

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
工学部 機械システム工学科

令和2年度入学

20643010

遠藤 健

目 次

第 1 章	ロボメック 2021 の内容	7
1.1	緒言	9
1.1.1	浮遊感・飛ぶ感覚・羽ばたいて飛ぶ感覚の定義	9
1.1.2	関連研究	10
1.1.3	研究目的	11
1.1.4	身体像の拡張	11
1.1.5	ヒトから仮想翼	12
1.2	実験装置のシステム	14
1.2.1	力覚提示として EMS を用いた実験	17
1.3	被験者実験	22
1.4	結言	23
第 2 章	序論	25
2.1	研究の背景	27
2.2	浮遊感・飛ぶ感覚・羽ばたいて飛ぶ感覚の定義	28
2.3	研究の目的	28
2.4	本論文の構成	29
第 3 章	関連研究	31
3.1	はじめに	33
3.2	関連研究	33
3.3	おわりに	33
第 4 章	四肢から独立した翼の提示方法	35
4.1	はじめに	37
4.2	ラグランジュ法を用いた運動方程式の導出	37
4.3	ルンゲクッタ法による数値積分	37
4.4	おわりに	37
第 5 章	最急降下法による着地動作のためのモータ入力最適化	39
5.1	はじめに	41
5.2	着地姿勢の評価関数	41

5.3	アルゴリズム	41
5.4	おわりに	41
第 6 章	直列弾性要素を有するモータ 1 自由度跳躍ロボットの動作実験	43
6.1	はじめに	45
6.2	跳躍動作実験	45
6.3	着地姿勢制御実験	45
6.4	おわりに	45
第 7 章	結論および今後の展望	47
7.1	結論	49
7.2	今後の展望	49
謝辞		50
参考文献		50

第1章

ロボメック 2021 の内容



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

1.1 緒言

ヒトは古くから空を飛ぶことに憧れを抱いている．実際に飛ぶことにはリスクやコストが伴うが，VR 装置を使用することで簡単に飛行体験が可能である．図 2.1 は，四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ様子を示した物である．本研究では，VR 装置を用いて図 2.1 のように羽ばたいて飛ぶ感覚の提示手法を提案する．

1.1.1 浮遊感・飛ぶ感覚・羽ばたいて飛ぶ感覚の定義

本研究では「羽ばたいて飛ぶ感覚」を「浮遊感」，「飛ぶ感覚」を用いて次のように位置づける．「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．

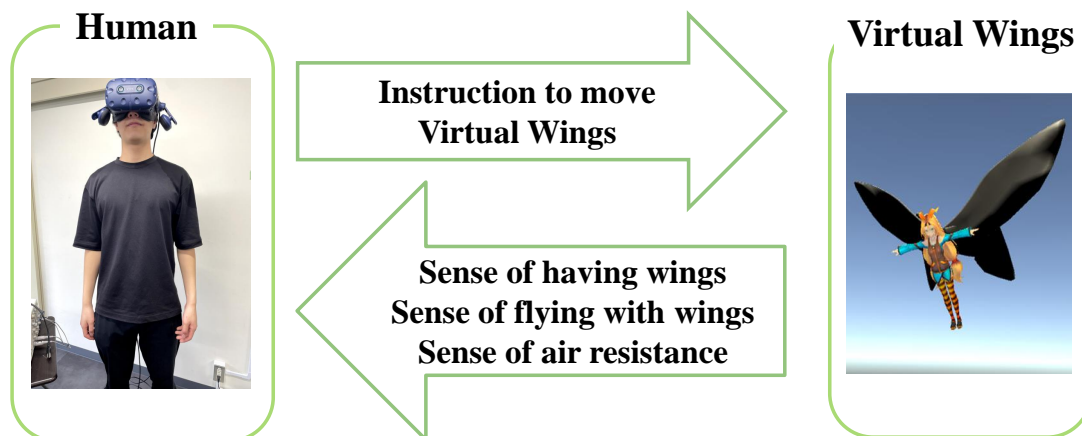


Fig. 1.2: Research concept

1.1.2 関連研究

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．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ヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）によって与えることで飛ぶ感覚を提示する研究 [3] もある．

浮遊感と飛ぶ感覚の研究に対して，鳥のように羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究はまだ少ない．羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究の例としては，飛行中の鳥の体験をすることができる装置である Birdly[4] や Hypersuit[5] がある．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．

1.1.3 研究目的

従来の羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究は、ヒトが鳥のように腕を動かすことによって羽ばたいて飛ぶ感覚を提示していた。しかし、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において、図 2.1 のような背中から翼が生えた生物になる感覚を提示する研究はまだ着目されていない。

そこで四肢から独立した翼を用いて、羽ばたいて飛ぶ感覚を提示する方法を提案する。本研究では、四肢を用いずに翼を操作している感覚の提示手法と VR 空間で翼に作用する力をヒトに提示する手法を考案する。これにより、羽ばたいて飛んでいる状態での投擲や射撃が可能となる。これらのように飛行体験中に手足を使用する新しいアプリケーションが期待できる。

本研究では、ヒトに翼が生えている感覚を与えるために、身体像の拡張について注目をする。

1.1.4 身体像の拡張

ヒトは身体像と呼ばれる、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。しかし、自己以外の部分に身体像が拡張する場合がある。身体像の拡張に関する代表的な研究として、ラバーハンドをあたかも自分の手のように感じるラバーハンド錯覚についての研究がある [6]。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。このように提示される視覚情報と、触覚情報の位置が一致または近しければ身体像を拡張することが可能となる。ラバーハンド錯覚ではヒトは情報を受けとるだけであったが、ヒトから情報を送信し、それに対する返信を受け取ることで身体像の拡張をより円滑にすることができると考える。

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 2.2 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、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。

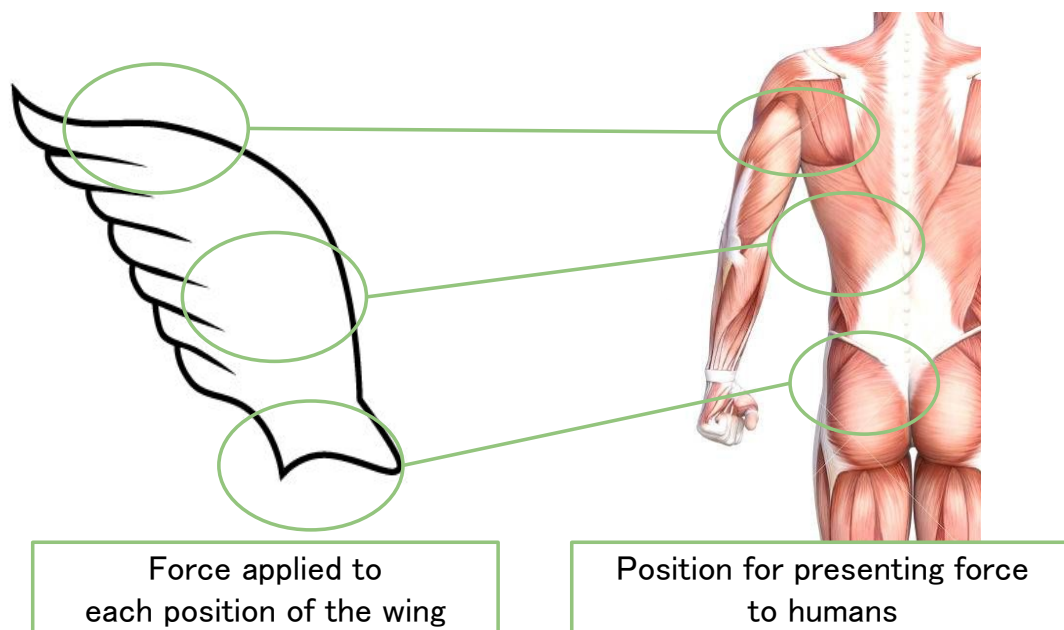


Fig. 1.3: How to present force applied virtual wings

1.1.5 ヒトから仮想翼

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。

ヒトから仮想翼を操作する方法として、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、四肢以外で動かすことが目的なので、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、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翼を操作する。

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主に五感が挙げられる。ヒトへ働きかける情報として、五感の中でも力覚（触覚）と視覚、聴覚が重要と考えた。聴覚に関しては空間的的定位、ここでは翼のある場所を認識する場合において、一般的に視覚よりも情報としての重要度が低い[7]なので今回は不採用とする。以上を踏まえて本研究では、五感の中でも力覚（触覚）と視覚を用いて仮想翼からの情報を提示する。

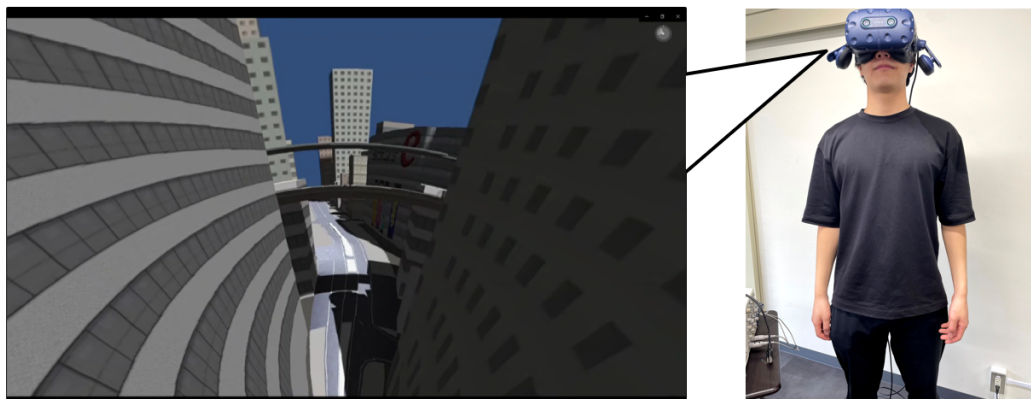


Fig. 1.4: Virtual presentation by HMD

力覚を用いた仮想翼からヒトへの情報提示

力覚を用いた提示は、図 1.3 のように羽ばたく際に翼の場所ごとに作用する力を、ヒトの体に対応させることで、翼が連動的にしている様子を伝える。

力覚提示の種類として 2 種類について比較した。1 つ目は、モータによる振動または押す力を活用し力覚を提示する。2 つ目は、EMS（神経筋電気刺激療法）という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、筋肉の増強や萎縮の予防等をする治療法を用いたものである。EMS により筋肉を収縮させることで、疑似的に重量を知覚させる研究がある [8]。本研究では、EMS 機器により筋収縮を起こすことで疑似的に力覚を提示する。

視覚を用いた仮想翼からヒトへの情報提示

視覚を用いた提示は、図 1.4 のように Unity で作成した映像を HMD に出力することで行う。HMD に出力される映像は、空中を移動している様子と背中から翼が生えている様子である。

空中を移動している様子の提示について述べる。ベクシオンと呼ばれる、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がある [9]。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。浮遊感に関する研究で、ベクシヨ

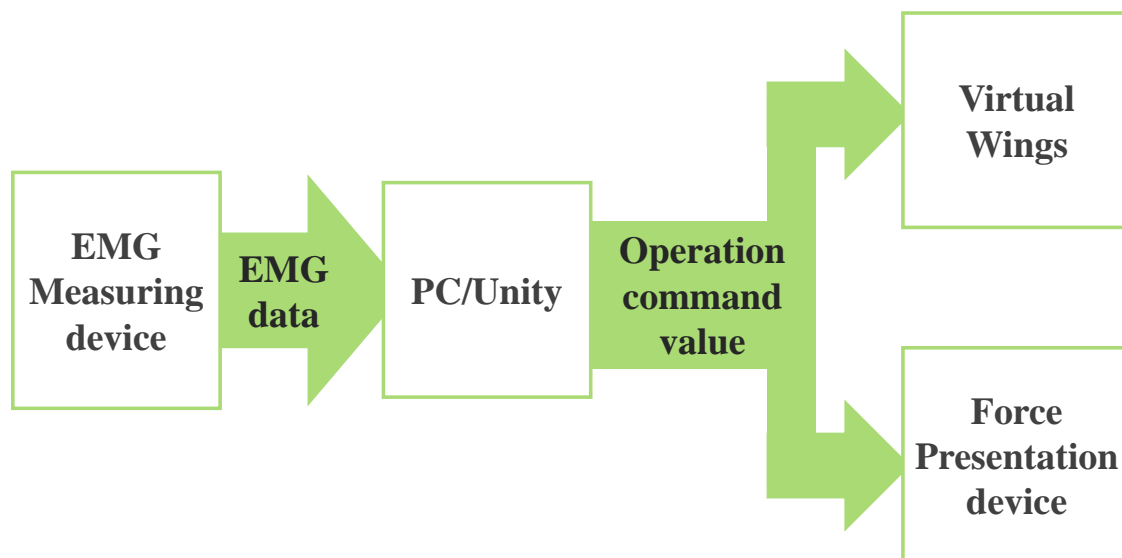


Fig. 1.5: Experiment equipment system

ンによる落下感覚を分析した研究がある [1]。空中を移動している様子の提示はベクションを用いる。

背中から翼が生えている様子は、使用者の背中から翼が生えている可のような映像を出力することで再現する。

1.2 実験装置のシステム

本稿では図 1.5 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) に送り、そこから仮想翼と力覚提示装置を動作させるシステムを作成した。また、このシステムを用いて力覚提示方法として振動と EMS を使用した実験を行った。

力覚提示として振動を用いた実験の環境としては、ヒトから仮想翼の部分 (筋電の計測) と仮想翼からヒトへの振動提示の両方を、筋電センサーを搭載したマルチジェスチャーハンドである Myo (図 1.6(a), Thalmic 社) で行った。

また視覚提示として用いた仮想翼は図 1.7(b) に示すものを用いた。

仮想翼の操作は図 1.8 のように、手首を内側に曲げると翼も内側に羽ばたき、手首を外側に曲げると翼が外側へ開くように設計した。また、力覚提示は翼が内側に羽ばたく際に合わ



Fig. 1.6: Myo

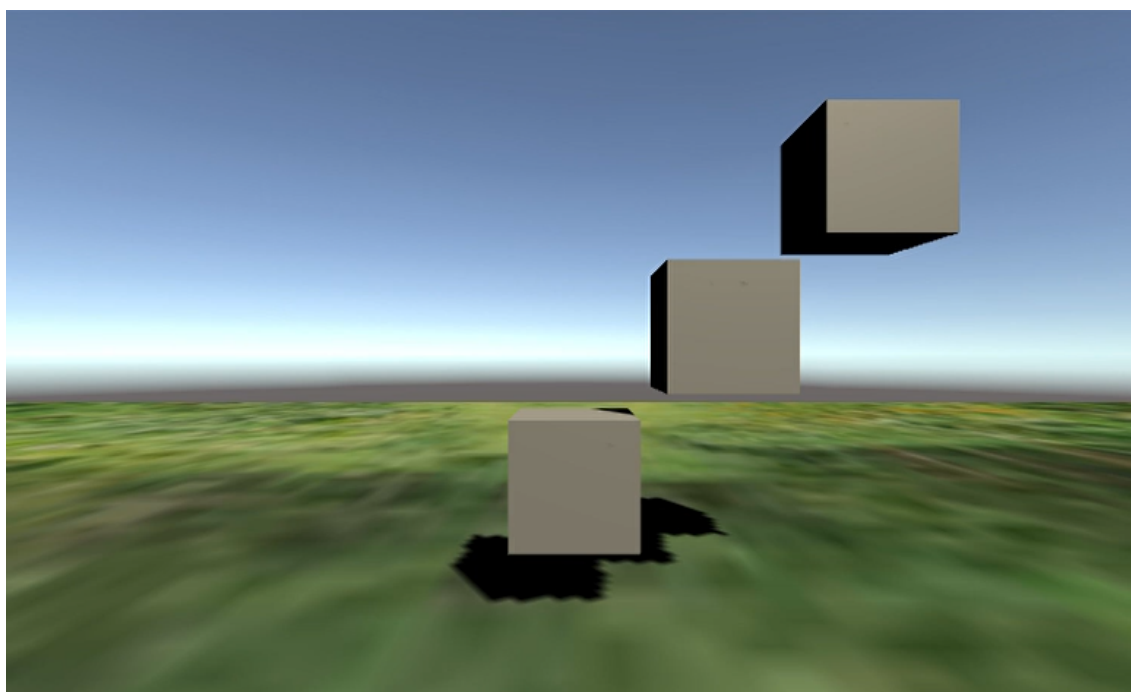


Fig. 1.7: Virtual Wings model version 1

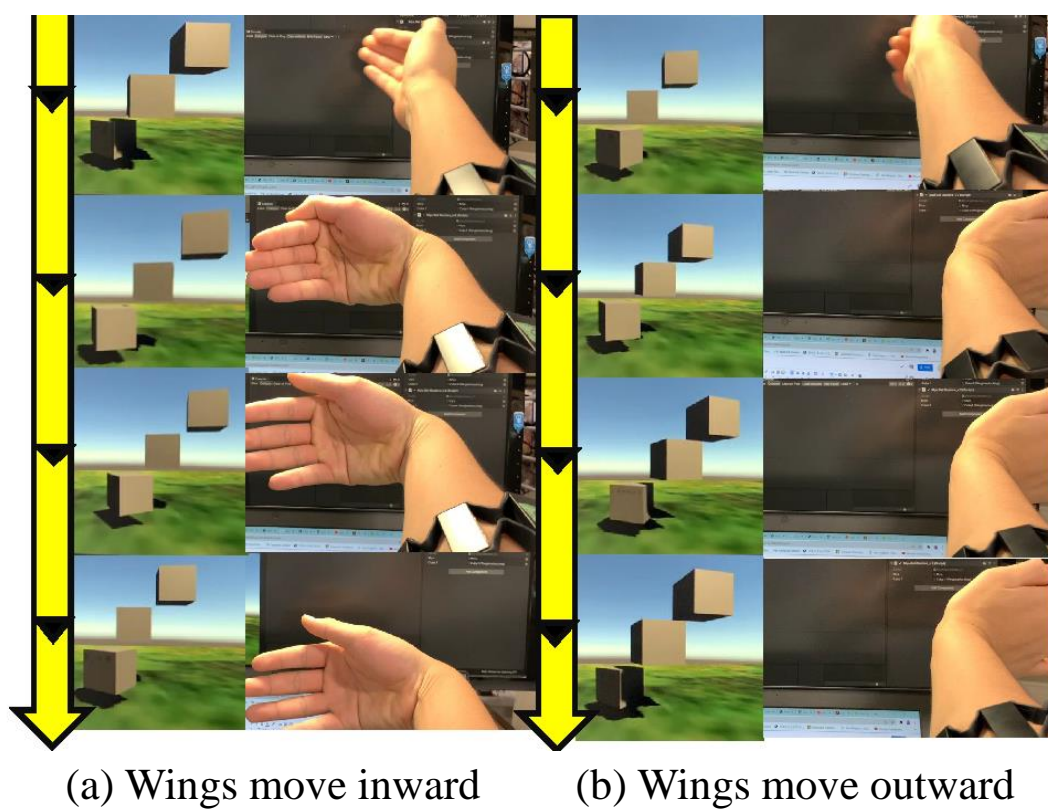


Fig. 1.8: Manipulation of virtual wings skeleton using Myo

せて Myo が振動するように行った．

表 1.1 に，実験中の没入感に関する各項目に対する主観評価を示す．

Table 1.1: Results of an experiment using vibration as a force sense presentation

Position(EMG/Vibration)	Arm/Arm
Sense of having wings	1
Sense of maneuvering the wings	4
Sense of flying with wings	1
Sense of air resistance	4

実験より主観ではあるが，力覚提示として振動を用いることの有用性，3 人称視点での視覚提示の不十分であることを確認した．また，ジェスチャーによる仮想翼の操作は関節動作を伴いことで不要な疲労感を生む．これは飛行体験において翼の操作における障害となり，没入感の妨げになると考えられる．飛行体験において，力みといった関節動作を伴わない筋収縮による仮想翼の操作が有用である．

1.2.1 力覚提示として EMS を用いた実験

力覚提示として EMS 機器を用いた実験では，筋電計測装置として MyoWare (図 1.9(a), AdvanceerTechnologies 社)，EMS 機器として低周波治療器 HV-F122 (図 1.10(b), Omron 社) を使用した．視覚提示する仮想翼としては図 1.11(c) のモデルを図 1.12 のように 1 人称視点して提示した．

また実験の際，筋電計測位置を腕と胸，腹，力覚の提示位置を腕，腹，背中の複数箇所を別々に計 8 通り行い，位置ごとの没入感の違いについて確認した．

翼の操作方法としては，筋電計測箇所の筋肉を力ませると翼が内側へ羽ばたき，弛緩させると翼が外側を開くように設計した．EMS 装置による力覚提示は翼が内側へ羽ばたく際に行うものとした．

表 1.2 に，実験中の没入感に関する各項目に対する主観評価を示す．

表 1.2 より，力覚の提示位置が背中に近づくほど没入感に関する評価が高くなっている．EMS 装置を用いた力覚提示の有効性，没入感において筋電計測位置よりも力覚提示位置の方が重要であることを確認した．さらに，本来人間に備わっていない部位である翼の存在を感じ，それを操作している感覚も得られた．

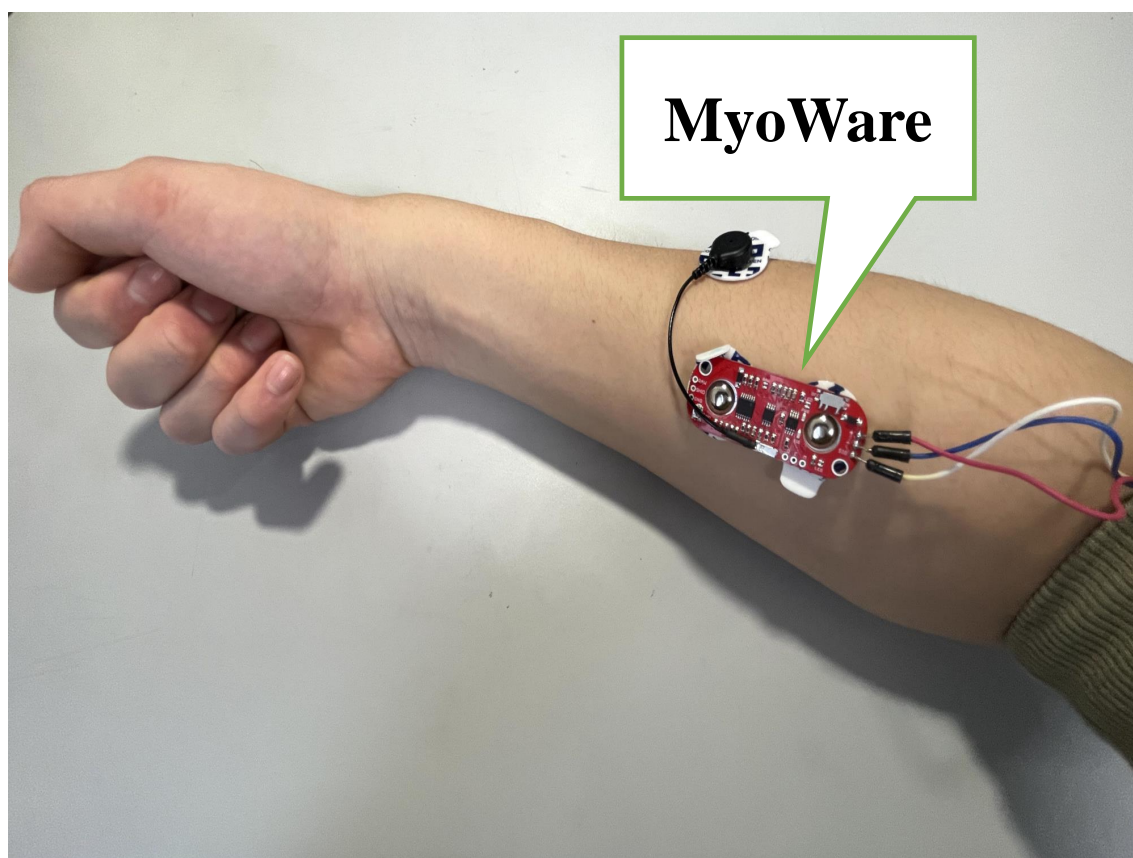


Fig. 1.9: MyoWare

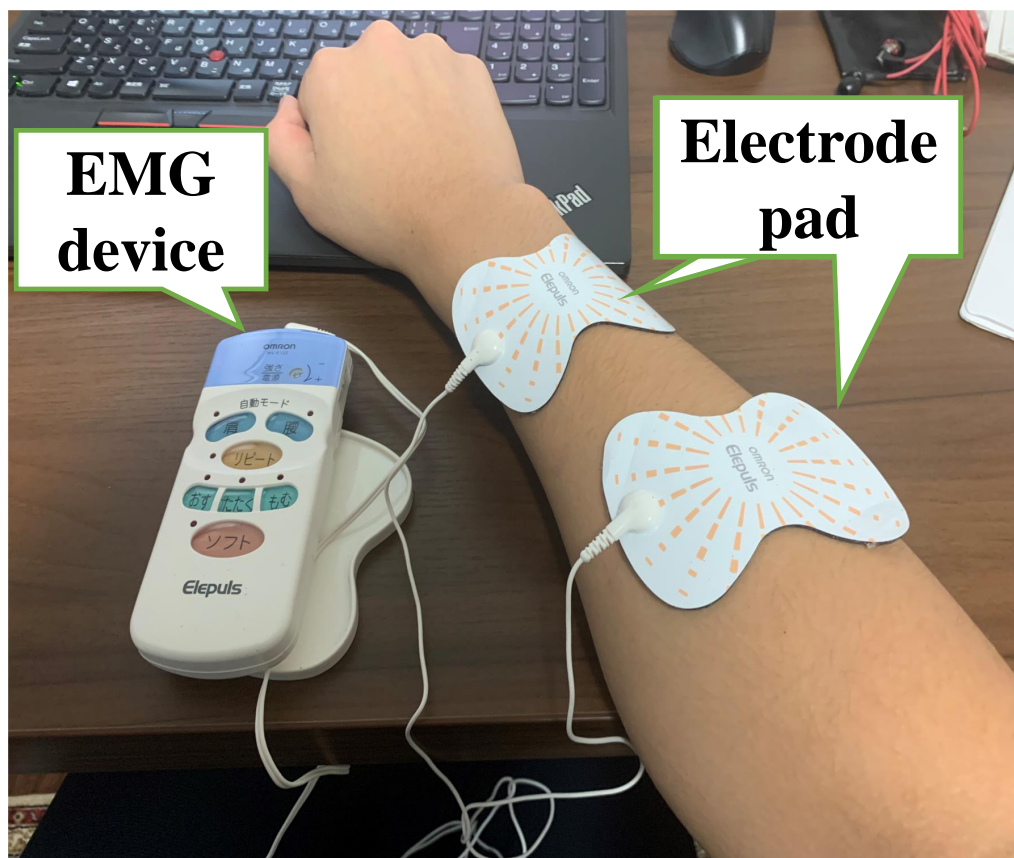


Fig. 1.10: EMG device

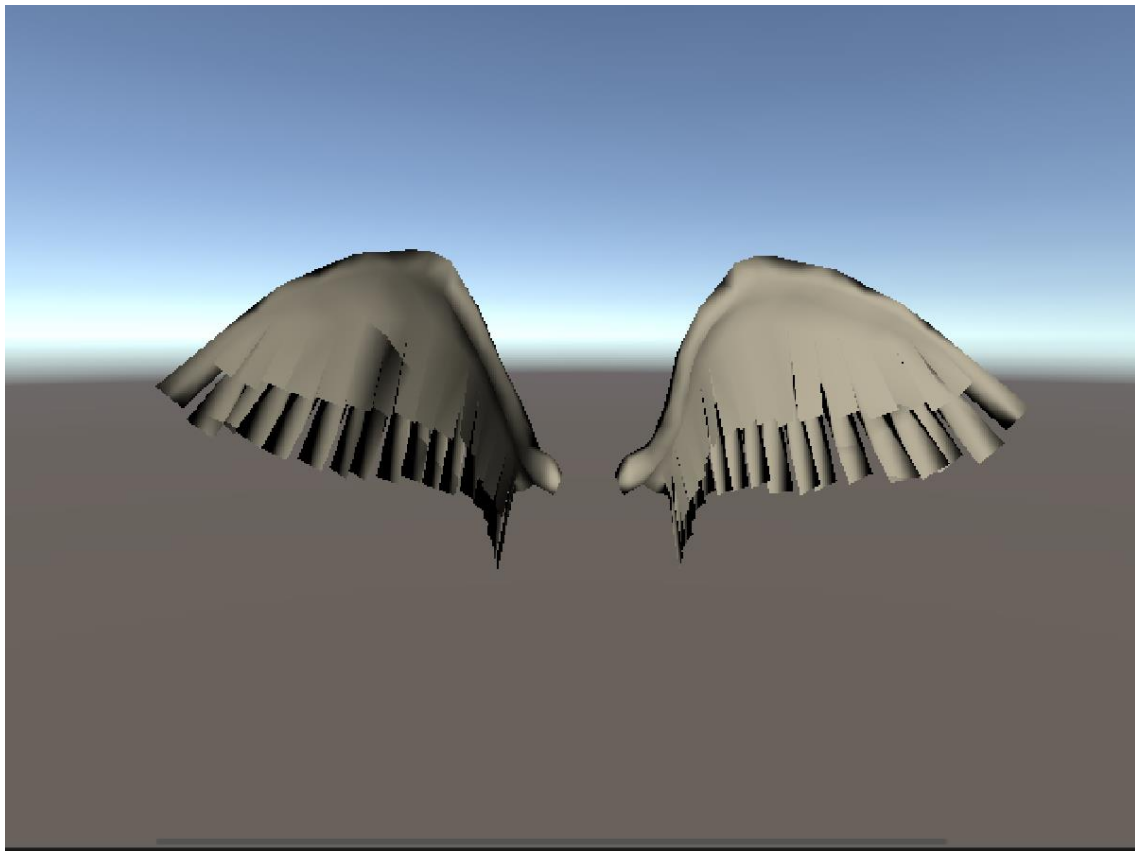


Fig. 1.11: Virtual Wings model version 2

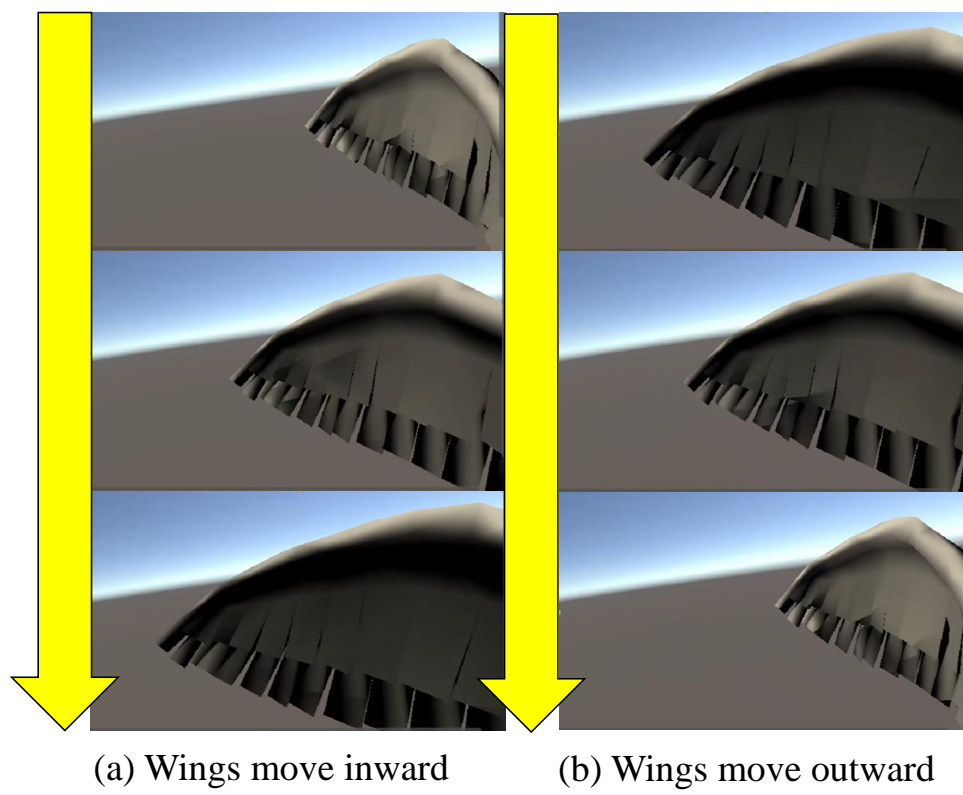


Fig. 1.12: Virtual presentation of Virtual wings

Table 1.2: Results of experiments using EMS as force sense presentation

Position(EMG/EMS)	Arm/Arm	Arm/Abs	Arm/Back
Sense of having wings	1	3	5
Sense of maneuvering the wings	3	3	3
Sense of flying with wings	3	3	4
Sense of air resistance	3	4	4
Position(EMG/EMS)	Chest/Arm	Chest/Abs	Chest/Back
Sense of having wings	2	3	5
Sense of maneuvering the wings	3	3	4
Sense of flying with wings	3	4	5
Sense of air resistance	3	4	4
Position(EMG/EMS)	Abs/Arm		Abs/Back
Sense of having wings	2		5
Sense of maneuvering the wings	4		5
Sense of flying with wings	3		5
Sense of air resistance	3		4

1.3 被験者実験

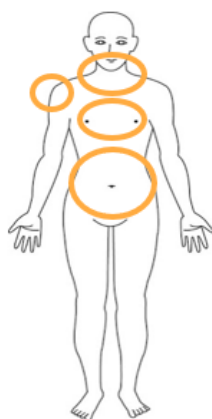
被験者実験では、筋電計測位置と羽ばたく感覚の提示位置を変化させた場合の没入感の違いについて検証する。

被験者は HMD、筋電計測装置、羽ばたく感覚の力覚提示装置を装着し、仮想翼を操縦する。この際、被験者の筋電のデータを記録する。筋電計測装置に関しては MyoWare を使用し体に直接貼り付けて計測を行う。筋電取得位置は関節動作を伴わない静的な筋収縮が容易な部位である胸肩部・腹部・臀部を検討している。羽ばたく感覚の力覚提示に関しては、ハプティックスーツ等による振動・押し力、または EMS 機器の筋収縮作用による疑似的な力覚提示によって行う。羽ばたく感覚の提示位置に関しては仮想翼が存在する背中から体の側面を検討している。

その後、操縦中の没入感に関してアンケートを行う。被験者へは筋電取得箇所と力覚提示提示位置ごと没入感の違いについての回答を得る。具体的には以下のような内容を検討している。

- 筋電計測位置別の没入感
- 力覚提示位置別の没入感
- 振動・押し力提示機器と EMS 機器の没入感

筋電計測位置



力覚提示位置

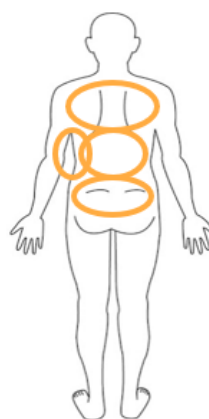


Fig. 1.13: position of measurement

- 筋電計測位置と力覚提示位置の重要性比較
- 一番没入感の高い組み合わせ

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。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。

1.4 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。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実験を行った。実験より主観ではあるが、力覚提示として振動と EMS 装置を用いることの有用性を確認し、ヒトに本来備わっていない部位である翼の存在を感じ、それを操作している感覚

を得た．

今後の展望として，ヒトによる没入感を調査するために被験者実験を行う．そして，筋電計測位置・力覚提示位置を変化させた場合の没入感の違いについて検証する．その結果から得られる最も評価が高い筋電計測位置・力覚提示位置より，没入感を向上させる．また，デバイスからヒトへの提示情報として前庭電気刺激による加速度感覚 [10][11] の追加し，さらに飛行体験の没入感を高めることも検討している．

第2章

序論



Fig. 2.1: Flying with flapping virtual wings independent of the limbs

2.1 研究の背景

ヒトは古くから空を飛ぶことに憧れを抱いている．実際に飛ぶことにはリスクやコストが伴うが，VR 装置を使用することで簡単に飛行体験が可能である．

図 2.1 は，四肢から独立した翼で羽ばたいて飛ぶ様子を示した物である．本研究では，VR 装置を用いて図 2.1 のように羽ばたいて飛ぶ感覚の提示手法を提案する．

従来の研究では，実際に腕を動かすことによって翼で羽ばたいて飛ぶ感覚を提示している．この方法の場合，大きく体を動かすことによる疲労感が生まれ，VR 体験に影響を与える（疲労感が VR 体験に影響を与えるかどうかのソースがあると説得力が上がる）

本研究では，四肢の動きを用いないで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 飛行体験の質（ ）が向上する．また，VR 飛行体験中に手足を用いた動作 (Ex. 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（質とは?）

被験者実験を行い，提案した手法の有効性を検証した．

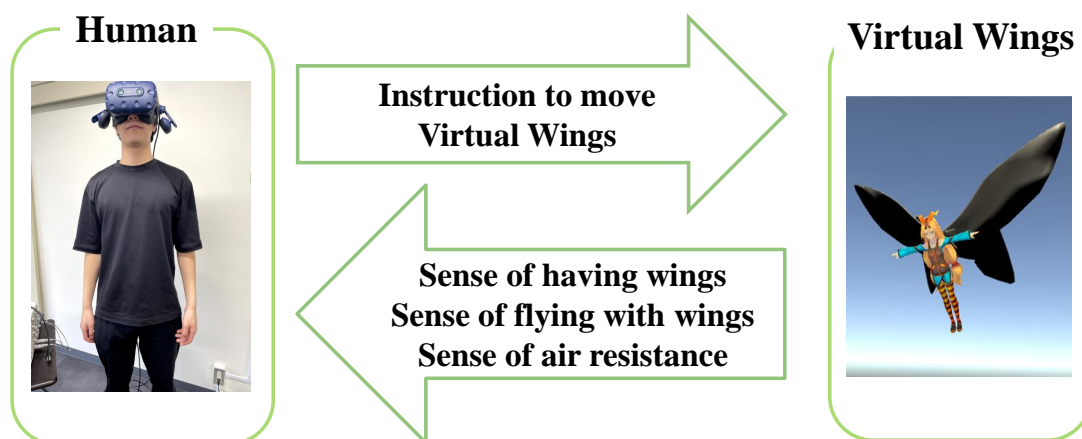


Fig. 2.2: Research concept

2.2 浮遊感・飛ぶ感覚・羽ばたいて飛ぶ感覚の定義

本研究では「羽ばたいて飛ぶ感覚」を「浮遊感」、「飛ぶ感覚」を用いて次のように位置づける。「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。

2.3 研究の目的

従来の羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究は、ヒトが鳥のように腕を動かすことによって羽ばたいて飛ぶ感覚を提示していた。しかし、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において、図 2.1 のような背中から翼が生えた生物になる感覚を提示する研究はまだ着目されていない。

そこで四肢から独立した翼を用いて、羽ばたいて飛ぶ感覚を提示する方法を提案する。本研究では、四肢を用いずに翼を操作している感覚の提示手法と VR 空間で翼に作用する力を

ヒトに提示する手法を考案する．これにより，羽ばたいて飛んでいる状態での投擲や射撃が可能となる．これらのように飛行体験中に手足を使用する新しいアプリケーションが期待できる．

本研究では，ヒトに翼が生えている感覚を与えるために，身体像の拡張について注目をする．

2.4 本論文の構成

本論文は以下のような構成になっている．

背景

目的

関連研究

(理論?身体像について, いままで調べてきたことは全てこれに繋がる (VR, 触覚, etc))

方法

結果

考察

おわり

第3章

関連研究

3.1 はじめに

本稿では関連動向調査分析と問題点・課題の提示を行う。(追加で身体像拡張について?)

3.2 関連研究

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] や身体幫助メカニズムを用いた飛行体験装置の提案 [2] 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ヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）によって与えることで飛ぶ感覚を提示する研究 [3] もある．

浮遊感と飛ぶ感覚の研究に対して，鳥のように羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究はまだ少ない．羽ばたいて飛ぶ感覚を与える研究の例としては，飛行中の鳥の体験をすることができる装置である Birdly[4] や Hypersuit[5] がある．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．

3.3 おわりに

第4章

四肢から独立した翼の提示方法

4.1 はじめに

本節では，四肢から独立した翼の提示方法について述べる．

4.2 ラグランジュ法を用いた運動方程式の導出

4.3 ルンゲクッタ法による数値積分

4.4 おわりに

第5章

最急降下法による着地動作のためのモータ入力 の最適化

5.1 はじめに

5.2 着地姿勢の評価関数

5.3 アルゴリズム

5.4 おわりに

第6章

直列弾性要素を有するモータ1自由度跳躍口 ボットの動作実験

6.1 はじめに

6.2 跳躍動作実験

6.3 着地姿勢制御実験

6.4 おわりに

第7章

結論および今後の展望

7.1 結論

7.2 今後の展望

参考文献

- [1] 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.
- [2] 鈴木拓馬, 矢野裕季, 安藤英由樹, 清川清ほか. Hmd および身体幫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] 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.
- [4] Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, pp. 1–1. 2014.
- [5] Guandalini R. and G. Agate. Hypersuit. <https://www.fitness-gaming.com/profiles/company/hypersuit.html>, Jul 2017.
- [6] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘ feel ’touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, pp. 756–756, 1998.
- [7] 岡嶋克典. 2. 視覚情報によって誘発されるクロスモーダル効果. 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 1, pp. 8–11, 2018.
- [8] 小川剛史, 中張遼太郎, 新島有信. 電氣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.
- [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] 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.

- [11] 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.