

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

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。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) 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、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 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⁽¹⁾や身体補助メカニズムを用いた飛行体験装置の提案⁽²⁾等がある。

「羽ばたいて飛ぶ感覚」を与える研究について、大型の操縦装置に搭乗し、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⁽³⁾。しかしこの方法の場合、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。

2. 身体像の拡張

本研究において、ヒトに本来存在しない「翼」を感じさせる(存在)こと、翼で「羽ばたいて飛ぶ感覚」を提示する

こと(運動)の2つの要素が重要となる。これらの感覚を提示するため、身体像の拡張について注目する。

2-1 身体像

ヒトは身体像 (Body image)⁽⁴⁾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。自己所有感とは、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。自己主体感とは、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。

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。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扱い球を打ち返すといった事が挙げられる。

身体像拡張は、大きく分類して2種類存在する。1つはラバーハンド錯覚 (RHI: Rubber Hand Illusion)⁽⁵⁾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。

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⁽⁶⁾。この研究では、道具使用時の二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パイモダニューロンの活動を観測することにより、サル身体像が道具先端まで拡張している事を示した。

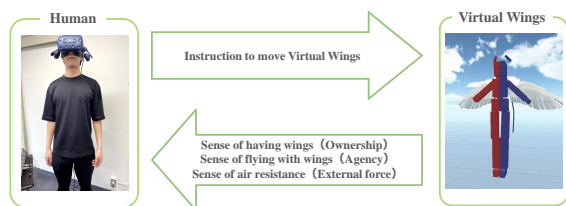


Fig.2 Method of body image expansion

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口ポットやアバタを、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⁽⁷⁾。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⁽⁸⁾。

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）が期待できることを確認した。そこで、本研究では図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。

3. 四肢から独立した翼の提示方法

前節で述べたように、本研究では図2のような形で身体像の拡張を行う。

3.1 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。

3.2 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。

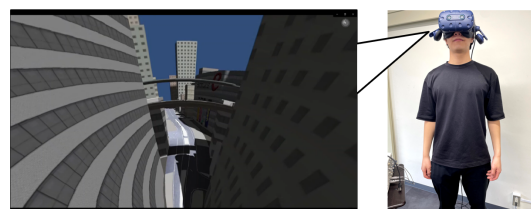


Fig.3 Presentation of visual information by using the virtual environment

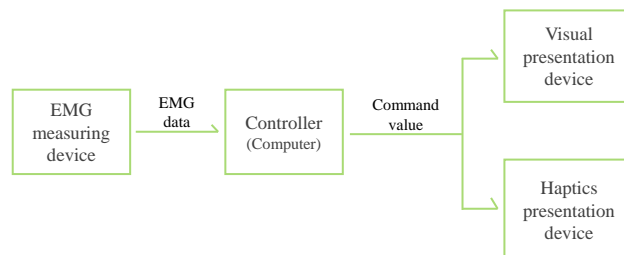


Fig.4 Experimental environment system

3.3 視覚の提示

視覚を用いた提示は、図3のようにPCソフトウェア（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、視野の大部分に一樣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⁽⁹⁾。

背中からはえた翼の一部が見える様子は、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写されるようにする。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写を行う。

3.4 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、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に、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。

振動を用いた触覚提示は、偏心モータによる振動の提示を行う。

電気刺激を用いた触覚提示は、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、疑似的に触覚を提示する方法を用いる。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.5 EMG devices (Left: Myo, Right: MyoWare)

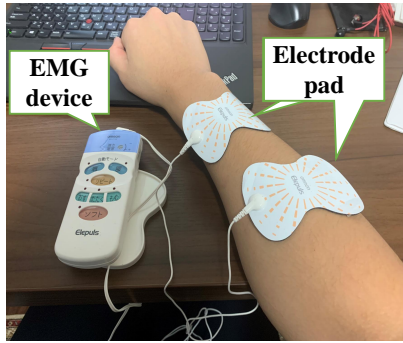


Fig.6 HV-F122 (Omron 社)

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 4 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 5 左) と MyoWare (図 5 右) の 2 つを用意する．

次に，触覚提示については，振動と EMS を用いた触覚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，EMS での触覚提示は低周波治療器 Omron HV-F122 (図 6) 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，液晶モニターと HMD (Head Mounted Display) 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 を使用する．視覚提示する際に使用する仮想翼を図 7 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) ．

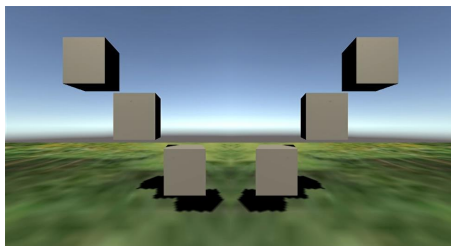


Fig.7 Virtual Wings skeleton

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

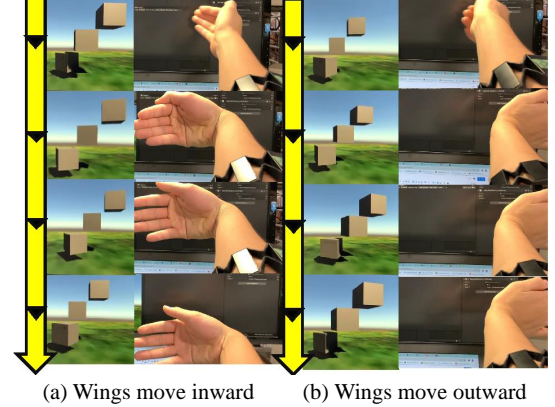


Fig.8 Manipulation of virtual wings skeleton using Myo

4.3 翼の操作方法の比較

まず，翼の操作方法について比較を行う．筋電位を用いた操作は，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⁽¹⁰⁾ による操作に分類することが可能である．

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 (表 4.2) ．

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 8 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) は図 9 のように，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，腕に装着した Myo を翼が内側に羽ばたく際に振動させて行う．また，MyoWare は計測部位として，力み動作が容易な前腕・胸・肩をそれぞれ計測する．

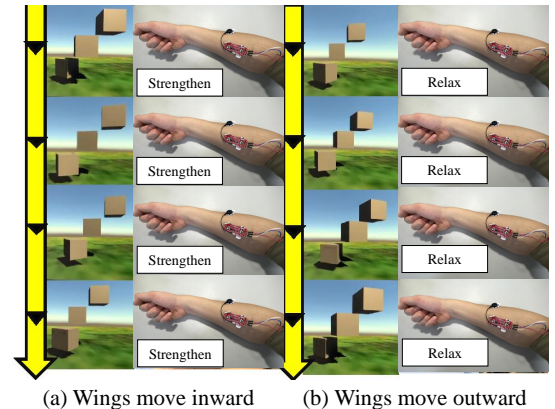


Fig.9 Manipulation of virtual wings skeleton using MyoWare

Table 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 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

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、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。

4.4 触覚提示方法の比較

次に、触覚提示方法について振動と EMS を用いた方法の比較を行う。

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(表 4.2)。翼の操作は 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 9)の提示を行う。

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リッカート尺度を用いた 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と言える。

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。

4.5 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を提示する。

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 6)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。

4.6 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。

4.7 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⁽¹¹⁾。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。

4.8 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⁽¹²⁾、胴体部の触知覚の割合が少ない⁽¹³⁾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 節より、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。被験者は、東京農工大学学生 15 名である。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」を通過している。被験者は東京農工大学掲示板より募集し、一回につき 1000 円分の Amazon ギフトカードを謝礼とした。

5.2 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 節の主観評価実験と同様に図 4 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??)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 HMD (VIVE PRO EYE (HTC 社))

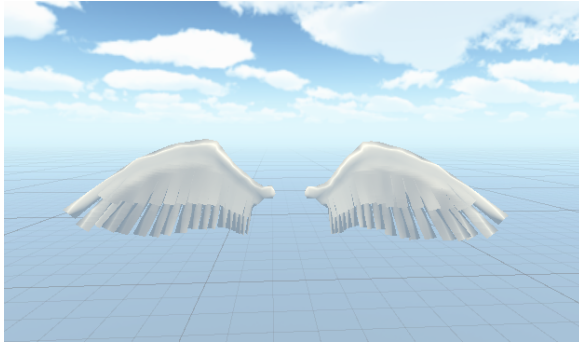


Fig.10 Virtual Wings

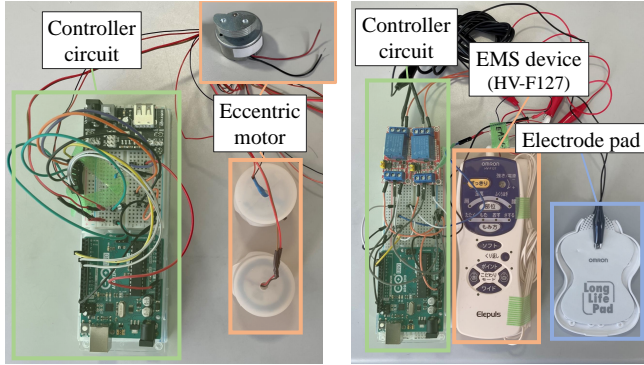


Fig.11 Haptics display device (Left: Vibration, Right: EMS)

を用いる。HMDを用いて、仮想翼（図10）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11を用いる。図11左は、偏心モータをArduinoから制御し振動を与える装置である。図11右は、低周波治療器（Omron HV-F127）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。

$$R = kv [N] \quad (2)$$

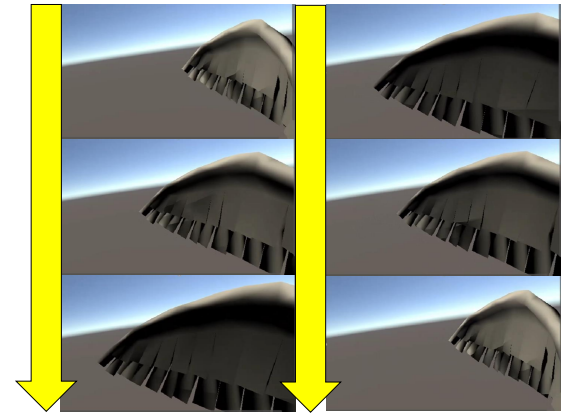
k は比例定数 ($k = 5.0$)。

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12）。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ことができる。この際発生する力 $F [N]$ は式(3)に従う。

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

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

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。



(a) Wings move inward (b) Wings move outward

Fig.12 Movement of Virtual Wings

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。

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

5.3 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。筋電計測位置は上腕二頭筋（動的収縮）・大胸筋（静的収縮）・僧帽筋（静的収縮）、触覚提示位置は首・腹・腰・背中、触覚提示種類は振動・電気と比較する。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。
- 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。

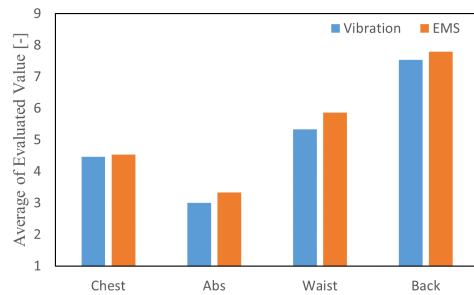


Fig.13 Comparison of haptics display positions

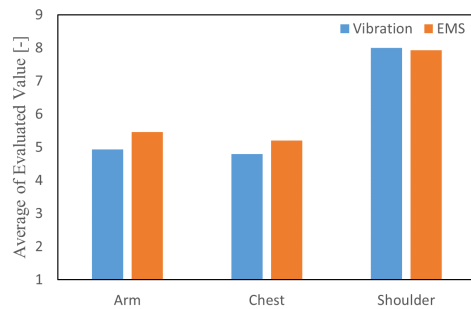


Fig.14 Comparison of EMG measuring position

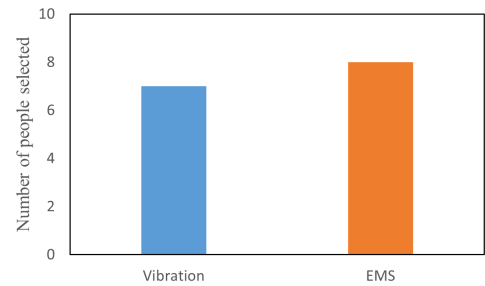


Fig.15 Comparison of Vibration and EMS

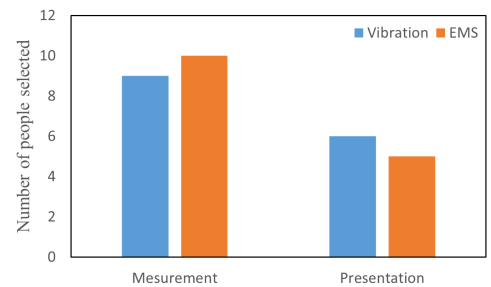


Fig.16 Comparison of measuring position and haptics presentation position

5.4 実験結果と考察

図 13, 図 14, 図 15, 図 16 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 13 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 14 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、筋肉の位置に近い腕（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 15 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 14, 図 13 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 16 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。RHI の研究例で、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. 結言

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。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。

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や、験に用いた装置の改良が考えられる。また、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。

文 献

- (1) 奥川夏輝, 古賀育, 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 回日本バーチャリアリティ学会大会論文集, pp. 673-676, 2017.

- (2) 鈴木拓馬, 矢野裕季, 安藤英由樹, 清川清ほか. Hmd および身体補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.
- (3) Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, pp. 1–1. 2014.
- (4) Henry Head and Gordon Holmes. Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, Vol. 34, No. 2-3, pp. 102–254, 1911.
- (5) Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘ feel ’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- (6) 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.
- (7) H Henrik Ehrsson. The experimental induction of out-of-body experiences. *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1048–1048, 2007.
- (8) 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.
- (9) 妹尾武治. ベクシオンとその周辺の近年の動向. 認知科学, Vol. 21, No. 4, pp. 523–530, 2014.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Wilder Penfield and Theodore Rasmussen. The cerebral cortex of man; a clinical study of localization of function. 1950.
- (13) James J Gibson. Observations on active touch. *Psychological review*, Vol. 69, No. 6, p. 477, 1962.