

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

水内研究室 遠藤 健 Ken ENDO

Since ancient times, people have longed to fly in the sky. Actual flying involves risks and costs, but using a VR device makes it easy to experience flight. In this study, we propose a method of presenting the sensation of flying with flapping virtual wings independent of the limbs, such as the Draco. Unlike studies that presents the sensation of flapping wings by moving the arms, new applications that use the limbs during the flight experience can be expected by flying without moving the limbs. In this paper, we proposed a method of presenting the sensation of manipulating the wing without using the limbs and a method of transmitting the force acting on the wing to humans. We conducted experiments using these methods and obtained subjective evaluations.

Key Words : Virtual Reality, Body image expansion, Virtual wings independent of the limbs, Haptics



Fig.1 Flying with flapping virtual wings

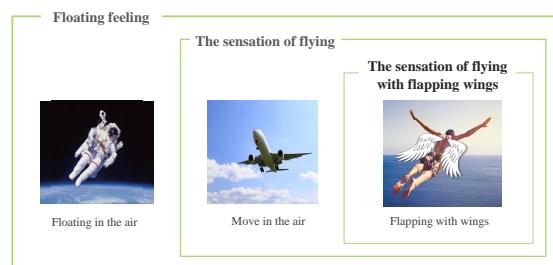


Fig.2 Classification of floating feeling

1. 緒言

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、飛行機やハンギ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2のように位置付ける。

「浮遊感」とは、空中に浮いて漂っている感覚を指す。「飛ぶ感覚」は浮遊感に空中を移動する感覚を追加したものとする。本稿で注目する「羽ばたいて飛ぶ感覚」は、飛ぶ感覚に加え、翼を羽ばたかせる感覚を追加したものである。



Fig.3 System of presenting the sensation of flying with flapping⁽⁵⁾

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。視覚刺激を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。

「羽ばたいて飛ぶ感覚」を与える研究について、図3のような操縦装置に登場し、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、四肢の動きを用いないで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。

2. 身体像の拡張

本研究において以下の要素が重要となる。

- ヒトに本来存在しない「翼」を感じさせる(存在)
- 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。本節では、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。



Fig.4 Body image expansion

2.1 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。

また、身体像と密接に関係する概念に自己所有感と自己主体感がある。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⁽⁸⁾。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⁽⁹⁾。

このように、身体像が自己所有感・自己主体感と密接に関係していることが分かる。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出来ると考える。

- ヒトに本来存在しない「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）

2.2 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4）。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⁽¹⁰⁾。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）⁽¹¹⁾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 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⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

2.4 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二ホンザルを用いて神経生理学的に示した研究がある⁽¹⁷⁾。この研究では、道具使用時の二ホンザルの登頂連合野における手の体性感觉受容野やと手近傍の視覚受容野を持つバイモダルニューロンの活動を観測することにより、サルの

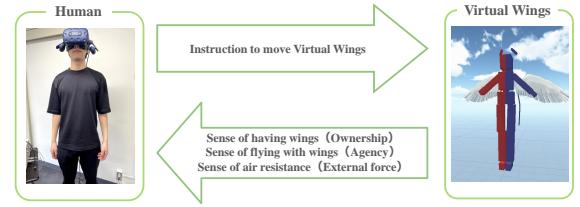


Fig.5 Method of body image expansion

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⁽¹⁸⁾、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⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾や顔面ベクトルを用いて第3の腕を操作する研究⁽¹⁵⁾、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⁽²¹⁾。

2.5 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いる。

また、ラバーハンド錯覚について、視覚情報と触覚情報といった感覚情報の時間的一致の重要性が高いことが示されている⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。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なと考えられる。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⁽²⁵⁾。

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）が期待できる事を確認した。そこで、本研究では図5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る、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。

3. 四肢から独立した翼の提示方法

3.1 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5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。

3.2 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

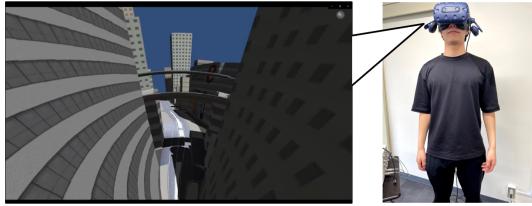


Fig.6 Presentation of visual information by using the virtual environment

操作する。

3・3 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を提示する。

3・4 視覚の提示

視覚を用いた提示は、図6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、ペクション（自己誘導性自己運動感覚）と呼ばれる錯覚を用いる。ペクションとは、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⁽²⁶⁾。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・5 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。

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⁽²⁷⁾。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、翼からの情報を提示する。

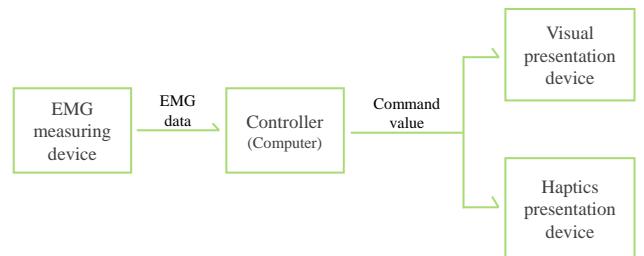


Fig.7 Experimental environment system

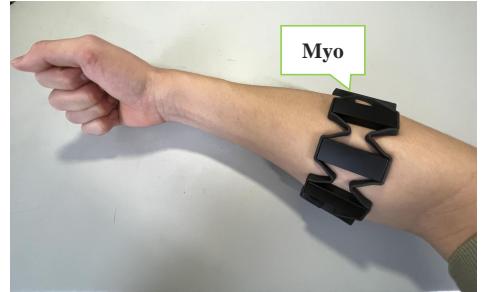


Fig.8 Myo (Thalmic Labs)

4. 提案手法を用いた身体像拡張の主観評価実験

4・1 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。図7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(Unity)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8)⁽²⁸⁾とMyoWare(図9)⁽²⁹⁾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

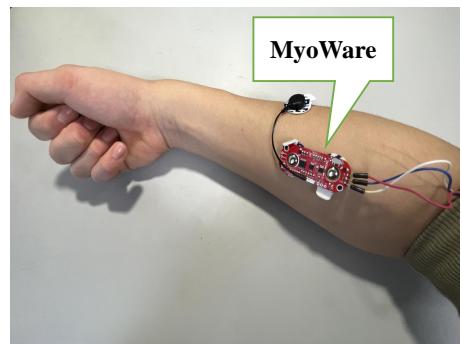


Fig.9 MyoWare (Advancer Technologies LLC)

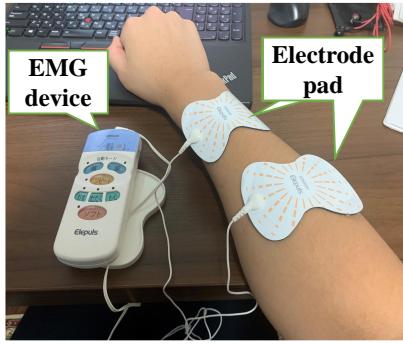


Fig.10 HV-F122 (Omron 社)



Fig.11 Meta Quest (Meta Platforms Inc.)

低周波治療器 Omron HV-F122 (図 10)⁽³⁰⁾ 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 Quest (図 11)⁽³¹⁾ を使用する。視覚提示する際に使用する仮想翼を図 12 に示す。

4.2 操作・提示方法の検討

表 4.2 に比較項目を示す (FPP...First Person Perspective, TPP...Third Person Perspective) 。

4.2.1 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⁽³²⁾ 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

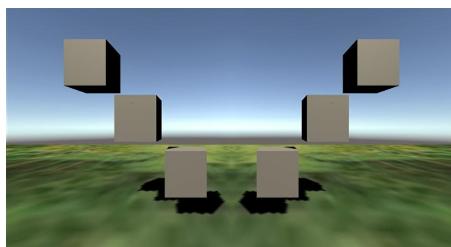


Fig.12 Virtual Wings skeleton

Table 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

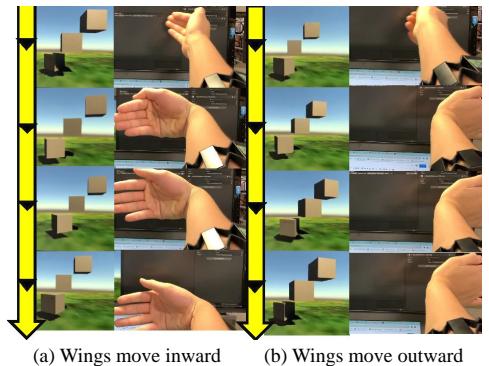


Fig.13 Manipulation of virtual wings skeleton using Myo

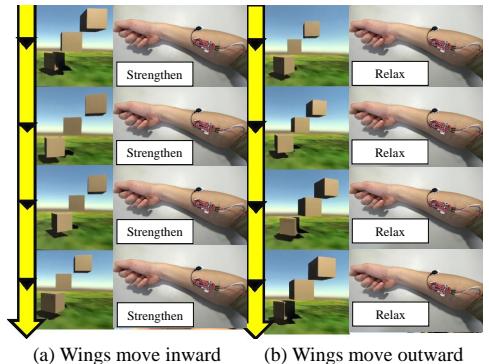


Fig.14 Manipulation of virtual wings skeleton using MyoWare

示、視覚は仮想翼の 3 人称視点を液晶ディスプレイ (図 13 , 図 14) に描画し提示する。

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 13 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、腕に装着した Myo を翼が内側に羽ばたく際に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・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可能であることを確認した。

4.2.2 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なる。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 14) 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

Table 2. Results of an experiment using vibration as a haptics presentation

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

Table 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	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
Position(Sensing/Haptics)	Arm/Abs	Chest/Abs	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。
Sense of having wings	3	3	4・3 操作・提示位置の検討
Sense of maneuvering the wings	3	3	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
Sense of air resistance	4	4	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。
Sense of flying with wings	3	4	4・3・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 ⁽³⁴⁾ 。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15）。
Position(Sensing/Haptics)	Arm/Back	Chest/Back	4・3・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 ⁽³⁵⁾ 、胴体部の触知覚の割合が少ない ⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ 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。
Sense of having wings	5	5	5. 主観評価実験を踏まえた位置による身体像拡張の差異
Sense of maneuvering the wings	3	4	を評価する被験者実験
Sense of air resistance	4	4	
Sense of flying with wings	4	5	

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・2・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10）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

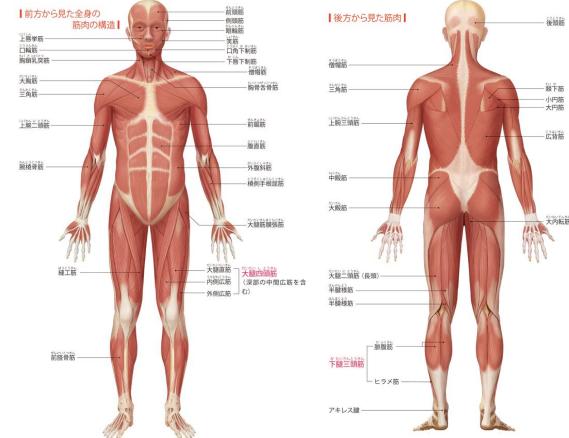


Fig.15 Muscle structure⁽³³⁾

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・3 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行った。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行った。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行った。

4・3・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⁽³⁴⁾。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15）。

4・3・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⁽³⁵⁾、胴体部の触知覚の割合が少ない⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾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。

5. 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 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。

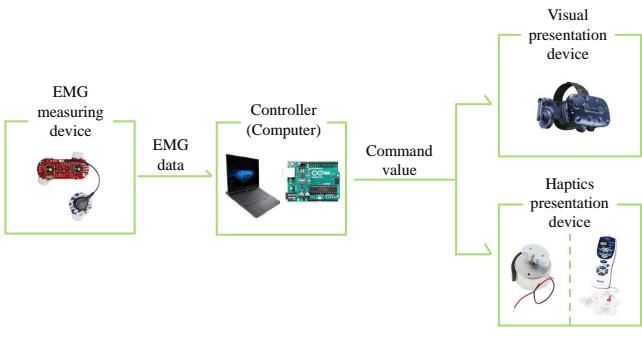


Fig.16 Experimental environment system

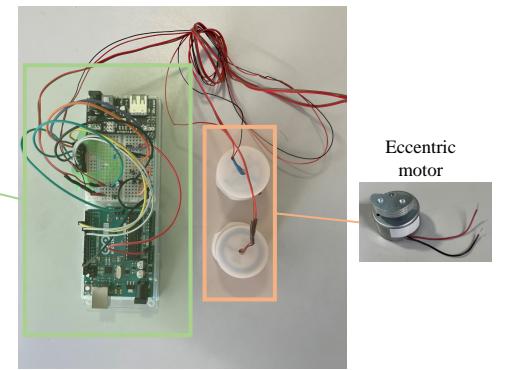


Fig.19 Haptics display device (Vibration)



Fig.17 HTC VIVE PRO EYE

5.2 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（「翼で飛び感覚を提示する 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マーリングリスト、掲示、アルバイト募集用 WEB サイトなどを利用して行う。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。

5.3 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 16 のような環境のシステムで実験を行う。

筋電計測装置には MyoWare（図 9）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

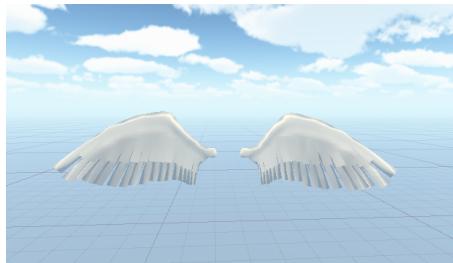


Fig.18 Virtual Wings

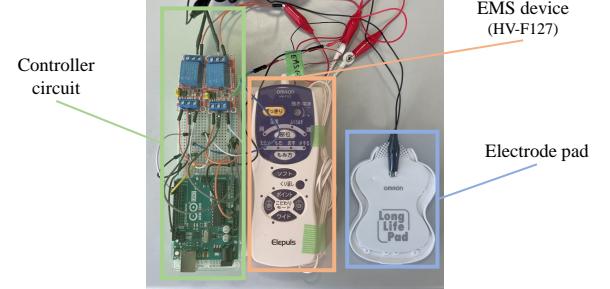


Fig.20 Haptics display device (EMS)

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 17⁽³⁹⁾ を用いる。VIVE PRO EYE を用いて、仮想翼（図 18）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 19 と図 20 を用いる。図 19 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 19 は、低周波治療器（Omron HV-F127⁽⁴⁰⁾）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(1)）に設定する。

$$g' = 1.62 [m/s^2] \quad (1)$$

また、飛行の際に式(2)のような、速度に比例した空気抵抗 $R [N]$ を与える。

$$\mathbf{R} = k\mathbf{v} [N] \quad (2)$$

k は比例定数 ($k = 5.0$)。

VR 空間内で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に設計する（図 21）。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⁽⁴¹⁾）ことができる。この際発生する力 $F [N]$ は式(3)に従う。

$$\mathbf{F} = \frac{a}{l} \tanh\left(\frac{x}{a}\right) [N] \quad (3)$$

$$l = \begin{cases} 400 \\ 500 \end{cases} \quad (4)$$

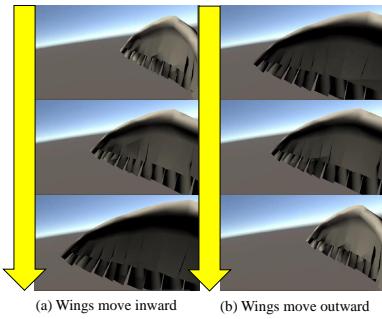


Fig.21 Movement of Virtual Wings

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) の変化するようにする .

$$P = a \tanh\left(\frac{x}{a}\right) [N] \quad (5)$$

5.4 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⁽⁴²⁾ 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 .

- 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 .

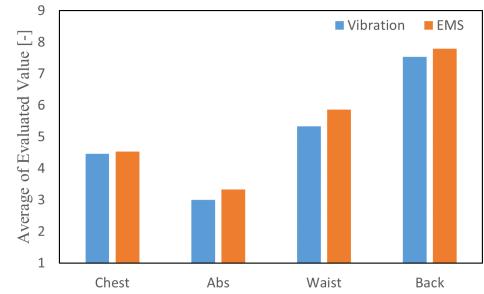


Fig.22 Comparison of haptics display positions

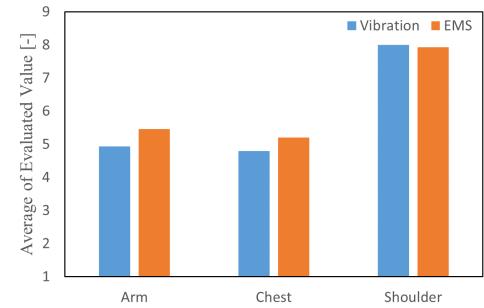


Fig.23 Comparison of EMG measuring position

- 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 .

5.5 実験結果と考察

図 22 , 図 23 , 図 24 , 図 25 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 22 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 23 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

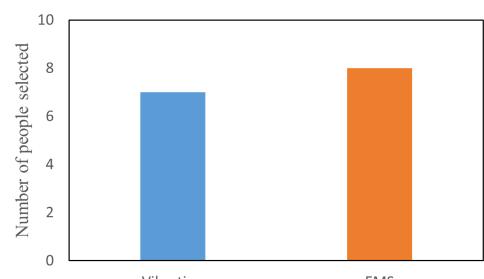


Fig.24 Comparison of Vibration and EMS

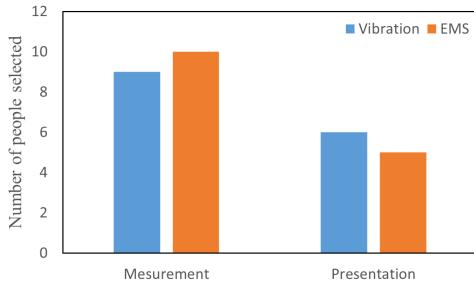


Fig.25 Comparison of measuring position and haptics presentation position

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24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23、図22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25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⁽²⁵⁾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。

6. 結論および今後の展望

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装置による力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。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・後面の要素が重要なことが分かった。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效であること、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。そして、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。

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⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾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⁽³⁴⁾。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、飛行しながらの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。

文 献

- (1) Gravity Industries. Gravity industries: Flight club, 最終閲覧日 2022-01-09. [https://www.fitness-gaming.com/profiles/company/hypersuit.html](https://gravity.co/>.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 Cherpllod, David Atienza, and Dario Floreano. Flyjacket: An upper body soft exoskeleton for immersive drone control. <i>IEEE Robotics and Automation Letters</i>, Vol. 3, No. 3, pp. 2362–2369, 2018.
(5) Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In <i>ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies</i>, pp. 1–1. 2014.
(6) Guandalini R. and G. Agate. Hypersuit. <a href=), Jul 2017.
- (7) Henry Head and Gordon Holmes. Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, Vol. 34, No. 2-3, pp. 102–254, 1911.
- (8) 乾敏郎. 感覚・知覚・認知の基礎. オーム社, 2012.
- (9) Kazumichi Matsumiya. Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control. *Scientific reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–14, 2021.
- (10) 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.
- (11) Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- (12) Susumu Tachi. Telexistence. In *Virtual Realities*, pp. 229–259. Springer, 2015.
- (13) 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.
- (14) Mel Slater, Daniel Pérez Marcos, Henrik Ehrsson, and María V Sanchez-Vives. Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 2, p. 6, 2008.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.

- (18) 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.
- (19) 岩垂真哉. 余剰筋力を用いた第三の腕口ポットの操縦. Master's thesis, 東京農工大学, 2017.
- (20) 岩垂真哉, 水内郁夫. 余剰筋力を用いた第三の腕口ポットの操縦. 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.
- (21) 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.
- (22) 本間元康. ラバーハンドリュージョン: その現象と広がり. 認知科学, Vol. 17, No. 4, pp. 761–770, 2010.
- (23) H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1048–1048, 2007.
- (24) Sotaro Shimada, Kensuke Fukuda, and Kazuo Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS one*, Vol. 4, No. 7, p. e6185, 2009.
- (25) 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.
- (26) 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.
- (27) 小川剛史, 中張遠太郎, 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.
- (28) Thalmic Labs. Thalmic labs myo. <https://developerblog.myo.com/author/thalmic-labs/>, 2022. (Accessed on 01/20/2022).
- (29) Advancer Technologies. Myoware muscle sensor datasheet. <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MyowareUserManualAT-04-001.pdf>, 2015. (Accessed on 01/20/2022).
- (30) 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).
- (31) Meta Platforms. Meta quest. https://www.oculus.com/?locale=ja_JP. (Accessed on 01/20/2022).
- (32) 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.
- (33) 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.
- (34) 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.
- (35) Wilder Penfield and Theodore Rasmussen. The cerebral cortex of man; a clinical study of localization of function. 1950.
- (36) James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.
- (37) 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.
- (38) 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 回日本理学療法学術大会 抄録集), pp. A1042–A1042. 公益社団法人日本理学療法士協会, 2005.
- (39) HTC. Vive japan. <https://www.vive.com/jp/>. (Accessed on 01/19/2022).
- (40) 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).
- (41) 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).
- (42) R Lickert. The method of constructing an attitude scale, in (ed) fishbein, m. *Readings in attitude theory and measurement*, 1932.
- (43) 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.
- (44) 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.