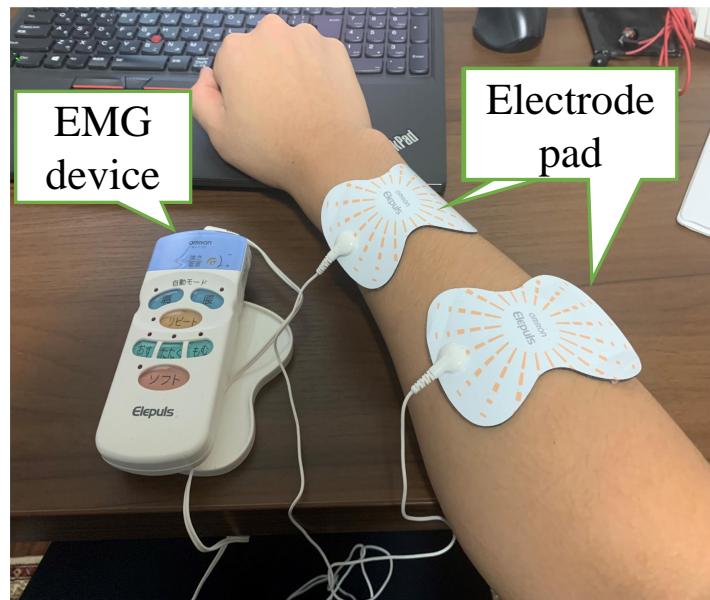


Fig. 4.4: HV-F122 (Omron 社)

動きのジェスチャを識別することが可能な乾式筋電センサである。MyoWare は Advancer Technologies が提供する湿式筋電センサであり、Myo と異なり任意の筋肉の筋電位を計測することができ、Arduino 等の外部接続したマイコンで簡単に筋電位を読み取ることが可能である。

次に、触覚提示については、振動での提示機器と EMS を用いた電気刺激での提示機器を用意する。それぞれ、振動での触覚提示は Myo の振動機能、電気刺激での触覚提示は低周波治療器 Omron HV-F122 (図 4.4) [37] を用いる。

そして、視覚提示装置は 3 人称視点と 1 人称視点を比較するため、液晶モニターでの視覚提示と HMD を用いた視覚提示の 2 種類を準備する。液晶モニターは GW2765HT (BenQ) , HMD は Meta 社の Meta Quest (図 4.5) [38] を使用する。視覚提示する際に使用する仮想翼を図 4.6 に示す。

4.3 操作・提示方法の検討

表 4.3 に比較項目を示す (FPP...First Person Perspective, TPP...Third Person Perspective) 。



Fig. 4.5: Meta Quest (Meta Platforms Inc.)

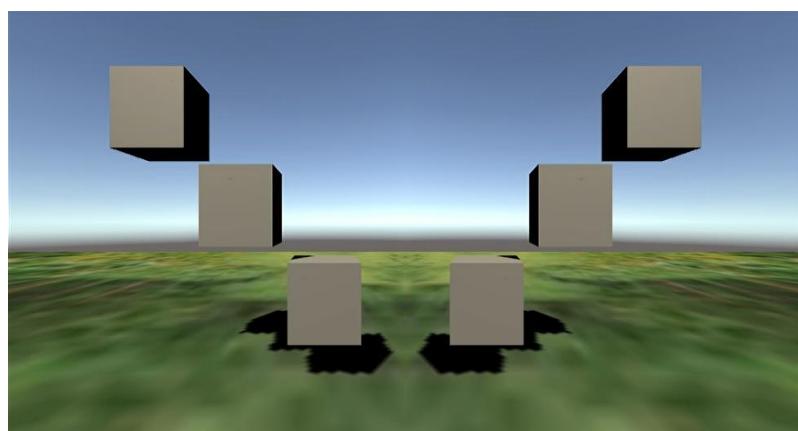


Fig. 4.6: Virtual Wings skeleton

Table 4.1: Comparison items

Comparison item	Wings operation	Haptics display	Visual display
Wings operation	Gesture/Strengthen	Vibration	TPP
Haptics display	Strengthen	Vibration/EMS	TPP
Visual display	Strengthen	EMS	TPP/FPP

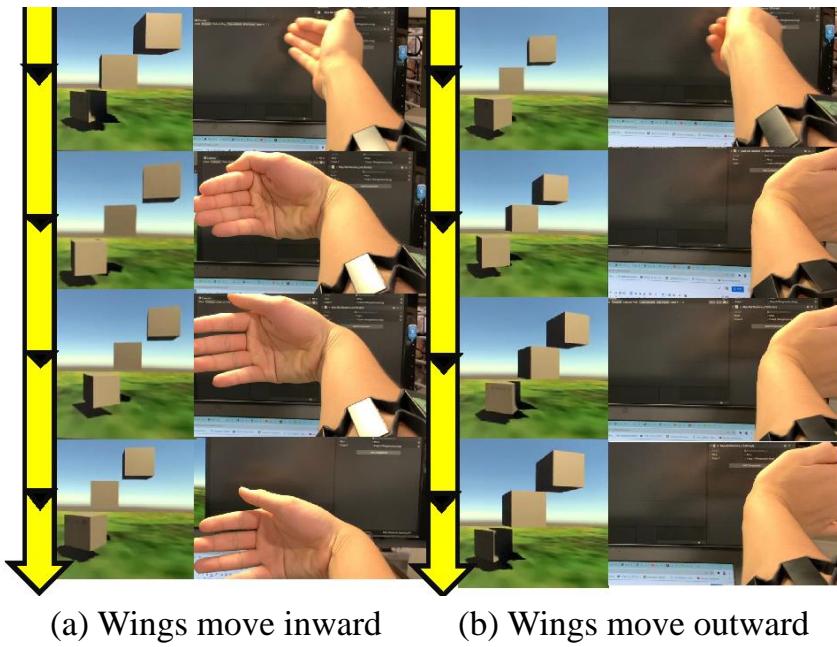


Fig. 4.7: Manipulation of virtual wings skeleton using Myo

4.3.1 翼の操作方法の比較

まず、翼の操作方法について比較し、主観評価を行う。第3章で述べたように、本研究ではヒトから翼への情報伝達として筋電位を用いる。筋電位を用いた操作方法は、関節動作を伴う動きであるジェスチャ（動的筋収縮）と、関節動作を伴わない力み静的筋収縮 [39] による操作に分類することが出来る。

触覚と視覚提示の条件を固定し、ジェスチャと力みによる操作を比較する。触覚は Myo を用いた振動を前腕に提示、視覚は仮想翼の3人称視点を液晶ディスプレイ（図 4.7, 図 4.8）に描画し提示する。

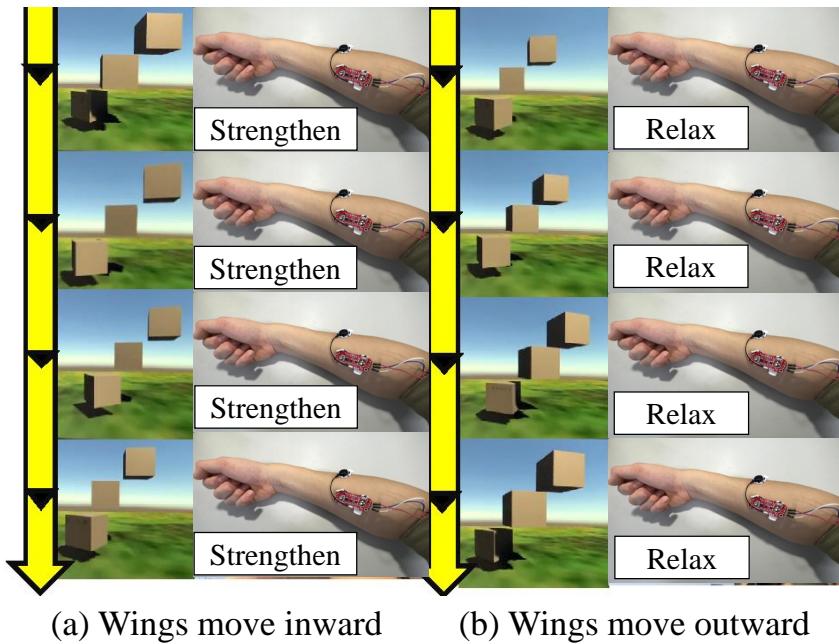


Fig. 4.8: Manipulation of virtual wings skeleton using MyoWare

仮想翼の操作は、筋電計測装置として Myo 用いる場合（ジェスチャによる操作）は図 4.7 のように、手首を内側に曲げると翼も内側に羽ばたき、手首を外側に開くと翼も外側へ開くように設計する。また、触覚提示は翼が内側に羽ばたく際に合わせて前腕に装着した Myo が振動するように行う。

MyoWare を用いる場合（力みによる操作）は、力むと翼が閉じ、弛緩すると翼が開くように設計する。触覚提示は Myo で筋電計測する場合と同様に、翼が内側に羽ばたく際に腕に装着した Myo を振動させることで提示を行う。また、MyoWare は計測部位として、力み動作が容易な前腕・胸・肩を選択する。

検証の結果、VR アプリケーションの操作方法として一般的なジェスチャを用いた操作だけでなく、前腕・胸・肩を問わず力みを用いた仮想翼の操作も、操縦者の意図通りに動作させることができたことを確認した。

Table 4.2: Results of an experiment using vibration as a haptics presentation

Position(Sensing/Haptics)	Arm/Arm	Chest/Arm	Shoulder/Arm
Sense of having wings	1	1	2
Sense of maneuvering the wings	4	4	4
Sense of air resistance	4	4	4
Sense of flying with wings	1	2	2

Table 4.3: Results of experiments using EMS as haptics presentation

Position(Sensing/Haptics)	Arm/Arm	Chest/Arm	Shoulder/Arm
Sense of having wings	1	2	2
Sense of maneuvering the wings	3	3	4
Sense of air resistance	3	3	3
Sense of flying with wings	2	2	3

Position(Sensing/Haptics)	Arm/Abs	Chest/Abs	Shoulder/Abs
Sense of having wings	3	3	3
Sense of maneuvering the wings	3	3	4
Sense of air resistance	4	4	4
Sense of flying with wings	3	4	3

Position(Sensing/Haptics)	Arm/Back	Chest/Back	Shoulder/Back
Sense of having wings	5	5	5
Sense of maneuvering the wings	3	4	5
Sense of air resistance	4	4	4
Sense of flying with wings	4	5	5

4.3.2 触覚提示方法の比較

次に、触覚提示方法について比較し、主観評価を行う。本研究では、触覚として振動を用いた触覚提示と電気刺激を用いた触覚提示の2つを準備する。

翼の操作方法と視覚提示の条件を固定し、触覚として振動を用いた提示と電気刺激を用いた提示を比較する。翼の操作方法は MyoWare を用いて前腕・胸・肩の力みにより翼が閉じ、弛緩すると翼が開くようにする。視覚提示は液晶ディスプレイに3人称視点での翼の動き(図4.8)を描画して提示を行う。

図4.2と図4.3に、触覚提示として振動と電気刺激を行った際の、実験中の仮想翼からヒトへの情報提示についてのリッカート尺度で5段階の主観評価を示す。

図4.2と図4.3の1行目は、それぞれ前腕に触覚提示を行った場合の結果を示している。図より、振動と電気刺激の主観評価に顕著な違いが無いことが分かる。従って、触覚提示として一般的な振動に加え、電気刺激による提示も有用であることが言える。

また図4.3より、筋電計測位置と触覚提示位置によって主観評価の違いが表れているのが分かる。筋電計測・触覚提示とともに、四肢（腕）よりも胴体部分の方が全体的に評価が高くなっている。これより、筋電計測・触覚提示とともに、四肢（腕）よりも胴体へ行うことで羽ばたいて飛ぶ感覚を強く提示可能と考えられる。

4.3.3 視覚提示方法の比較

最後に、視覚提示方法について比較し主観評価を行う。視覚提示装置として、液晶ディスプレイとHMDを用意し、それぞれ3人称視点と1人称視点の映像を提示する。1人称視点の映像は、仮想翼を背中に配置し、体をひねって背中側を見ると仮想翼が生えているような映像が描画されるようにする。

翼の操作方法と触覚提示の条件を固定し、視覚提示として3人称視点と1人称視点を行った場合の比較する。翼の操作方法は前腕・胸・肩の力みにより翼が閉じ、弛緩すると翼が開くように設計する。触覚提示は前腕・胸・腹・背中にEMS機器（図4.4）による電気刺激を行う。

検証より、3人称視点と比べ1人称視点の映像提示を行った場合の方が、自分の体から翼が生えている様子を強く感じた。3人称視点を提示を行った場合は、自らの翼を操作している感覚よりも、遠隔地の翼を操作している感覚、道具の身体化ではなくRHI（Rubber Hand Illusion）のようなリマッピングの感覚を惹起させた。道具の身体化においては、3人称視点よりも1人称視点の映像提示の方が有効であることが分かった。

4.4 操作・提示位置の検討

操作・提示方法の検討の結果、操作位置（筋電計測位置）と触覚提示位置によって羽ばたいて飛ぶ感覚の提示に違いが生じる事が分かった。そこで、位置による違いの比較を効率的に行うため、筋電計測・触覚提示位置の候補を挙げ、選定を行う。

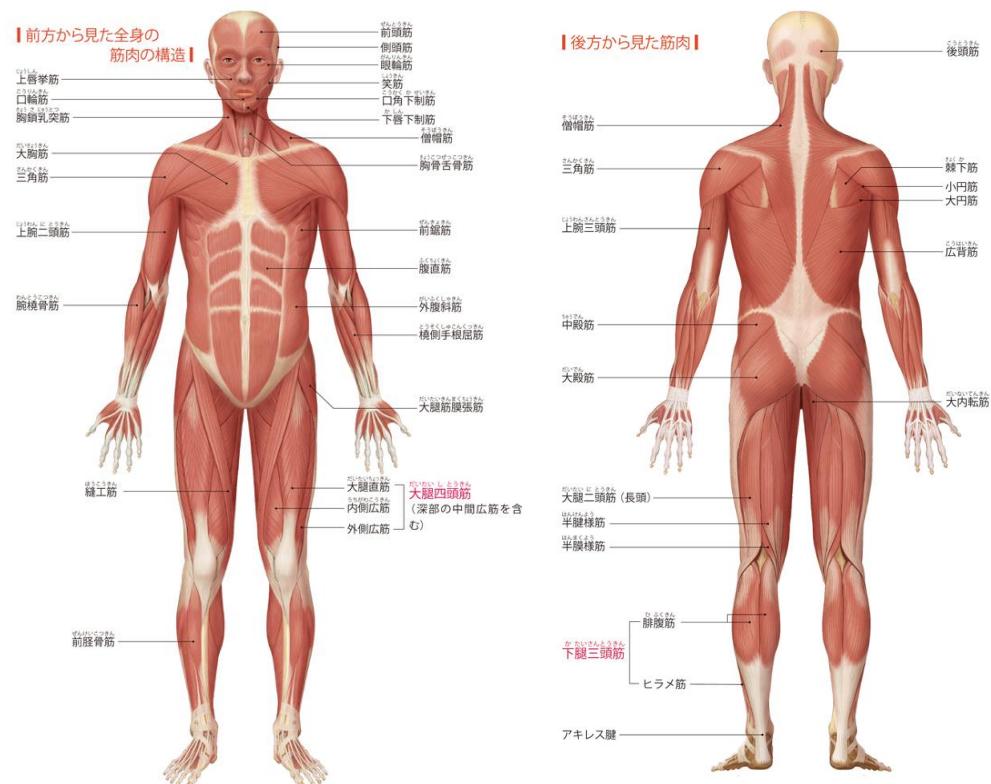


Fig. 4.9: Muscle structure[40]

4.4.1 操作位置の検討

関節動作を伴わない筋収縮（静的筋収縮）が容易な部位として、四肢では腕（上腕二頭筋・上腕三頭筋）、ふともも（大腿直筋）、ふくらはぎ（腓腹筋・ヒラメ筋）が挙げられる。胴体部では、胸（大胸筋）、腹（腹直筋）、肩（僧帽筋）、臀部（大殿筋）が挙げられる。筋電計測において、計測点の皮下脂肪が多い場合、筋電位の振幅が減衰し不明瞭となる[41]。従って、比較的皮下脂肪が少ない部位を筋電計測位置として選択する必要がある。以上より、筋電計測位置として胸・肩と、ジェスチャと力みによる仮想翼の操作を比較するために、上腕二頭筋の動的筋収縮の3種類を用いる（図4.9）。

4.4.2 提示位置の検討

図4.2より、触覚提示の位置は四肢よりも胴体部に行った場合の方が評価が高いことが分かった。そこで、胴体の中でどの部位が触覚提示として一番有効であるかを調査する。ヒトの感覚野の内、手の占める触知覚の割合が大きく[42]、胴体部の触知覚の割合が少ない[43][44][45]ことが知られている。従って、胴体部の提示部位を細かく分類するのではなく、大きく分類する方が部位ごとの感覚の違いを調査できると考える。そこで、胴体を上部・下部、表・裏の4部分（胸・腹・背中・腰）に大きく分けて、提示を行う。

4.5 おわりに

本章では、前章に提案した身体像拡張の手法を用いて主観評価実験を行った。操作・提示方法の検討、操作・提示位置の検討を行い、それぞれの組み合わせの評価を下した。主観評価実験の結果、操作方法としてジェスチャだけでなく力みを用いた方法も有用であることが分かった。また、仮想翼からの提示として電気刺激を用いた触覚提示も有効であることが分かった。そして、操作・提示の位置について候補を挙げ検討を行った。

第5章

主観評価実験を踏まえた
位置による身体像拡張の差異を評価する
被験者実験

5.1 はじめに

本章では、主観評価実験を踏まえた位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験より、筋電計測位置と羽ばたく感覚の提示位置を変化させた場合の、羽ばたいて飛ぶ感覚の感じ方の違いについて検証を行う。

5.2 実験の目的

第4章より、筋電計測位置と触覚提示位置によって羽ばたいて飛ぶ感覚の感じ方に違いが生じることが分かった。そこで、筋電計測位置と触覚提示位置による感じ方の違い（身体像拡張の度合）について、被験者実験より検証を行う。

5.3 人研究倫理審査

本実験は「東京農工大学 人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の倫理審査」を通過しており、実験は被験者の同意を得て行う（「翼で飛ぶ感覚を提示する VR（仮想現実）システムに関する研究」、倫理審査委員会承認番号 210908-0343）。被験者の募集は学内メーリングリスト、掲示、アルバイト募集用 WEB サイトなどをを利用して行う。被験者の選定方針に関しては、胴体部（胸・腹・背中）に電極を貼る都合上、男性に限定する。ただし、未成年の場合には保護者の承諾を取ることとする。

また、被験者に生じるリスクとしては、実験中に発生する VR 酔いや新型コロナウイルス感染症への感染がある。これらのリスクは、感染症予防対策を十分に行い、被験者が体調に違和感を感じたらすぐに対応することで対策をする。

被験者が回答したアンケートは、研究実施者以外アクセスできないようにし、保管期間（5年間）が過ぎたらシュレッダーに掛けて解読不能にして廃棄する。

5.4 被験者実験を行う実験環境

被験者実験を行う実験環境について述べる。被験者実験では、第4章の主観評価実験と同様に図 5.1 のような環境のシステムで実験を行う。

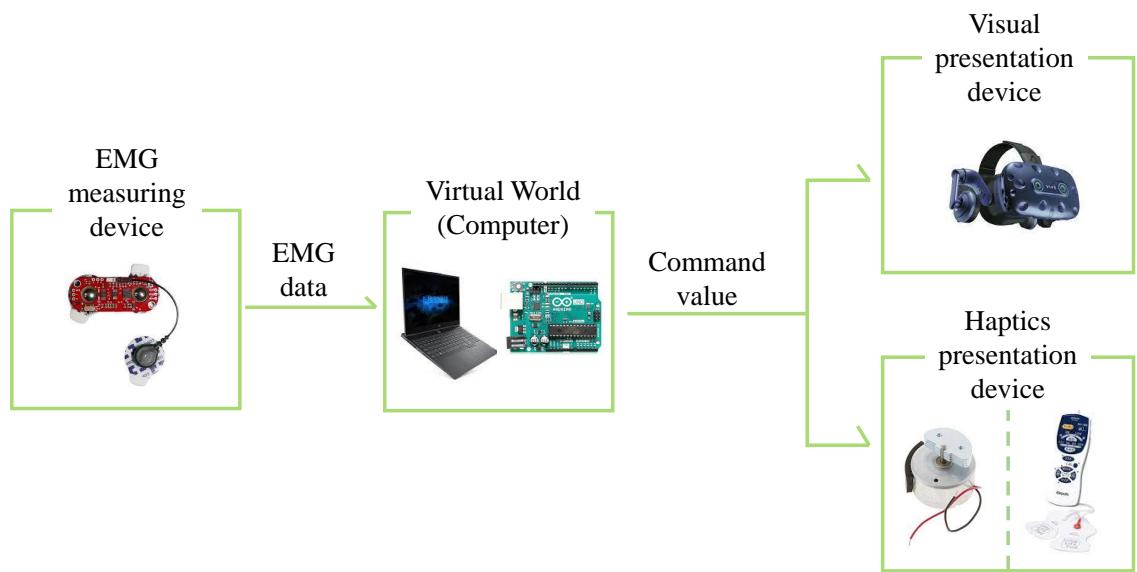


Fig. 5.1: Experimental environment system



Fig. 5.2: HTC VIVE PRO EYE

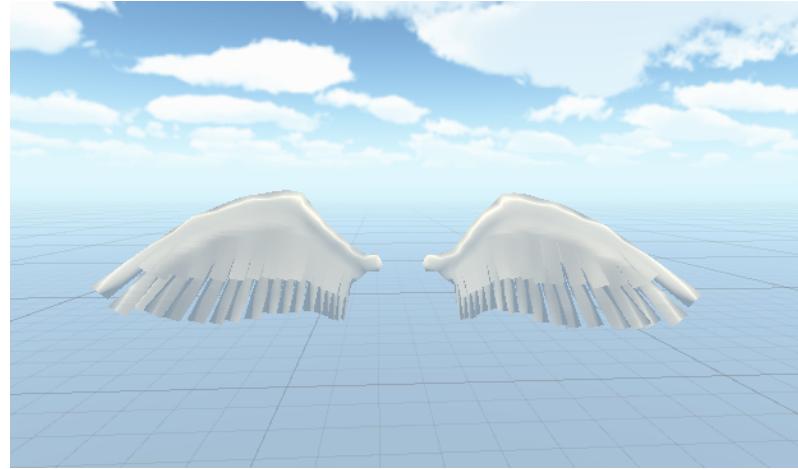


Fig. 5.3: Virtual Wings

筋電計測装置には MyoWare (図 4.3) を使用し, Arduino を用いて筋電位の値を取得する。取得した筋電位の値を端末上のソフトウェア (Unity) へ送る。そして, Unity から視覚提示装置と触覚提示装置を制御する。

視覚提示装置には VIVE PRO EYE (HTC 社) 図 5.2[46] を用いる。VIVE PRO EYE を用いて, 仮想翼 (図 5.3) が生えている様子を, 1人称視点で提示する。

触覚提示装置は, 図 5.4 と図 5.5 を用いる。図 5.4 は, 偏心モータを Arduino から制御し振動を与える装置である。図 5.4 は, 低周波治療器 (Omron HV-F127[47]) を Arduino で制御し, 電気刺激を与える装置である。

実験の物理環境について述べる。本実験での VR 空間では, 飛行を行いやすくするために重力加速度 g' を月と同等 (式 (5.1)) に設定する。

$$g' = 1.62 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (5.1)$$

また, 飛行の際に式 (5.2) のような, 速度に比例した空気抵抗 R [N] を与える。

$$\mathbf{R} = k\mathbf{v} \text{ [N]} \quad (5.2)$$

k は比例定数 ($k = 5.0$)。

VR 空間内の具体的な飛行方法について述べる。まず, 翼の操作方法は, 操作位置 (筋電計測位置) を力ませている間は仮想翼が内側に羽ばたき, 弛緩させると仮想翼を広げる用

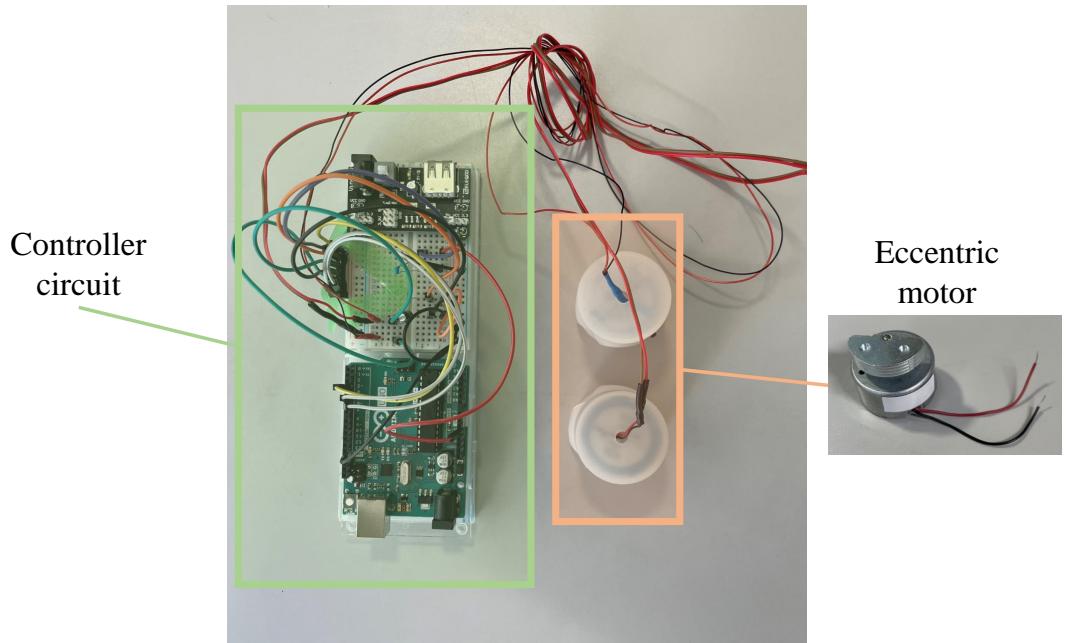


Fig. 5.4: Haptics display device (Vibration)

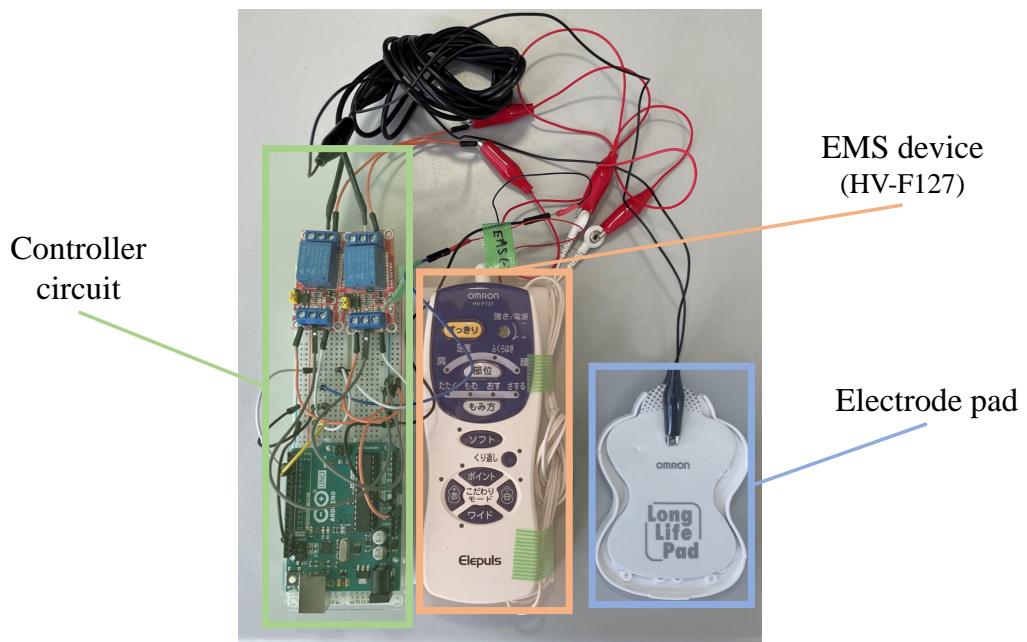


Fig. 5.5: Haptics display device (EMS)

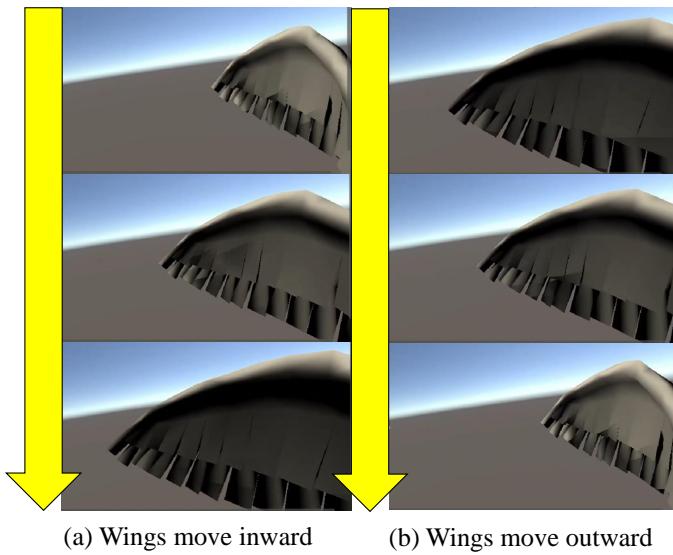


Fig. 5.6: Movement of Virtual Wings

に設計する（図 5.6）。仮想翼を羽ばたかせることにより、進行・上昇方向へ力が発生し飛行する（波状飛行 [48]）ことができる。この際発生する力 F [N] は式 (5.3) に従う。

$$F = \frac{a}{l} \tanh\left(\frac{x}{a}\right) \quad [N] \quad (5.3)$$

$$l = \begin{pmatrix} 400 \\ 500 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

l は比例定数（1行目：進行方向、2行目：上昇方向）。 a [N] は計測可能な筋電位の最大値 ($a = 1024$)、 x [N] は計測された筋電位。

また、仮想翼を内側に羽ばたかせている際に、触覚提示を行う。この時の触覚提示の強さ P [N] は計測された筋電位に応じて式 (5.5) の変化するようとする。

$$P = a \tanh\left(\frac{x}{a}\right) \quad [N] \quad (5.5)$$

5.5 実験方法

筋電計測位置 3 種と触覚提示位置 4 種と触覚提示装置 2 種の比較を行う。以下に各項目について示す。

- 筋電計測位置

- 上腕二頭筋（動的収縮）
- 大胸筋（静的収縮）
- 僧帽筋（静的収縮）

- 触覚提示位置

- 胸
- 腹
- 腰
- 背中

- 触覚提示種類

- 振動
- 電気刺激

実験の手順を示す。

- まず、触覚提示として振動を用いた装置を使用する。筋電計測位置を上腕二頭筋（一番力み動作が容易な部位）に固定し、触覚提示位置を変化させ比較を行う。
- 触覚提示位置を、先ほどの一番評価が高い部位に固定し、筋電計測位置を変化させ比較を行う。
- 次に、触覚提示として電気刺激を用いた装置を使用する。筋電計測位置を一番評価が高かった部位に固定し、触覚提示位置を変化させ比較を行う。
- 触覚提示位置を一番評価が高かった部位に固定し、筋電計測位置を変化させ比較を行う。
- 最後に、アンケートに回答してもらう。

アンケートには9段階のリッカート尺度[49]を用いて回答してもらう。以下にアンケートの内容を示す。

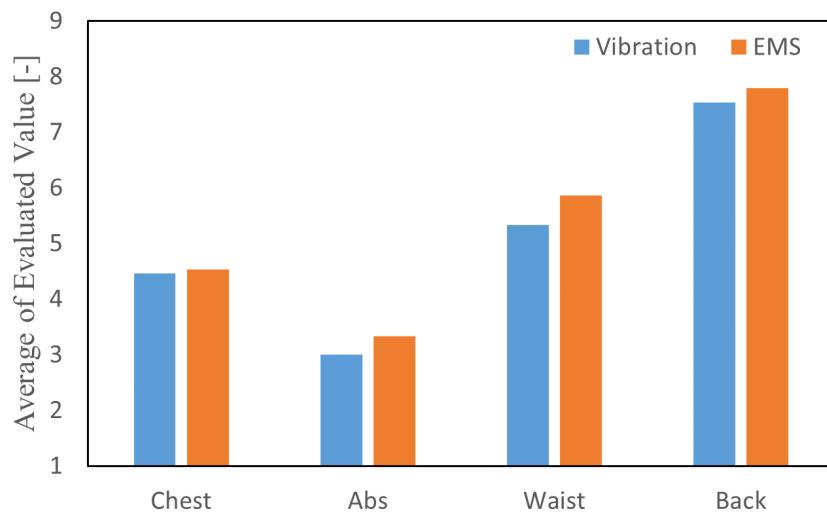


Fig. 5.7: Comparison of haptics display positions

- 触覚提示（胸・腹・腰・背中）の中で、羽ばたいて飛んでいる感覚が強かった順番とそれぞれの評価を記述してください。
- 筋電計測位置（腕・胸・肩）の中で、羽ばたいて飛んでいる感覚が強かった順番とそれぞれの評価を記述してください。
(上記2つの質問を触覚提示として振動と電気刺激を用いた場合の2回行う。)
- 触覚提示として振動と電気刺激どちらの方が羽ばたいて飛んでいる感覚が強かったか。
- 筋電計測位置と触覚提示位置のどちらの方が、羽ばたいて飛ぶ感覚の提示において重要だと感じたか。
- 背中から生えた翼で、羽ばたいて飛ぶ感覚を感じることが出来たか。

5.6 実験結果と考察

図5.7, 図5.8, 図5.9, 図5.10に被験者実験のアンケート結果を示す。被験者は15人で、20から24歳の男性である。

図5.7は、筋電計測位置を固定し触覚提示位置のを比較した際の評価の平均値を表した図である。図より、提示機器が振動・電気刺激に関わらず背中、腰、胸、腹の順番に評価が高

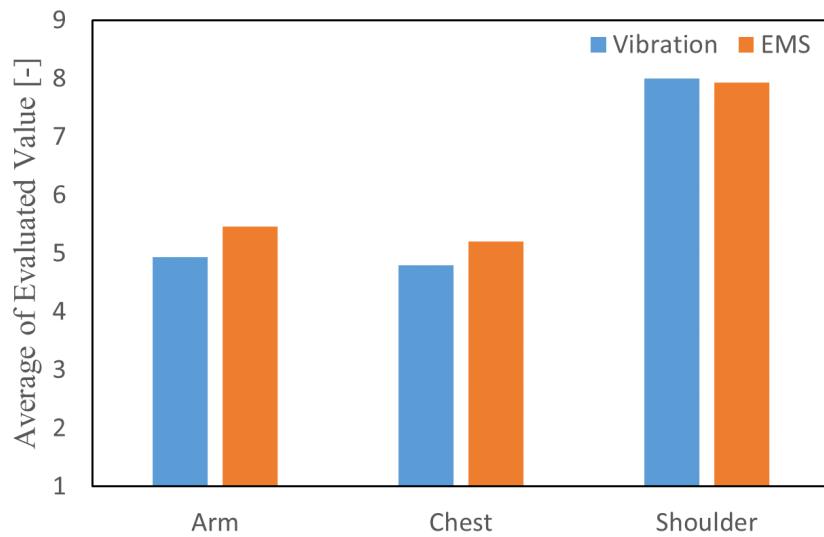


Fig. 5.8: Comparison of EMG measuring position

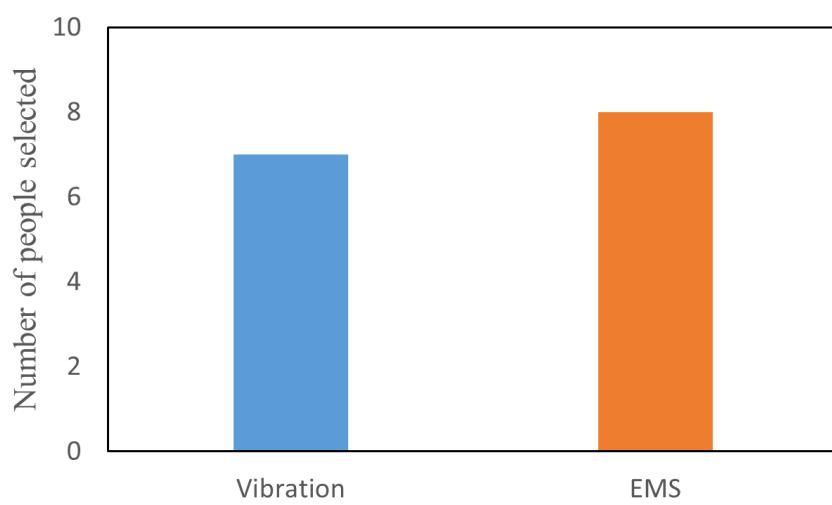


Fig. 5.9: Comparison of Vibration and EMS

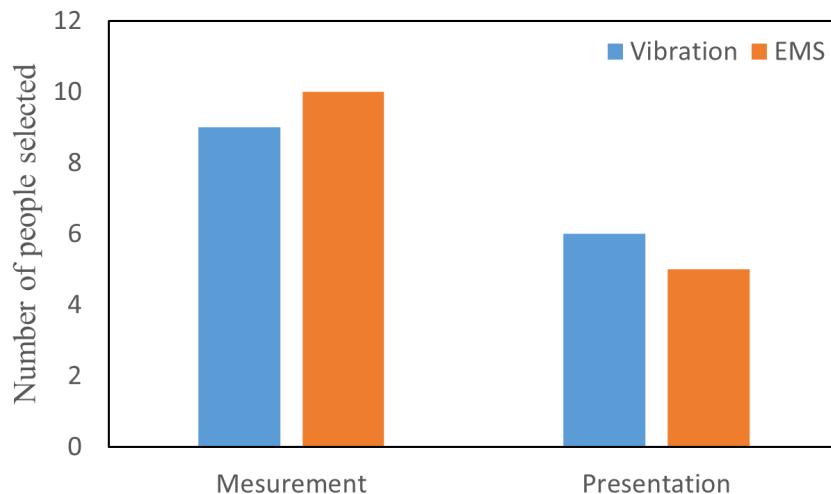


Fig. 5.10: Comparison of measuring position and haptics presentation position

いことが分かる。これより触覚の提示位置は、視覚提示で与えた仮想翼の位置からの絶対的な距離よりも、胴体の前面・後面が身体像拡張の評価に影響することがわかる。

図 5.8 は、触覚提示位置を固定し筋電計測位置の比較した際の評価の平均値である。図より、提示機器が振動・電気刺激に関わらず、肩による仮想翼の操作の評価が一番高いことが確認できる。また、筋肉の位置が近い腕（動的筋収縮）と胸（静的筋収縮）の評価には大きな違いが見られない。これより身体像拡張において、ジェスチャ（動的筋収縮）による操作と関節動作を伴わない力み（静的筋収縮）による操作によって惹起される感覚に大きな違いが生じないと考えられる。そして、腕が直感的動作であるなジェスチャであるのに対し、胸の力みは普段行わない動作且つ行いにくい動作であるのにも関わらず評価の差異が少ない。これより、力みによる操作の訓練を行うことで、力みによる操作がジェスチャによる操作よりも仮想翼の身体像拡張において有効になることが期待できる。

振動と電気刺激の触覚提示の比較を図 5.9 に示す。7人の被験者が触覚提示として振動を用いた方が良いと感じ、残りの8人の被験者が電気刺激を用いた方が良いと回答した。これより、触覚提示として一般的な振動に加え、電気刺激を用いた提示方法も有用であることが分かる。また、図 5.8、図 5.7 より、全体的に電気刺激を用いた提示の方が評価が高いことが分かる。これは、振動を用いた触覚提示が皮膚表面（表在感覚）に対しての刺激であるのに対し、電気刺激を用いた触覚提示は皮膚表面に加えて筋肉（深部感覚）へも刺激が伝わり

易く、提示される感覚のモードが増えたことが要因と考えられる。

図 5.10 は、四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ感覚の提示について筋電計測位置と触覚提示位置のどちらが重要であるかという質問の結果である。図より、振動・電気刺激どちらの場合でも筋電計測位置が重要であると答える被験者が多かった。触覚提示位置が翼からの反応であることに対し、筋電計測位置はヒトから働きかける情報を取得する部分である。これより、被験者が自分で翼を動かしている感覚、自己主体感を重視していると捉えることができる。第2章では、RHI の研究例 [29] で、身体像拡張において触覚提示位置の空間的一致は柔軟であると述べた。しかし、実験結果より筋電計測位置（力みによる操作位置）に関しては、身体像拡張において空間的一致が重要であると考えられる。

最後に、背中から生えた翼で羽ばたいて飛ぶ感覚を感じることが出来たかという項目には、平均で 7.11 の評価を得ることができた。従って、本研究で提案した手法での仮想翼の身体像拡張が可能であることが分かった。

5.7 おわりに

本章では、主観評価実験を踏まえた位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験を行った。筋電計測位置と羽ばたく感覚の提示位置を変化させた場合の、羽ばたいて飛ぶ感覚の感じ方の違いについて検証を行った。そして、触覚提示位置が、絶対的な距離よりも胴体の前面・後面の要素が重要となることが分かった。また、筋電計測位置について、ジェスチャに加え力みによる操作も有効であること、訓練次第でジェスチャよりも力みによる操作の方が評価が高くなる可能性があることを示した。そして、触覚として電気刺激を用いた提示の方が全体的に評価が高くなることが分かった。最後に、本研究で提案した手法を用いた仮想翼の身体像拡張が可能であることが分かった。

第6章

結論および今後の展望

6.1 結論

本稿では、翼を動かして飛ぶ感覚を与える研究に注目し、四肢を用いず翼を操作している感覚の提示方法と、VR空間で翼に作用する力をヒトに伝達する手法を提案した。実験装置のシステムを作成し、振動とEMS装置による触覚提示についての有用性についての主観評価実験を行った。そして主観評価実験を踏まえ、位置による身体像拡張の差異を評価する被験者実験を行った。被験者実験より、触覚提示位置が、絶対的な距離よりも胴体の前面・後面の要素が重要となることが考えられる。また、筋電計測位置について、力みによる操作も有効であること、訓練次第でジェスチャよりも力みによる操作の方が評価が高くなる可能性があることについて述べた。そして、電気刺激を用いた提示の方が全体的に評価が高くなることを示した。最後に、本研究で提案した手法での仮想翼の身体像拡張が可能であることを確認した。

6.2 今後の展望

今後の展望として、まず仮想翼からヒトへの提示情報を増やすことが挙げられる。前庭電気刺激による加速度感覚 [50][51] や、風や音の追加が考えられる。

また、実験に用いた装置の改良が考えられる。本研究では、1点で筋電の計測を行っていたが、多点で筋電計測を行うことで、より安定した筋電位を取得することができる [41]。触覚提示装置は、提示可能な周波数帯域を広げることで、より繊細な触覚提示が可能となる。本稿は筋電計測位置と触覚提示位置をある程度絞って比較を行ったが、これら候補を増やすことで位置による違いをより詳しく知ることができるだろう。

そして、今回は仮想翼で飛行するだけであったが、飛行しながら的当てタスクといったことを行い点数を付けることで、四肢から独立した翼での飛行体験を評価することや、身体像の拡張がどの程度成功できているかを客観的に評価が可能となると考える。

参考文献

- [1] Gravity Industries. Gravity industries: Flight club, 最終閲覧日 2022-01-09. <https://gravity.co/>.
- [2] 奥川夏輝, 古賀宥, 石津航大, 橋口哲志, 柴田史久, 奥村朝子. VR 空間における視覚刺激によって発生する落下感覚の分析. 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 673–676, 2017.
- [3] 鈴木拓馬, 矢野裕季, 安藤英由樹, 清川清ほか. Hmd および身体帮助メカニズムを用いた vr 環境における浮遊感体験装置の提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, Vol. 2014, pp. 55–57, 2014.
- [4] Carine Rognon, Stefano Mintchev, Fabio Dell’Agnola, Alexandre Cherpillod, David Atienza, and Dario Floreano. Flyjacket: An upper body soft exoskeleton for immersive drone control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2362–2369, 2018.
- [5] Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, pp. 1–1. 2014.
- [6] Guandalini R. and G. Agate. Hypersuit. <https://www.fitness-gaming.com/profiles/company/hypersuit.html>, Jul 2017.
- [7] Henry Head and Gordon Holmes. Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, Vol. 34, No. 2-3, pp. 102–254, 1911.
- [8] 西田幾多郎. 西田幾多郎哲学講演集 歴史的身体と現実の世界. 燐影舎, 1994.
- [9] V・S・ラマチャンドラン, サンドラ・ブレイクスリー. 脳の中の幽霊 Phantoms in the brain. 角川文庫, 2011.
- [10] 池谷裕二. 進化しすぎた脳: 中高生と語る「大脳生理学」の最前線. Kōdansha, 2007.
- [11] S.Gallagher. Philosophical conceptions of the self : implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 14–21, Jan 2000.
- [12] 乾敏郎. 感覚・知覚・認知の基礎. オーム社, 2012.

- [13] Kazumichi Matsumiya. Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control. *Scientific reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–14, 2021.
- [14] 渡辺貴文, 片山智文, 上杉繁, 三輪敬之. 仮想道具による身体像拡張の評価手法に関する研究. *信学技報*, Vol. 105, No. 74, pp. 47–50, 2005.
- [15] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘ feel ’touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- [16] Susumu Tachi. Telexistence. In *Virtual Realities*, pp. 229–259. Springer, 2015.
- [17] H Henrik Ehrsson, Charles Spence, and Richard E Passingham. That’s my hand! activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science*, Vol. 305, No. 5685, pp. 875–877, 2004.
- [18] Mel Slater, Daniel Pérez Marcos, Henrik Ehrsson, and Maria V Sanchez-Vives. Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 2, p. 6, 2008.
- [19] Y Iwasaki and H Iwata. Research on the third arm: proposal of a face vector interface for voluntary and intuitive control of a wearable robot arm. In *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 2017.
- [20] Valeria I Petkova and H Henrik Ehrsson. If i were you: perceptual illusion of body swapping. *PloS one*, Vol. 3, No. 12, p. e3832, 2008.
- [21] Atsushi Iriki, Michio Tanaka, and Yoshiaki Iwamura. Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *Neuroreport*, Vol. 7, No. 14, pp. 2325–2330, 1996.
- [22] Domenico Prattichizzo, Monica Malvezzi, Irfan Hussain, and Gionata Salvietti. The sixth-finger: a modular extra-finger to enhance human hand capabilities. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 993–998. IEEE, 2014.

- [23] 岩垂真哉. 余剰筋力を用いた第三の腕口ボットの操縦. Master's thesis, 東京農工大学, 2017.
- [24] 岩垂真哉, 水内郁夫. 余剰筋力を用いた第三の腕口ボットの操縦. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, pp. 1A2–12a3. 一般社団法人 日本機械学会, 2016.
- [25] Tomoya Sasaki, MHD Yamen Saraiji, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metalimbs: multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, pp. 1–2. 2017.
- [26] 本間元康. ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり. 認知科学, Vol. 17, No. 4, pp. 761–770, 2010.
- [27] H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1048–1048, 2007.
- [28] Sotaro Shimada, Kensuke Fukuda, and Kazuo Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS one*, Vol. 4, No. 7, p. e6185, 2009.
- [29] K Carrie Armel and Vilayanur S Ramachandran. Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, Vol. 270, No. 1523, pp. 1499–1506, 2003.
- [30] 表面筋電位(emg)とは — 技術紹介 — (株)alts. <https://alts-device.com/technology/myoelectric-emg/>. (Accessed on 01/19/2022).
- [31] Mukul Bhalla and Dennis R Proffitt. Visual–motor recalibration in geographical slant perception. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, Vol. 25, No. 4, p. 1076, 1999.
- [32] 妹尾武治. ベクションとその周辺の近年の動向. 認知科学, Vol. 21, No. 4, pp. 523–530, 2014.
- [33] Youngbo Aram Shim, Keunwoo Park, Sangyoong Lee, Jeongmin Son, Taeyun Woo, and Geehyuk Lee. Fs-pad: Video game interactions using force feedback gamepad.

- In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 938–950, 2020.
- [34] 小川剛史, 中張遼太郎, 新島有信. 電気的筋肉刺激が重量知覚に及ぼす影響の分析. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 1, pp. 3–10, 2017.
- [35] Thalmic Labs. Thalmic labs myo. <https://developerblog.myo.com/author/thalmic-labs/>, 2022. (Accessed on 01/20/2022).
- [36] Advancer Technologies. Myoware muscle sensor datasheet. <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MyowareUserManualAT-04-001.pdf>, 2015. (Accessed on 01/20/2022).
- [37] Omron. 低周波治療器 hv-f122 — オムロン ヘルスケアストア. https://store.healthcare.omron.co.jp/item/HV_F122.html. (Accessed on 01/20/2022).
- [38] Meta Platforms. Meta quest. https://www.oculus.com/?locale=ja_JP. (Accessed on 01/20/2022).
- [39] Howard G Thistle, Helen J Hislop, Mary Moffroid, and EW Lowman. Isokinetic contraction: a new concept of resistive exercise. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Vol. 48, No. 6, pp. 279–282, 1967.
- [40] 川上正舒, 野田泰子, 矢田俊彦. からだと病気のしくみ: 生命のかたち・色・メカニズム. 株式会社 法研, 2012.
- [41] 白石恵, 岡田守彦, 増田正, 佐渡山亜兵. 筋電位多点計測による体幹背部の神経支配帯の分布. バイオメカニズム, Vol. 11, pp. 193–203, 1992.
- [42] Wilder Penfield and Theodore Rasmussen. The cerebral cortex of man; a clinical study of localization of function. 1950.
- [43] James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.
- [44] 丸本耕次, 岡田明. 触覚表示の認知特性に関する研究. 人間工学, Vol. 33, No. Supplement, pp. 384–385, 1997.

- [45] 杉輝夫, 伊東元. 身体部位による触知覚の差. 理学療法学 Supplement Vol. 32 Suppl. No. 2 (第 40 回日本理学療法学会抄録集), pp. A1042–A1042. 公益社団法人日本理学療法士協会, 2005.
- [46] HTC. Vive japan. <https://www.vive.com/jp/>. (Accessed on 01/19/2022).
- [47] Omron. 低周波治療器 hv-f127 エレパルス | オムロン ヘルスケア. <https://www.healthcare.omron.co.jp/product/hvf/hv-f127.html>. (Accessed on 01/22/2022).
- [48] Canon Inc. Canon bird branch project 生物多様性の取り組み. <https://global.canon/ja/environment/bird-branch/index.html>. (Accessed on 01/23/2022).
- [49] R Lickert. The method of constructing an attitude scale, in (ed) fishbein, m. *Readings in attitude theory and measurement*, 1932.
- [50] Taro Maeda, Hideyuki Ando, Tomohiro Amemiya, Naohisa Nagaya, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Shaking the world: galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface. In *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, pp. 17–es. 2005.
- [51] 青山一真, 安藤英由樹, 飯塚博幸, 前田太郎. 前庭電気刺激における逆方向不感電流を用いた加速度感覚の増強 (特集サービス現場・日常生活に浸透する VR/AR). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 315–318, 2014.