2015年度 卒業論文

風抗力によるナビゲーション

2016年2月15日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
原口 亮文

主査:____________________ 日付:________

風抗力によるナビゲーション

原口 亮文

概 要

近年ナビゲーションにおける新しい提示として力覚を利用した提示装置の研究が進められている．力覚提示装置は主に，外力を提示できる面で優れているが場所などの制限が大きい接地型と，ユーザの作業空間が広範囲である面で優れているが外力の提示が難しい非接地型に分けられる．力覚提示ナビゲーションの研究では，空間の制約が少ないことから非接地型の装置を用いる．しかし，外力の提示が困難なため，力錯覚や振動を用いた方法の研究があるが，感覚の差異によって提示目的の方向を誤認識する可能性がある．

本研究では，ナビゲーションを行うための風力を用いた力覚提示装置の開発を目的とする．風力発生による抗力を使うことで外力を提示しユーザの方向の誤認識を防ぐ．ナビゲーションを目的としているため，本研究では風力を発生させる機構として，小型軽量の装置を作製する必要がある．そのため，複雑な機構を必要としない送風機を利用する．風力発生による抗力を，装置を把持しているユーザの手に加えることで方向を提示する．

本研究で提案した風力による抗力を利用した力覚提示の有意性を確認するため被験者実験を行った．被験者実験で，実際に本装置で力覚提示による方向提示を行い被験者に力の感じた方向に装置を移動させ，装置の軌跡をモーションキャプチャを用いて測定した．測定した軌跡の近似直線と提示方向との傾きの差を求めることで，作製した本装置は左右方向に対して方向提示を行うことが可能であることが確認できた．

キーワード 力覚提示装置，ナビゲーションシステム，制御，風抗力

Wind drag navigation

Akifumi Haraguchi

Abstract

The research by the force feedback has been promoted, as a new method of navigation. The device by the force feedback is called "Haptic device". Haptic device is mainly divided into the ground and non-ground type. The ground type is excellent in presenting the external force but have a constraint of the space. The non-grounded type has a advantage of a large working space but it is difficult to present the external force. In the conventional study of the navigation system by haptic devices, the non-grounded type is utilized because it is capable of responding to user's action. There are researches that use force illusion or vibration for force perception, because the presentation of the external force is difficult. However, there is a possibility that the erroneous recognition of the direction occurs by the difference of sensation.

The propose of this research is the development of haptic device for navigation. The author used the drag caused by the wind force as a external force in order to prevent the erroneous recognition of the direction. It is necessary to utilize a small and light device for navigation application. Therefore, the author used a small and light fan without the complicated mechanism. The author conducted the subjective experiment in order to verify whether it is possible to present the direction by applying the user's hand the drag that caused by the wind force.

In order to confirm the significance of the proposed wind drag haptic system, the author conducted the subjective experiment. In the subject experiment, the subject moved the device in the direction which they felt the force by the device. The author measured the trajectory of the device. In the result, the author confirm that the device is possible to feel the left and right direction.

Keywords Haptic device, Navigation, Control, Wind drag

目 次

第 1 章　序論 **1**

第 2 章　力覚提示装置とナビゲーション **3**

2.1　力覚提示装置 3

2.2　ナビゲーション技術 5

2.3　力覚提示によるナビゲーション 6

2.4　本研究の提示手法 8

第 3 章　風抗力方向提示装置の構成 **10**

3.1　揚力と抗力 10

3.2　システムの概要 10

3.3　送風機の理論 13

3.4　装置概要 16

第 4 章　システム実装と評価実験 **20**

4.1　システムの実装 20

4.2　評価実験 24

4.3　結果 24

4.4　考察 27

第 5 章　結論 **28**

謝辞 **29**

参考文献 **30**

図 目 次

1.1 力覚提示ナビゲーション 2

2.1 接地型装置の実例 3
2.2 非接地非装着型装置の実例 4
2.3 非接地装着型装置の実例 4
2.4 非対称振動を用いた装置の実例 5
2.5 ナビゲーションシステムの実例 6
2.6 方向提示装置の実例 7
2.7 風力を利用した力覚提示装置 7
2.8 力錯覚を利用した力覚提示装置 8
2.9 利用した装置 8

3.1 揚力発生の図 10
3.2 システムの概要図 11
3.3 送風機制御による方向変更アルゴリズム 12
3.4 送風機の模式図 13
3.5 周方向の断面 14
3.6 装置構成 17
3.7 各構成要素 18
3.8 固定部と把持部 19

4.1 作製した装置 20
4.2 装置を把持した様子 21
4.3 サーボモータの回転角度と提示方向の対応 22
4.4 実際の提示方向における送風機 22
4.5 送風機制御回路図 23
4.6 作製したダーリントン接続の回路 23
4.7 実験風景 24
4.8 提示方向 1:近似直線 25
4.9 提示方向 2:近似直線 26
4.10 提示方法 3:近似直線 26

表 目 次

3.1 構成要素の役割 13

4.1 使用した構成要素と 3D プリンターの型番 21
4.2 3D プリンターの性能 21
4.3 提示した方向と近似直線の対応 25
4.4 提示方向と各手法の近似直線の傾き 27
4.5 近似直線の角度 27

第1章　序論

古来より人間が生きていく上で「方向」とは欠かせないものであり，生活するためには方向を把握しなければならなかった．目的地までの道順を知るために重要な方向を把握する方法として地形の記憶，目印の作製など多くの手段が用いられてた．太陽や星の位置を利用して方角を導く方法や地図，羅針盤の発明により，方角を知る手段が限られた海でも方向を知ることが可能になった．また，交通網の整理に伴い，道標や信号機といった目印が広く出回った．また，無線通信により方向探知器が開発されるが，経路を知らせるナビゲーションシステムが一般に普及したのはカーナビゲーション技術の発展やスマートフォンやタブレット端末が浸透した近年である [1]．小型端末の普及に経路情報を事前の用意なく外出中や移動中に得ることが出来るようになった [2]．しかし，一般的に普及しているナビゲーションシステムは視覚や聴覚に訴えるものであり，視覚や聴覚に障碍がある人に対して提示を行うことは難しい．近年，ナビゲーションシステムの視覚・聴覚以外の手法として，力覚によるナビゲーションが研究されている．力覚提示を用いたナビゲーションシステムは，視覚・聴覚に障碍がある人だけでなく，災害時といった視覚や聴覚が十分に機能しない緊急事態における避難誘導などへの応用が考えられる．

ナビゲーションを力覚提示で行うには，力覚提示装置はユーザの行動に柔軟に対応しなければならない．外力を提示することが可能である力覚提示装置の種類には，大きく分けて接地型と非接地型がある．接地型とは，装置本体を床や壁に設置させることでユーザに外力を提示することを容易にした装置である．しかし，装置自体が床や壁に固定されているため多くの場合ユーザの作業空間が限られている．非接地型は，装置自体は床や壁に設置されておらず，ユーザが装着あるいは把持することで支えられている．そのため接地型とは異なり外力を提示することが困難である．利点としてユーザが装置を空間に固定しないため，広い作業空間を得ることが可能である．一方，装置の重さをユーザが支えるため，装置の重さや大きさはユーザが耐えられる程度に制限されてしまう．ナビゲーションを行う力覚提示装置は簡易的に持ち運びが可能である必要があるため非接地型となる．

力覚提示によるナビゲーションの従来研究では，力錯覚を用いた手法や振動を用いた方法などの研究が行われてきた．しかし，これらの研究は外力の提示ではないため提示されている方向を誤認識してしまうことが確認されている．

本研究では，ナビゲーションシステムのための非接地かつ外力提示可能な力覚提示の機構を作製することを目的とする．そのため，持ち運びが可能な非接地型の力覚提示装置を作製

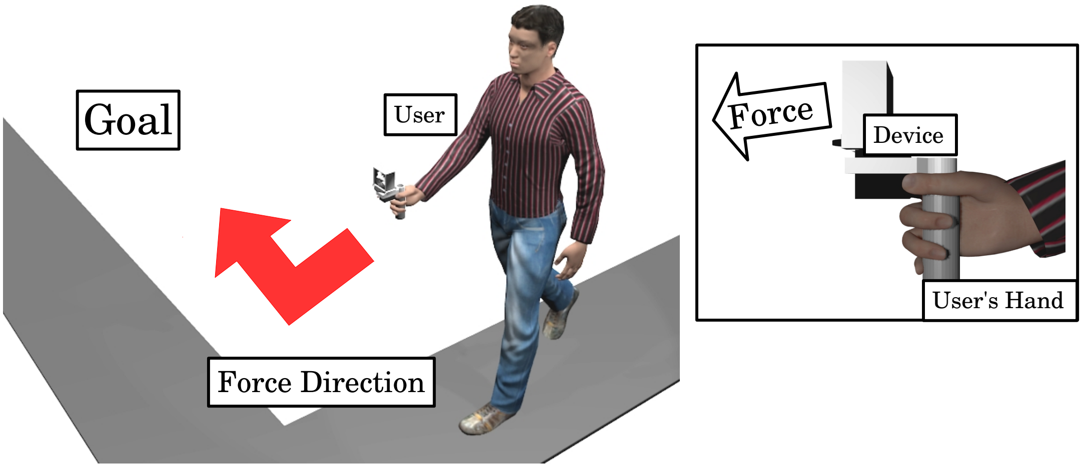


図 1.1: 力覚提示ナビゲーション

する．持ち運びを可能とするために装置自体の大きさや重さは市販されている懐中電灯より小型かつ軽量なものとする．力覚提示の手法には，従来の外力を提示しない手法による提示方向の誤認識を防ぐために，風力を利用する．風力を発生させることで得られる抗力を利用して，外力を提示することができれば提示方向の誤認識を防ぐことが可能と考えられる．

第2章　力覚提示装置とナビゲーション

本章では，第一章で述べた力覚提示装置と，力覚提示装置による方向提示の研究について述べる．

2.1　力覚提示装置

力覚提示装置とは，物体と身体との接触部分に人間の動作に応じた力を作用させせることで力覚を作りだす機器のことである [3]．力覚提示装置はユーザに対して物理的に接触しており，入出力両用の装置と考えることができる [4]．誘導すべき方向の力をユーザに提示することで，ユーザを誘導することができると考えられる．

2.1.1　接地型と非接地型

力覚提示装置には多くの種類がある．力覚提示装置は主に，壁や卓上に据え置く接地型とユーザ自身が装置本体を装着または把持する非接地型の二つに主に分けることが出来る [5]．

接地型装置は正確に力を提示しやすいが，床や壁に固定していないと力が提示できないため作業範囲が制限されているという短所がある．図 2.1 に接地型の例を示す．接地型装置として代表的なものとして”SPAIDAR”や”PHANToM”などがある [6] [7]．SPAIDAR ではユーザの手に力を加えるために薄い糸やスチールケーブルを使用する．PHANToM はユーザが把持するペン型のマニピュレータに力を加えるためにアーム部分の内部に配置されたワイヤーを用いる．

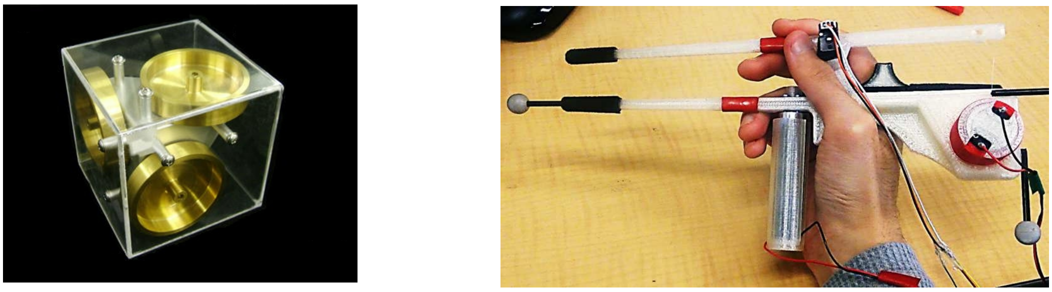
(a)SPAIDAR-G [6]

(b)PHANToM [7]

図 2.1: 接地型装置の実例

非接地型装置の特徴として物理空間において固定されている接地型とは違いユーザの作業範囲が広いことが挙げられる．しかし，非接地型は装着型のようにユーザ自身に装着する，あるいは非装着型のようにユーザが装置を把持するため，装置の重さや大きさに制限があり，多様な力を表現できない．非装着型の実例として，立方体の形状をした”ジャイロキューブ”や棒の形状で箸を模した”Hapsticks”を図 2.2 に示す [8] [9].

装着型の実例として CyberGrasp を図 2.3 に示す [10]．しかし，CyberGrasp は映像上の物体を把持した場合の内力を提示しており外力を提示できない．



(a) ジャイロキューブ [8]　(b)Hapsticks [9]

図 2.2: 非接地非装着型装置の実例

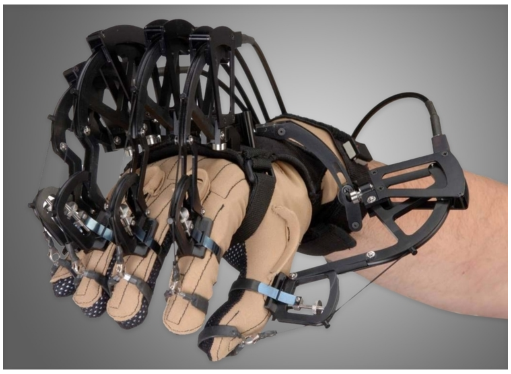
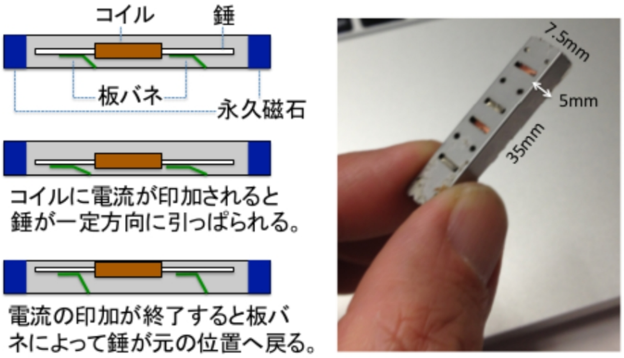


図 2.3: CyberGrasp [10]

2.1.2　力覚提示の方法

力覚提示の方法は多くの種類が存在している．ジャイロモーメントを用いた”Gyro-moment Haptic Interface”やワイヤー制御を利用した CyberGlove Systems 社の CyberGrasp などがある [8] [10] [11]．他に非対称な振動を起こすことでバーチャルな力を提示する装置もあり，具体例として図 2.4 に雨宮らの”Buru-navi”と暦本の”Traxion”を示す [12] [13].

(a) ぶるなび 1 [12]



(b)Traxion [13]

図 2.4: 非対称振動を用いた装置の実例

2.2　ナビゲーション技術

ナビゲーション技術とは，多様な目的に応じてユーザを誘導する技術である．ナビゲーションには多くの種類が存在する．道路上の標識のように運転手に対して路線の情報提示や交通情報の注意喚起を行うもの，視覚障碍者に道を知らせる点字ブロックや医者に情報を提供する手術中の画像誘導システムなどが存在する [14] [15].

最も普及しているナビゲーションシステムは視覚を用いた手法である．視覚を用いたナビゲーションシステムの実例として，地図や信号機，掲示板などが挙げられる．地図では目的地までの道順や周辺地理の建物を確認することが可能であり，信号機では車両や歩行者などに交通整理等のための信号を確認することができる．また，交通機関などでみられる掲示板なども使用者に色々な情報を提示している．

聴覚を利用したナビゲーションシステムの例として，緊急時における警報や視覚障碍者に対する誘導，情報提供を目的とする音声案内情報装置などが挙げられる [16]．警察車両や消防車両が出動の際や緊急時に流れる警報は周辺の人に異変や脅威を知らせることが可能であり，各施設に見られる音声案内などでは，大勢の人に一度に情報を提供することが可能である．一般的に普及しているナビゲーションシステムは視覚と聴覚の両方に提供する方法が取られている．実例としてカーナビゲーションなどが挙げられる [17]．視覚や聴覚に対するナビゲーションシステムの実例を図 2.5 に示す．

また，視覚や聴覚以外の感覚に対して行われるナビゲーションシステムが存在する．例えば，触覚を利用した手段として視覚障碍者のための点字や盲導犬による牽引などが挙げられる．また，麻薬などの危険物に対する犯罪捜査において警察犬などの嗅覚を利用した方法も存在する．しかし，いずれの方法も環境整備などに時間や費用が必要となってしまう．夜間

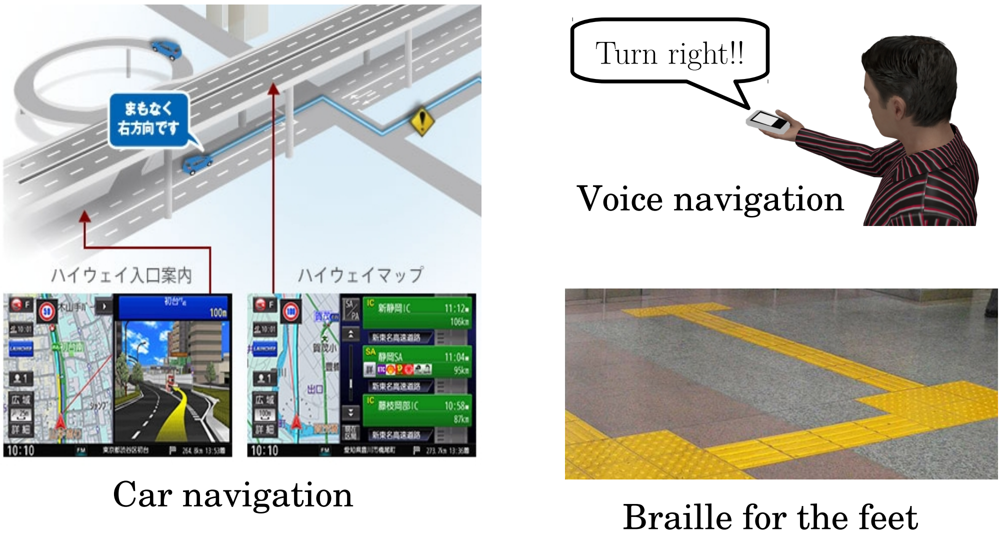


図 2.5: ナビゲーションシステムの実例 [17]

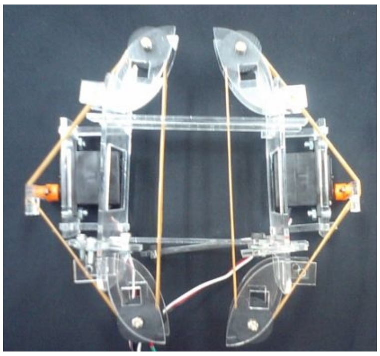
や雑音が大きい状況では，視覚や聴覚以外の感覚に対するナビゲーションシステムが必要とされている [18]．ナビゲーションとして，視覚や聴覚に対するナビゲーション方法以外に力覚を利用したナビゲーション方法が研究されている．

2.3　力覚提示によるナビゲーション

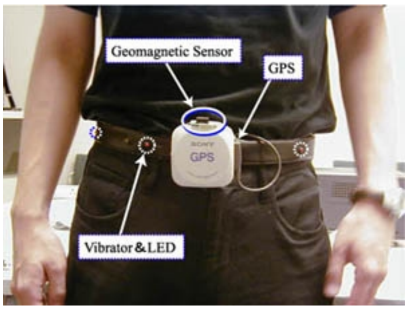
力覚提示を用いたナビゲーションとして点字が挙げられる．視覚障碍者などに道順や施設の情報等を提供している．しかし，個人の要望に応じて直接目的地に連れていくことができない．そのため，経路案内を行うことが可能な力覚提示システムや装置の開発が求められている．方向提示を目的としている装置はユーザに対して目的地に到着するまで方向を提示しつづける必要があり，広い作業範囲が必要なため，持ち運びが可能な非接地型であることが求められる．また、夜間や聴覚を遮らない情報提示が求められる環境では，力覚に働きかけることでナビゲーションすることが有効と考えられる．

ユーザが装着する形状の装置や把持する型の装置など様々であり，前腕部に装着し，皮膚を変形させることで腕が牽引されている感覚を提示する装置では，上下左右方向へ牽引力を再現できるが装置の装着感の差異から提示方向の誤認識を起こす可能性がある．図 2.6 の (a) に前腕部牽引力覚提示装置を示す [19]．また，図 2.6 の (b) は，ベルトを模した帯の形状であり，腰の周りに振動モータが複数個埋め込まれており振動による方向提示を行う装置である”ActiveBelt”を示す．ActiveBelt は振動を用いて力覚提示を行っているが，腰に巻く

形状のためユーザの肌に振動子を密着させるのは難しく，ユーザの体格によって装着時の誤差を考慮した設計が重要になる可能性がある [20]．



(a) 前腕部牽引力覚提示装置 [19]



(b)ActiveBelt [20]

図 2.6: 方向提示装置の実例

また，方向提示の原理に風力を用いた先行研究の例に大上らの研究が挙げられる [21]．大上らの装置を図 2.7 に示す．プロペラの回転により生成した風力を利用した方向提示を目的

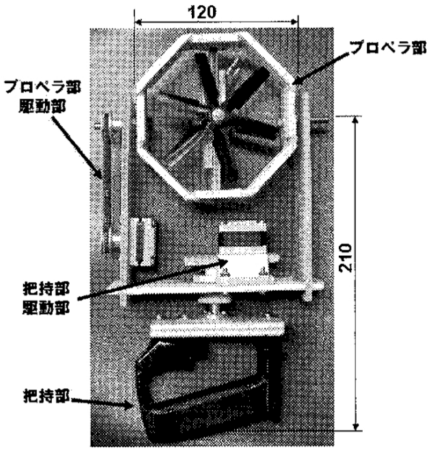


図 2.7: 風力を利用した力覚提示装置 [21]

としている．装置の種類はユーザが把持する仕様より非装着型に分類されるが，装置が重く長時間の持ち運びに適さない．

方向提示を目的とする研究として雨宮らの研究が挙げられる [18]．図 2.8 に雨宮らの開発した装置である”ぶるなび”を示す，力覚に加速度が違う力を加えることによる錯覚を利用して方向提示を行っている．装置は手のひらに収まる程度の大きさである．ユーザを目的地

に誘導することにおいて良い結果を残しているが，錯覚を利用しているため目的の方向と逆の方向を提示されていると認識する可能性がある．

図 2.8: 力錯覚を利用した力覚提示装置 [18]

指に直接力覚を提示して方向を示す装置に HapticSandwich が挙げられる．図 2.9 に装置を示す．立方体の形をしており，図 2.9 のように装置の下半分をユーザが把持すると，上半分が回転や前にずれることで指に力覚を提示することが可能である．しかし，それぞれの指に対して力覚を提示するのに差が出る可能性がある [22]．

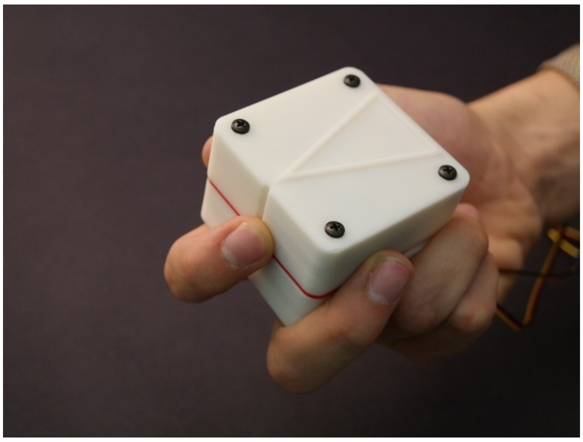


図 2.9: 利用した装置 [22]

2.4　本研究の提示手法

本装置の開発方針として，非接地型を選択し力覚を提示するために風力を利用する．力錯覚や振動を利用した方向提示において人の感じ方の差異によって誤認識を起こす可能性がある．一方，風力による力覚提示は物理的な力を把持部に与えるため，提示方向の誤認識を起

こしにくいという利点がある．また，非装着型にすることで，ユーザに対する負担や装着における誤差を減らす可能性がある．

第3章　風抗力方向提示装置の構成

本章では，風力による力を利用した力覚提示装置の構成について説明する．まず，本研究で提案する方向提示のシステムについて述べる．

3.1　揚力と抗力

本研究では風力を発生させることで得られる圧力を力覚提示に利用する．一様に流れている気体の中に物体が存在するとき，物体のまわりを気体が循環していれば力が発生する．揚力発生の概要を図 3.1 に示す．この力の気体の流れに対して垂直方向に受ける力を揚力と呼び，気体の流れに平行な方向に受ける力を抗力と呼ぶ．揚力を利用しているものには，プロペラや飛行機の固定翼，凧やヘリコプターの回転翼など様々である．

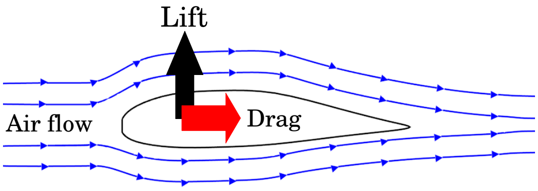


図 3.1: 揚力発生の図

本研究では風力発生機構として送風機を使用する．送風機は揚力発生のためにプロペラをモータで回転させる．飛行機の固定翼や凧といった他の揚力発生機構は揚力を得るために，物体自体が流体の中を進むための移動距離が必要である．装置自体をユーザが自由に動かすことが可能である必要があるため，送風機を利用する．

3.2　システムの概要

本研究で提案するシステムの概要を図 3.2 に示す．発生する風力の方向とは逆方向に力は発生する．風力が発生することで得られる力をユーザに与えることで方向の提示を行う．風力発生機構を回転させることで風向を制御し，提示する方向を切り替える．本装置はナビ

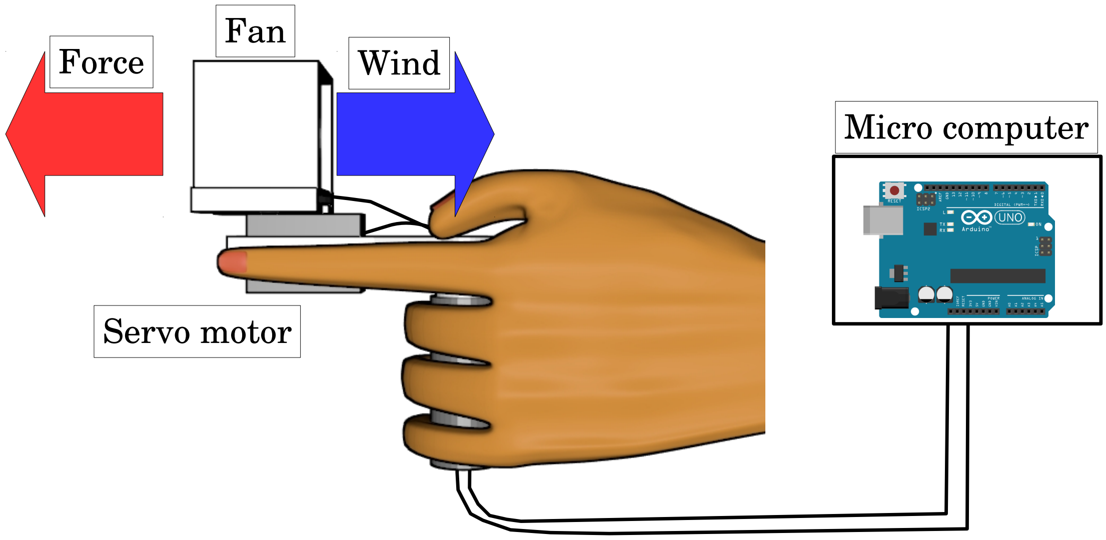


図 3.2: システムの概要図

ゲーションを目的としているため，より小型かつ軽量にする必要がある．そのため，風力発生機構として，電源や回路に直結が可能な送風機をサーボモータの角度制御により力覚提示の方向を変更する．

提示方向を変更際に，力覚が提示されている状態で方向を切り替えると提示目的の方向以外の方向にも力覚を提示してしまう可能性がある．そのため，提示方向の切り替えを行う場合，提示している力を小さくする必要がある．提示している力覚を小さくする手法として，送風機の電圧をマイクロコンピュータで制御する方法を挙げる．

図 3.3 に送風機をマイクロコンピュータで制御することによる方向変更のアルゴリズムを示す．提示方向のデータが送られてくると，マイクロコンピュータにより送風機の印加電圧を低下させる (b)．低下している状態でサーボモータを制御して送風機の方向を変更する (c)．変更した後，送風機の印加電圧を増加して風力を発生させることで力覚提示を再開する (d)．

装置の重さを支える部分と力覚提示を行う部分を分けることで力覚提示に必要な力の値を下げることが可能である．本装置では装置の形状により，装置の自重を支える把持部と力覚を提示する提示部を分ける．装置を銃に似たかたちにすることで，中指・薬指・小指が握る把持部と人差指・親指による提示部を作る．把持部と提示部は別々の部品である．

表 3.1 に本装置の構成要素と役割をまとめる．

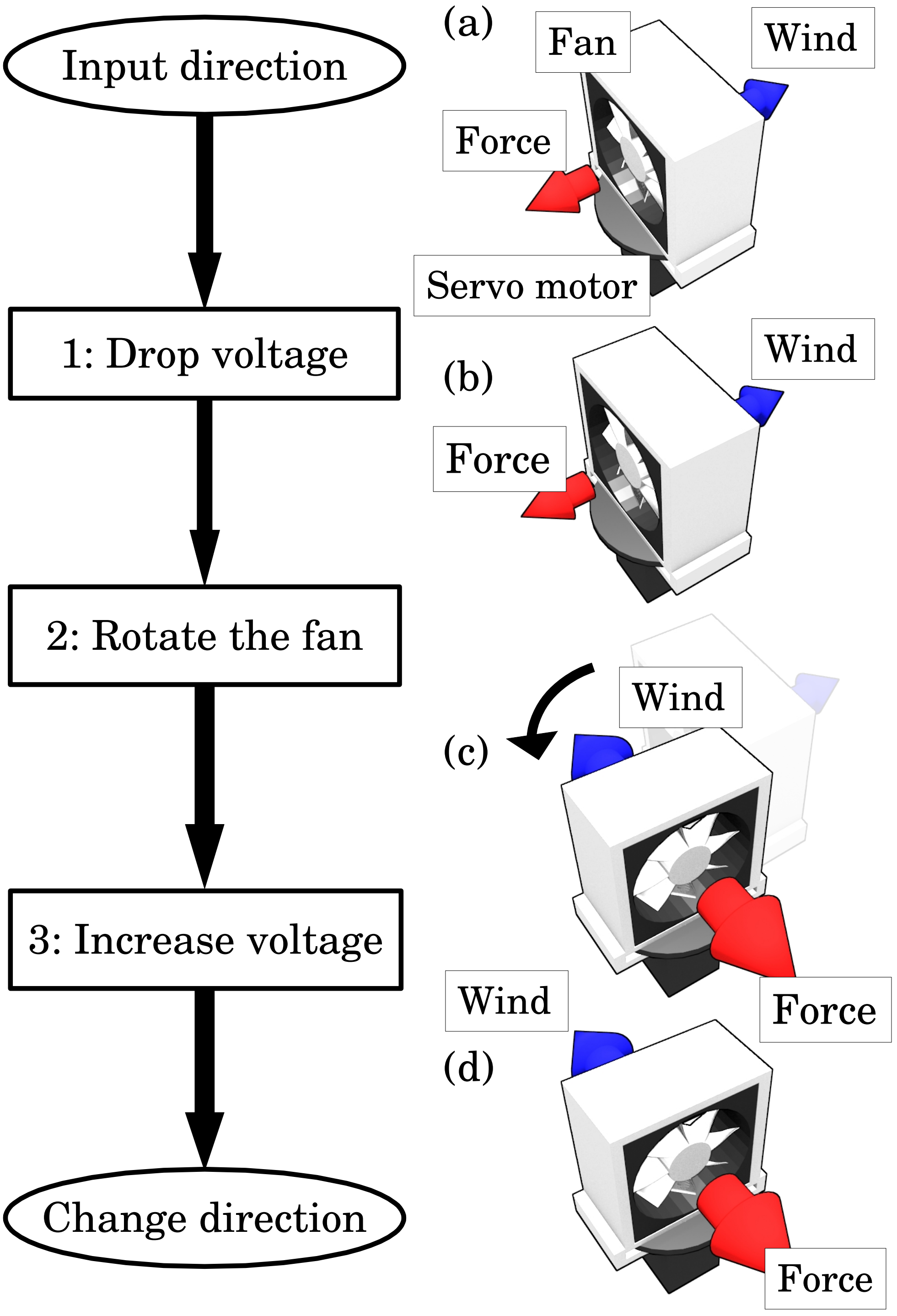


図 3.3: 送風機制御による方向変更アルゴリズム

表 3.1: 構成要素の役割

構成要素	役割
送風機	力の発生機構
サーボモータ	力の方向変更
マイクロコンピュータ	プログラムによる制御

3.3 送風機の理論

この節では，送風機が風力を発生させることで得られる力について述べる [23]．本装置で力覚提示に必要となる力は送風機により決まるため，送風機が発生する力と送風機の構造の関係を示す．図 3.4 に簡易的な送風機を示す．r は中心から半径方向の長さを，n は翼の枚数を，l は翼の間隔を表している．図 3.5 は図 3.4 の X_1 と X_2 の断面を示している．ω は送

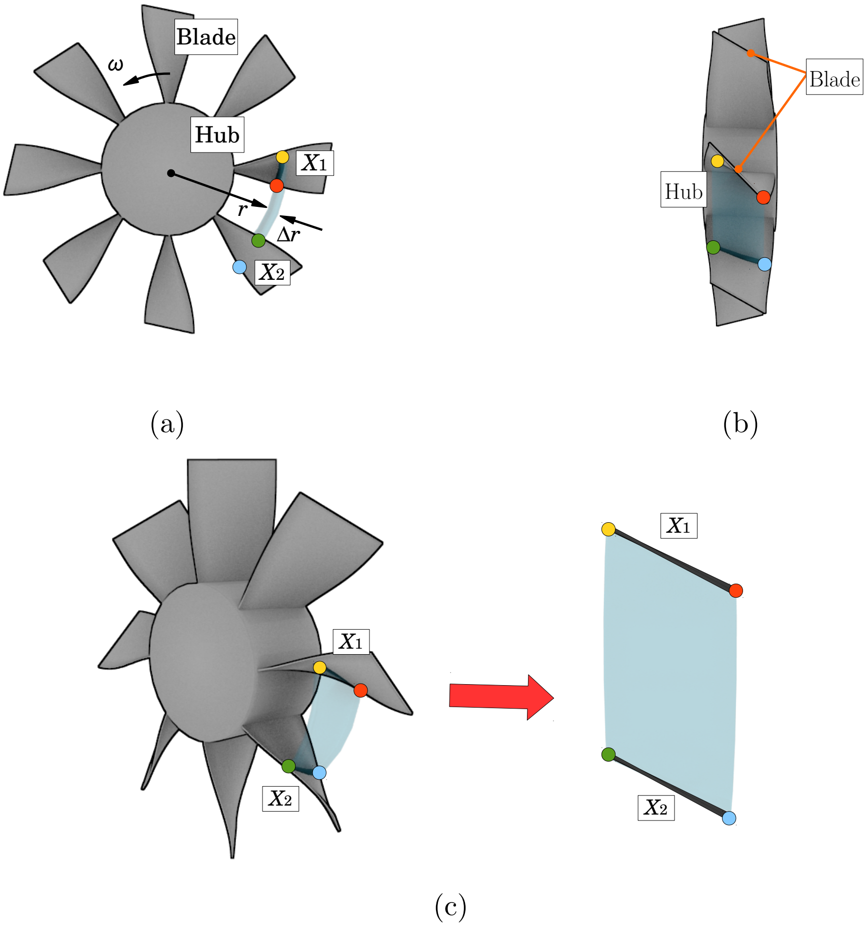


図 3.4: 送風機の模式図

風機の角速度を表している．U は周速度を表しており，角速度との関係式は $U = \omega r$ で表される．W は物体と流体の相対速度を意味しており，W_1 は流入口における相対速度で，W_2

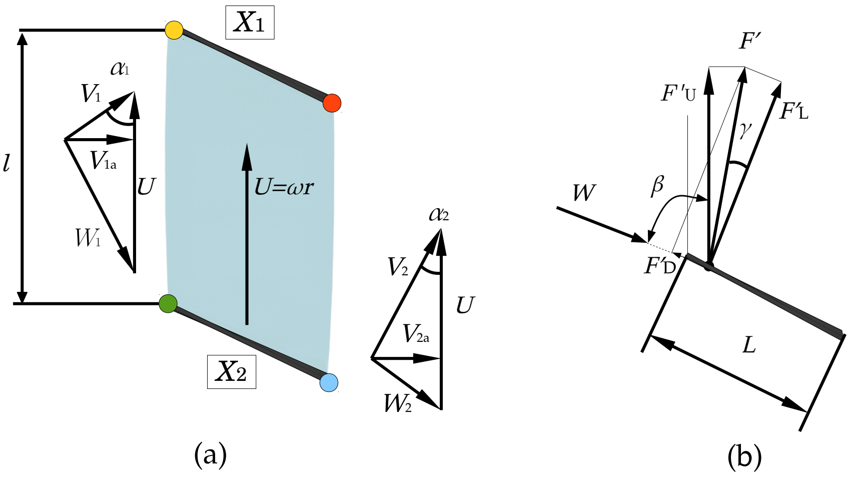


図 3.5: 周方向の断面

は流出口における相対速度である．W は図 3.5(b) の W_1 と W_2 の平均値である．気体の密度を ρ，気体の速度を V，時間を t とおくと流体の連続式は式 (3.1) で表すことができる．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \tag{3.1}$$

送風機での気体の速度は音速よりも充分に小さいため非圧縮であると仮定できる．したがって，式 (3.1) の左辺の両項は 0 となり，図 3.5(a) の送風機に対して垂直に流入してくる気体の速度 V_{1a} と流出する気体の速度 V_{2a} の速度変化が 0 となる．これより，V_{1a}=V_{2a}(=V_{a} とおく) を得ることができる．W と周方向の間の角度を β で表す．F'_{L} は単位半径あたりの揚力を表しており，F'_{D} は単位半径あたりの抗力を表している．L は翼弦長を表している．C_{l} は揚力係数，C_{d} は抵抗係数を意味しており無次元である．F'_{L} と F'_{D} は式 (3.2)，(3.3) で示すことができる．

$$F'_{\mathrm{L}} \equiv \frac{\Delta F_{\mathrm{L}}}{\Delta r} = \frac{1}{2}\rho W^2 C_{\mathrm{l}} L \tag{3.2}$$

$$F'_{\mathrm{D}} \equiv \frac{\Delta F_{\mathrm{D}}}{\Delta r} = \frac{1}{2}\rho W^2 C_{\mathrm{d}} L \tag{3.3}$$

F'_{L} と F'_{D} の合力を F' とおき，F' の周方向成分を F'_{U} とおくと，一枚の翼を動かすのに必要な単位時間あたりの仕事は $F'_{\mathrm{U}} U \Delta r$ である．幅を Δr とおくと円環部分の体積流量は $\Delta Q = nV_{\mathrm{a}} l \Delta r$ と表すことができる．気体が送風機を通過することでのエネルギー損失を 0 と仮定した場合の送風機の前後の圧力差を P_{th} とおく．したがって，気体の得る動力は $P_{\mathrm{th}}\Delta Q (= P_{\mathrm{th}} n V_{\mathrm{a}} l \Delta r)$ と表すことができる．必要な環境が決まっているならば，適した性能の送風機を選ぶことができる．

P_{th} の仮定から式 (3.4) を立てることができ，式 (3.4) を変形させることで式 (3.5) を得る．図 3.5 から式 (3.6) が得られる．

$$P_{\mathrm{th}} n V_{\mathrm{a}} l \Delta r = n F'_{\mathrm{U}} U \Delta r \tag{3.4}$$

$$P_{\mathrm{th}} = \frac{F'_{\mathrm{U}} U}{V_{\mathrm{a}} l} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned} F'_{\mathrm{U}} &= F' \sin(\beta + \gamma) \\ &= F'_{\mathrm{L}} \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos\gamma} \\ &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_{\mathrm{l}} L \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos\gamma} \end{aligned} \tag{3.6}$$

式 (3.6) を式 (3.5) に代入すると式 (3.7) が得られる．

$$P_{\mathrm{th}} = \rho \frac{W^2 C_{\mathrm{l}} L U}{2 V_{\mathrm{a}} l} \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos\gamma} \tag{3.7}$$

W は翼列に対する相対速度であり計測が困難である．式 (3.7) から W を消去するために，時間あたりの運動量から W を求める．V_{1u} は流入口における周方向の絶対速度を，V_{2u} は流出口における周方向の絶対速度を表している．図 3.4 より，周方向の絶対速度は流入口の $V_{1u}(= V_1 \cos\alpha_1)$ から流出口の $V_{2u}(= V_2 \cos\alpha_2)$ に変化し，運動量の変化量は $\rho n V_{\mathrm{a}} l \Delta r (V_{2u} - V_{1u})$ で表すことができる．運動量の変化量はエネルギー損失が 0 であることから送風機から気体へ作用している力は式 (3.8) で表される．

$$n F'_{\mathrm{U}} = \rho n V_{\mathrm{a}} l (V_{2u} - V_{1u}) \tag{3.8}$$

式 (3.8) を式 (3.5) に代入することで式 (3.9) を得る．

$$P_{\mathrm{th}} = \rho U (V_{2u} - V_{1u}) \tag{3.9}$$

図 3.5(a) の送風機の後方の速度から，式 (3.10)，(3.11) が得られる．

$$\begin{aligned} W_2^2 &= (U - V_2 \cos\alpha_2)^2 + V_2^2 \sin\alpha_2 \\ &= U^2 + V_2^2 - 2 U V_{2u} \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$U V_{2u} = \frac{1}{2}(U^2 + V_2^2 - W_2^2) \tag{3.11}$$

同様に，送風機の前方から式 (3.12) が得られる．

$$U V_{1u} = \frac{1}{2}(U^2 + V_1^2 - W_1^2) \tag{3.12}$$

式 (3.11)，(3.12) を式 (3.9) に代入することによって，式 (3.13) が得られる．

$$P_{\mathrm{th}} = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) - \frac{\rho}{2}(W_2^2 - W_1^2) \tag{3.13}$$

図 3.5(b) の W は W_{1a} と W_{2a} の平均である．V_{1a} は V_{2a} と等しいため V_{a} とおくと式 (3.14) が得られる．

$$W = \frac{V_{\mathrm{a}}}{\sin\beta} \tag{3.14}$$

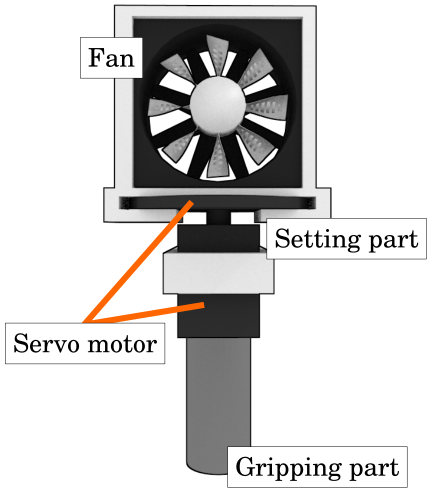
式 (3.14) を式 (3.7) に代入することで式 (3.15) を得る．

$$P_{\mathrm{th}} = \frac{\rho V_{\mathrm{a}} C_{\mathrm{l}} L U}{2l} \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\sin^2\beta\cos\gamma} \tag{3.15}$$

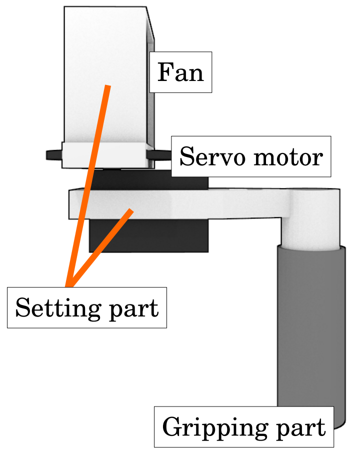
V_{a} は測定値であり，C_{l}，p，β，γ は翼の形状から得ることができる．また式 (3.15) から送風機が発生させる圧力差 P_{th} を算出することができるため希望に適した送風機を選ぶことができる．

3.4 装置概要

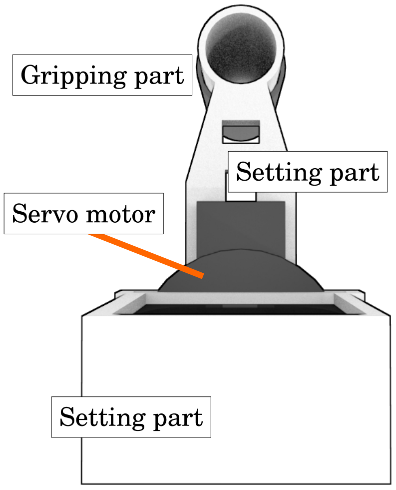
本装置の概要として，図 3.6 に本装置を示す．図 3.7 に送風機，サーボモータ，把持部と固定部を示す．ユーザは利手の小指，薬指，中指で把持部を握り，人差し指と親指で固定部を把持する．固定部は二つあり，サーボモータと送風機を固定する部品とサーボモータを固定し把持部と組み合わせる部品である．また，固定部を把持しているユーザの人差し指と親指に風力発生で得られる圧力を加える提示部の役割も担っている．把持部と固定部は物理的に分かれた部品であり，把持部は円筒形であり，固定部にも円筒部がある．図 3.8 のように固定部の円筒部分に把持部が重なる構造になっている． 送風機はサーボモータに取り付けられている．サーボモータの回転制御により送風機の方向を制御することが可能であるため，力覚を提示する方向も制御可能である．把持部は中指・薬指・小指で，人差指と親指でサーボモータを把持することで，デバイスの重さを支える把持部と力覚が提示される提示部を分けている．把持部と提示部を分割していることにより，装置の重量を把持部で支えることで力覚提示に必要な力をできるだけ小さくしている．



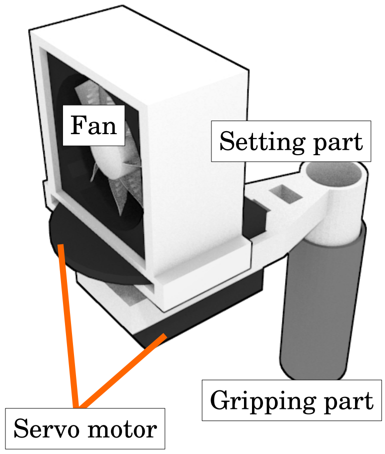
(a) 前面図



(b) 横面図



(c) 上面図



(d) 俯瞰図

図 3.6: 装置構成

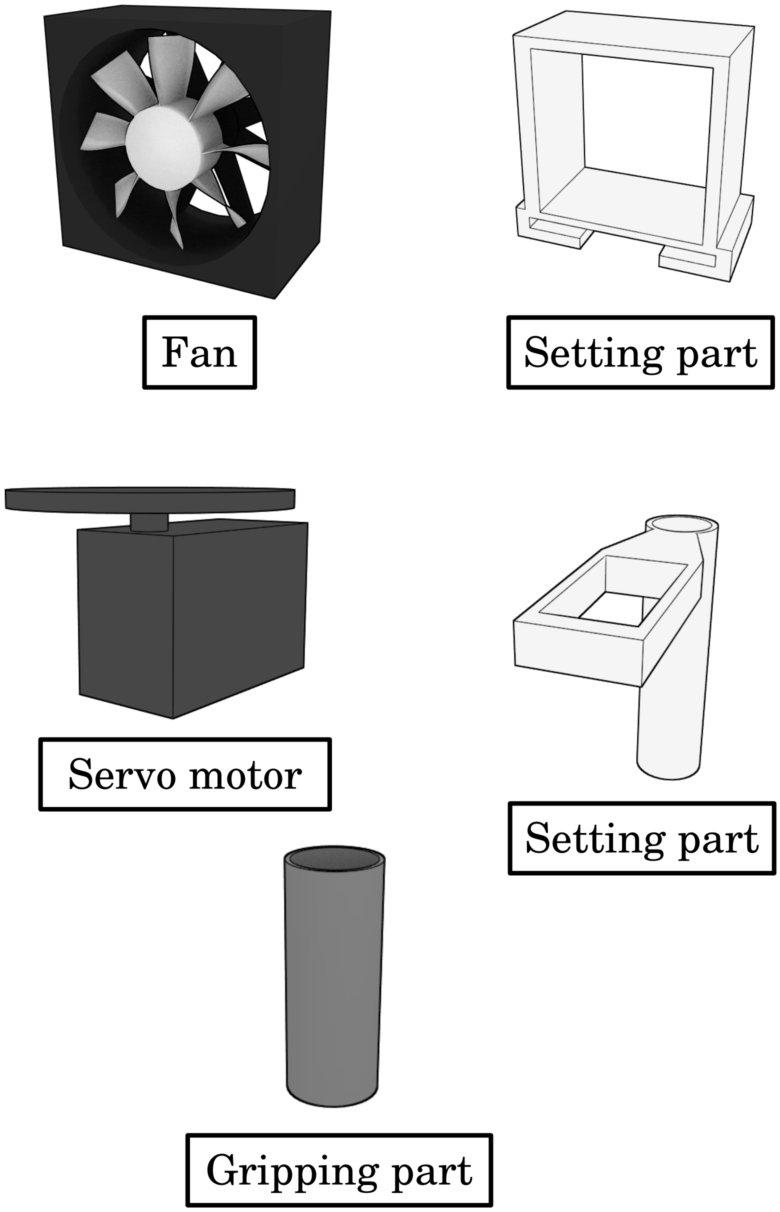


図 3.7: 各構成要素

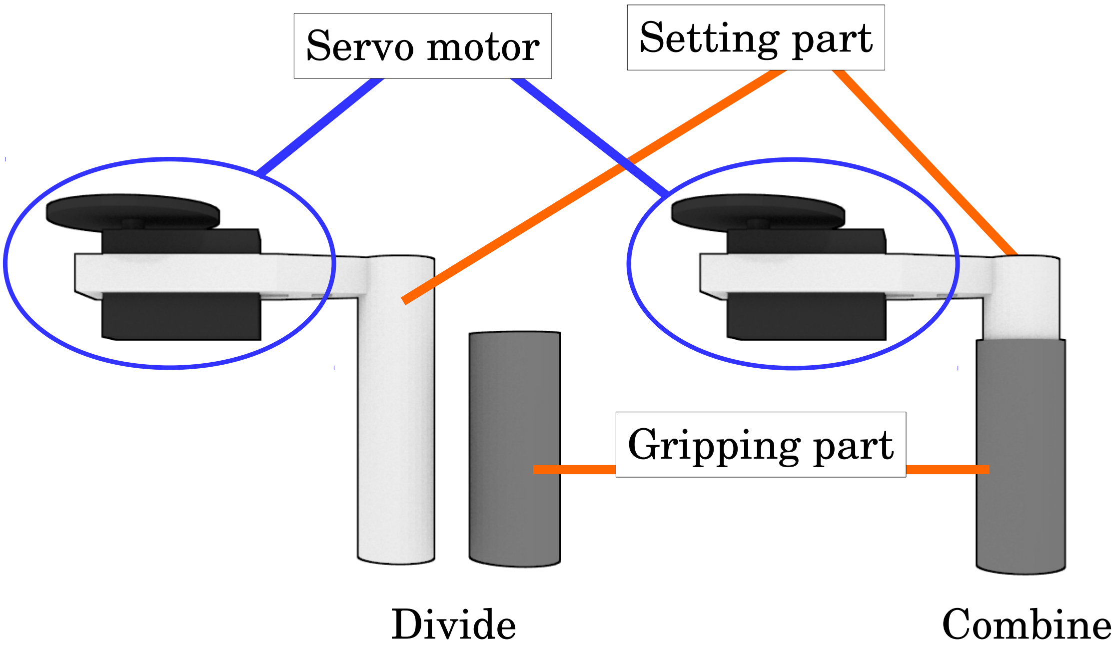


図 3.8: 固定部と把持部

第4章　システム実装と評価実験

本章では提案した風力発生に伴う抗力を利用した力覚提示システムの実装と評価について述べる．提案システムの実装について，力覚提示の二つの手法について力の時間変化を確認した．さらに，被験者実験により方向提示の有効性を評価した．

4.1　システムの実装

実装した装置はマイクロコンピュータ，送風機，サーボモータから構成されている．図 4.1 に作製した装置を示す．デバイスの各構成要素と 3D プリンターの型番を表 4.1 に，3D プリ

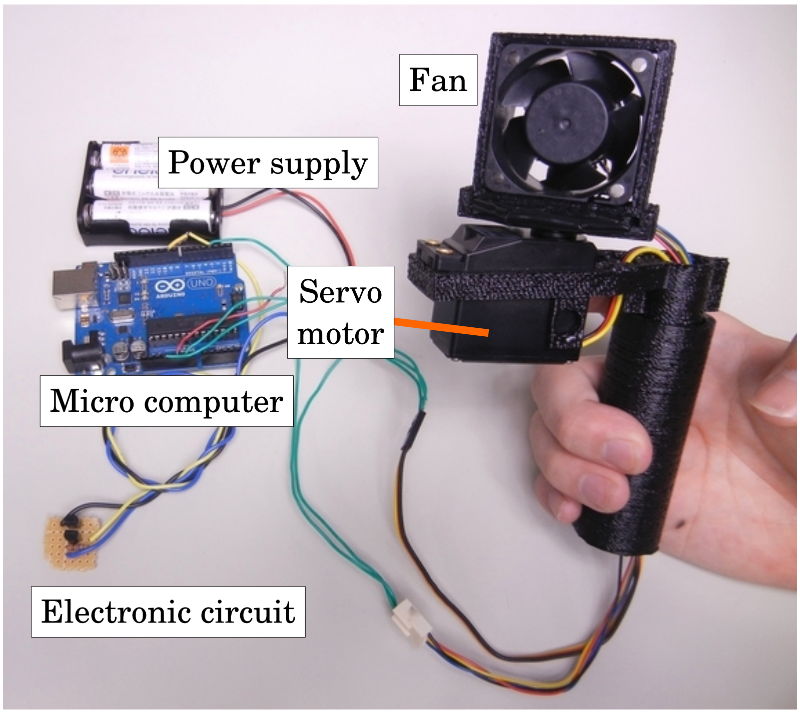


図 4.1: 作製した装置

ンターの性能として作製可能な物体の大きさと作製時に発生する可能性のある誤差を表 4.2 に示す． 本デバイスは基本的に左右どちらの手でも持てるように設計しており，片手で把

表 4.1: 使用した構成要素と 3D プリンターの型番

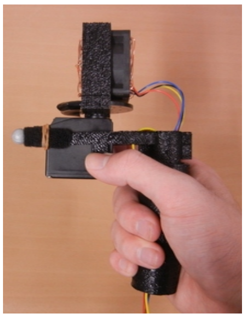
名称	型番
マイクロコンピュータ	Arduino UNO
送風機	PEAD14028BH
サーボモータ	MTS-A410SE
3D プリンター	3D-TOUCH DOUBLE HEAD

表 4.2: 3D プリンターの性能

名称	性能
横幅の最大長	230 mm
奥行き幅の最大長	275 mm
高さの最大長	210 mm
一層あたりの厚み	0.125 mm
横幅と奥行きの許容誤差	製作物の ±1%，または最大 ±0.2 mm
高さの許容誤差	±0.0625 mm

持する形状である．把持部や送風機を固定している部品は 3D プリンターで作製したものである．把持部の構造は，二つの筒が重なるようになっており，内側の筒はサーボモータに接続されている．

本装置を把持している状態を図 4.2 に示す．サーボモータの回転角度の制御を利用して，



(a)

(b)

図 4.2: 装置を把持した様子

風抗力の提示方向とサーボモータの回転角度を対応させている．図 4.3 に風抗力の提示方向とサーボモータの回転角度の対応を示す．提示方向は左，左前，前，右前，右の 5 方向とした．使用したサーボモータの仕様により時計回りを正方向とした．サーボモータの角度の設定は，左を 0，左前を $\frac{\pi}{4}$，前を $\frac{\pi}{2}$，右前を $\frac{3\pi}{4}$，右を π としている．図 4.4 にデバイスが各方向を向いている写真を示す．

図 4.5 に送風機制御回路を示す．送風機に十分な電流を流すために，NPN 型トランジス

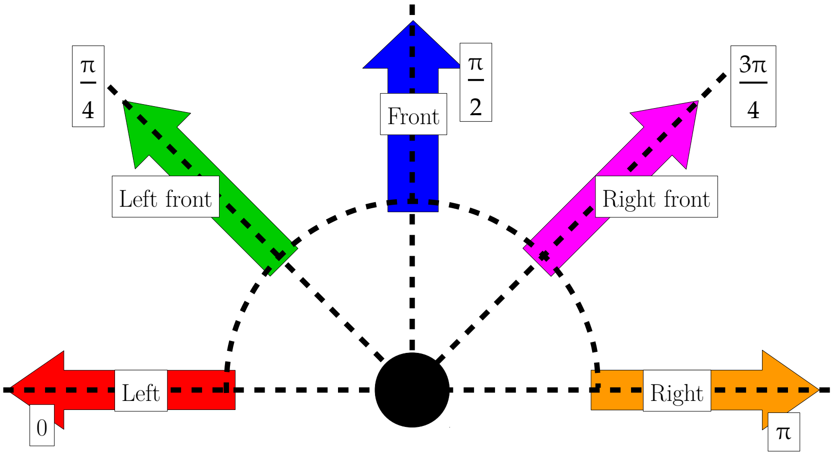
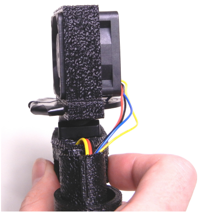
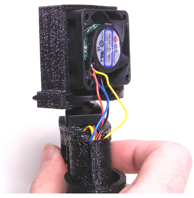


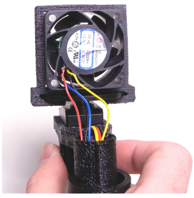
図 4.3: サーボモータの回転角度と提示方向の対応



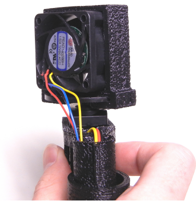
(a) 角度 0



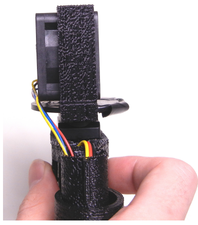
(b) 角度 $\frac{\pi}{4}$



(c) 角度 $\frac{\pi}{2}$



(d) 角度 $\frac{3\pi}{4}$



(e) 角度 π

図 4.4: 実際の提示方向における送風機

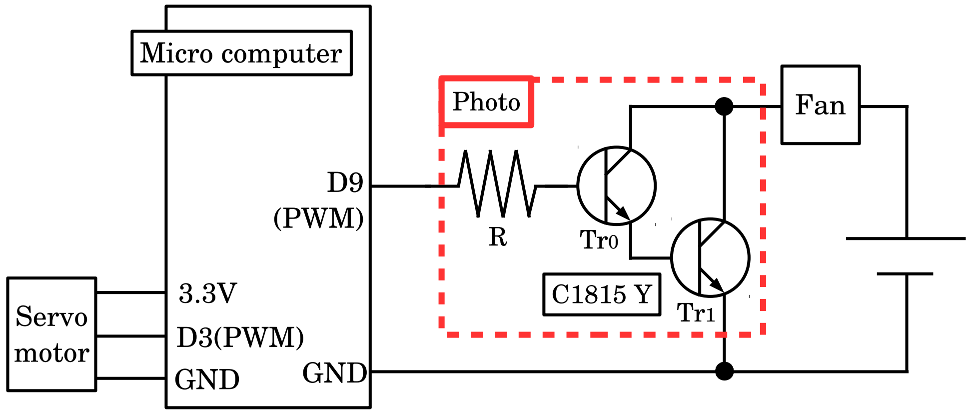


図 4.5: 送風機制御回路図

タの C1815 Y をダーリントン接続した回路を図 4.6 に示す．送風機制御回路のマイクロコン

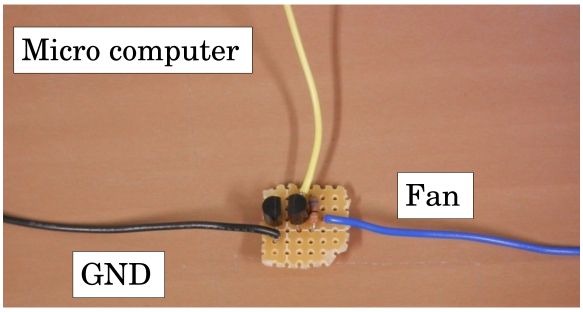


図 4.6: 作製したダーリントン接続の回路

ピュータと Tr_0 間の抵抗の値を決めることで，送風機に流れる電流の上限値を決める．本実験で利用した送風機に定格電圧 12 V を印加した際，流れる電流値 0.8 A であったため，計算上の電流の上限値を 0.8 A とした [24]．また，データシートより C1815 Y の増幅率は 120 倍から 240 倍となっているため，抵抗値を決める計算において増幅率は最低値である 120 倍とする [25]．二つのトランジスタをエミッタとベースでつなぐため，増幅率は 120 の二乗の 14400 となり，マイクロコンピュータから流れてくる電流の値は $800 \div 14400 = 0.06$ から 0.06 mA となる．マイクロコンピュータの電圧を 5 V でトランジスタのベース・エミッタ間飽和電圧が 1 V であることから，マイクロコンピュータと Tr_0 間の電圧は 4 V となる．したがって，抵抗値 R は $4 \div 0.06 \simeq 68\Omega$ とした．

4.2　評価実験

本装置の方向提示の機能を評価するために被験者実験を行った．20 代の男性 6 名を被験者とた．実験風景を図 4.7 に示す．被験者は椅子に座ってもらい，装置の把持方法や機構について 1 分程度の説明を行った．1 回の試行で，被験者には連続で 5 回の方向提示を無作為に行った．被験者には方向提示に応じて装置を把持している手を提示されている方向に移動させるように指示した．また，モーションキャプチャを用いて装置の軌跡を計測した．方向提示の方法は，3 種類用意した．一つ目は口頭により方向を指示する方法であり，二つ目は装置により力覚提示を行うことで方向提示する方法，三つ目は口頭による指示と力覚提示を同時に行う方法である．

被験者には，視覚を遮るためと装置から風を受けないようにするために，装置を把持した手と上半身の間に板を設けた．また，聴覚を遮るためにノイズキャンセリング機能のヘッドホンを使用してホワイトノイズを流した．実験で使用したノイズキャンセリング機能付きヘッドホンの型番は Bose QuietComfort 15 である [26]．

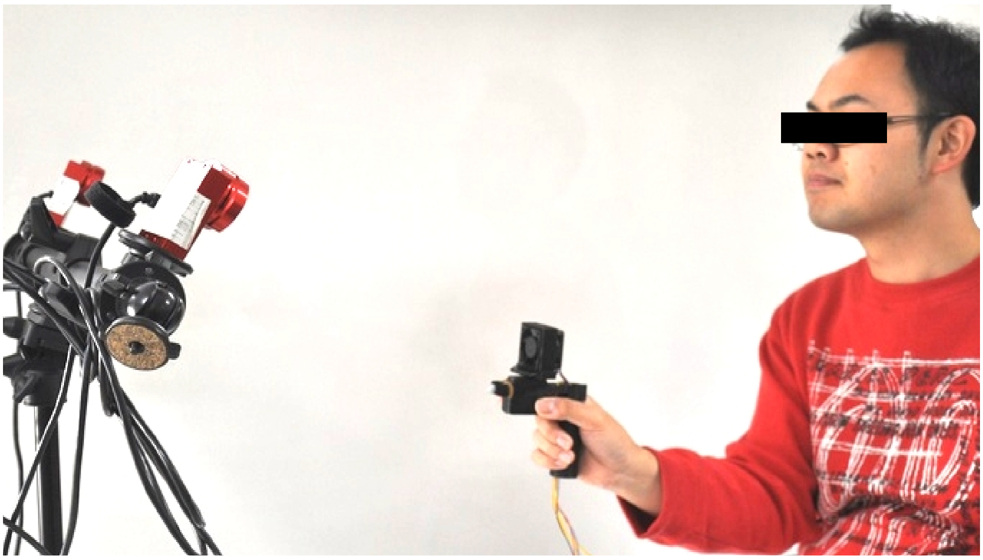


図 4.7: 実験風景

4.3　結果

図 4.8，4.9，4.10 に，3 種類の提示方法を行って得られた座標データから求めた近似直線を示している．提示した方向を線の色で表しており，表 4.3 に提示した方向と色の対応を示

す．実験結果のグラフは，縦軸の正方向が被験者から見て前方向であり，横軸の正方向が右方向，負方向が左方向となっている．

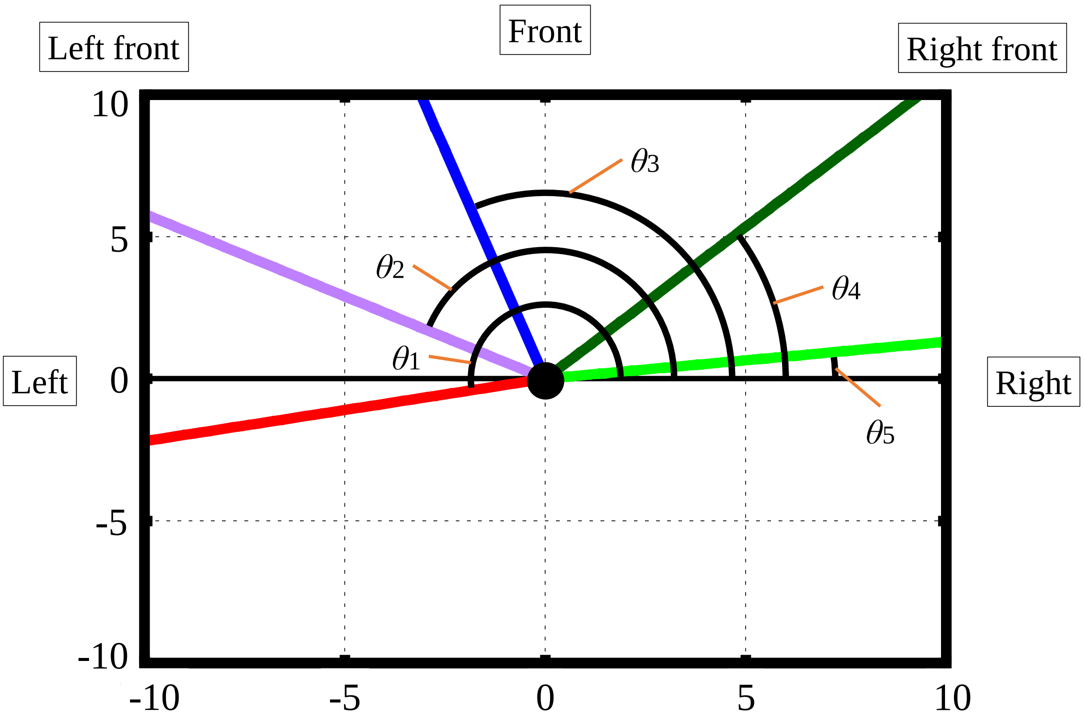


図 4.8: 提示方向 1:近似直線

表 4.3: 提示した方向と近似直線の対応

線の色	方向
RED	Left
PURPLE	Left front
BLUE	Front
DARK-GREEN	Right front
GREEN	Right

表 4.4 に，それぞれの提示方法で計測した軌跡のデータから得られた近似直線の傾きを示し，表 4.5 には，得られた近似直線の角度を示す．また，提示した 5 方向のそれぞれの角度は，右方向は 0，右前方向は $\frac{\pi}{4}$，前方向は $\frac{\pi}{2}$，左前方向は $\frac{3\pi}{4}$，左方向は π となる．

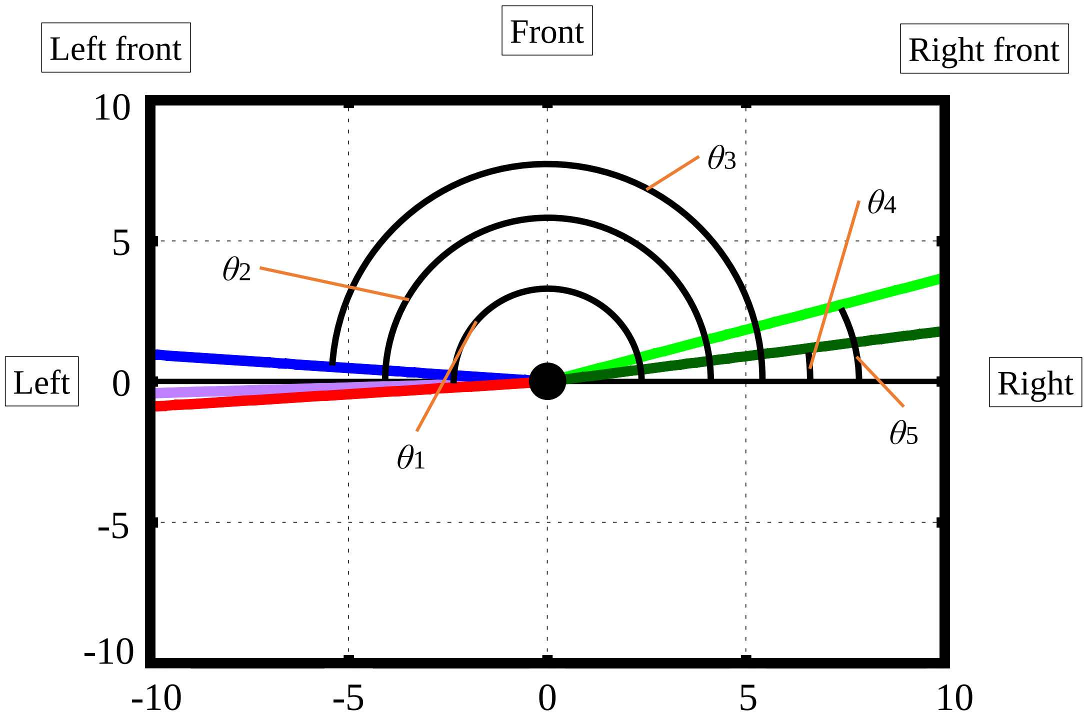


図 4.9: 提示方向 2:近似直線

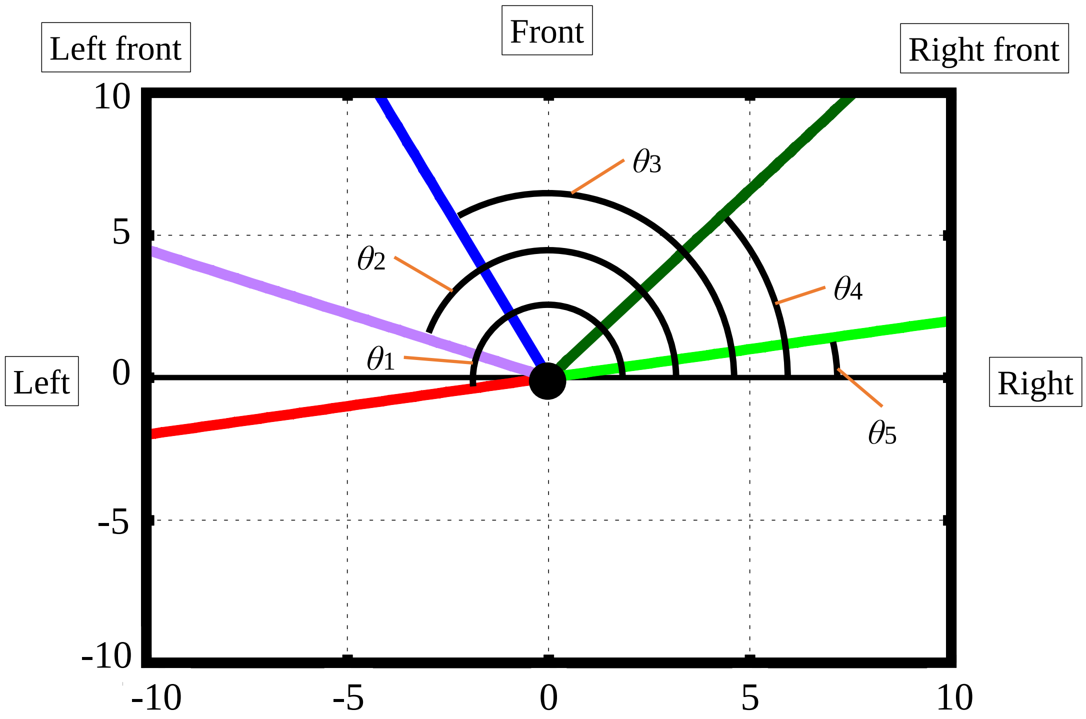


図 4.10: 提示方法 3:近似直線

表 4.4: 提示方向と各手法の近似直線の傾き

提示方向	口頭指示のみ	力覚提示のみ	口頭指示かつ力覚提示
Left	0.22	0.089	0.20
Left front	-0.58	0.041	-0.45
Front	-3.22	-0.097	-2.35
Right front	1.07	0.18	1.32
Right	0.13	0.37	0.20

表 4.5: 近似直線の角度

角度番号	提示方法 1 [deg]	提示方法 2 [deg]	提示方法 3 [deg]
θ_1	192.41	185.09	191.31
θ_2	149.89	182.35	155.77
θ_3	107.25	174.46	113.05
θ_4	45.94	10.20	52.85
θ_5	7.41	20.30	11.31

4.4 考察

想定したそれぞれの方向に対して角度差が ±22.5 deg 未満の範囲であるならば，方向提示は正しく行うことができたと考える．表 4.4 より，力覚提示のみによる方向提示は，左右方向が ±22.5 deg 未満の範囲であるため方向提示が正しく行うことができたと考えられる．前方向が目的の方向とは大きくはずれた方向になっている．これは，すべての提示方法の結果からも読み取ることができる．本装置は左右方向に方向提示が可能であることが確認できた．また，右前方向に比べて左前方向への提示は精度が低いことが読み取れる．本実験の被験者全員の利手が右手であったため，前方向に対しては肘を伸ばさないと装置を前に移動させられないことから，差が出たと考えられる．

第5章　結論

本研究では，力覚によるナビゲーションを目的として，非接地で力を提示することが可能な力覚提示装置を開発した．提案システムでは，風力発生に伴う力を用い，サーボモータによる送風機の回転により異なる方向への力提示を行った．

提案したシステムの方向提示の有効性を確認するためにシステムを構築し被験者実験を行った．提示方向に対して被験者が装置を動かし、モーションキャプチャによって位置計測を行い、提示方向と知覚方向の違いを調査した．評価実験の結果から左右方向に対する方向提示はある程度可能であるが，前方向に対しては改善が求められる．

提案システムによる風抗力を用いた方向提示により、視覚や聴覚に頼らない屋外でのナビゲーションへの応用が期待される。

謝 辞

本研究は大阪大学基礎工学部で行ったものである．

大城研究室に配属となってからこれまでの日々は，自身の未熟さを思い知らされながらも多くを学ぶことの連続でした．大学生として過ごしてきた今までの三年間とは比べられないほど充実した生活を送ることができました．

このような環境を提供していただいたのみならず，研究テーマや方向性などの御助言や本論文の添削など，多大なるご指導をしてくださいました，大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城 理 教授に厚く御礼申し上げます．

本研究のきっかけを与えてくださってから本論文作成におきまして最後まで親身になって相談にのっていただき，多くの御助言や御指摘をしていただいたことに言葉では表しきれない多くの感謝を大阪大学 サイバーメディアセンタ 黒田嘉宏 准教授に厚く御礼申し上げます．

本研究に必要な機材の購入手続きや，本実験に関して適切な御助言をしてくださった，大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊輔 助教に厚く御礼申し上げます．

日頃からの付き合いだけでなく，本研究の回路設計と制作や本論文の執筆や実験環境の構築，本稿の添削など多くの指導をしてくださった，スーパーバイザーの桑谷達之氏，日夏俊氏に深く感謝致します．また，実験環境や実験機器の取り扱いについて様々な御助言をいただきました，井手口裕太氏に深く感謝いたします．そして，本実験を行うためにご配慮くださいました大城研究室の先輩方であります，加藤高浩氏，古澤大樹氏，川口純輝氏，細田椋平氏，加藤弘樹氏，Nadhifa AYUNISA 氏，武村浩志にお礼申し上げます．そして本論文の締めくくりとして，研究室において，本研究に際しても多くの意見を交換しあい，共に助け合った同期の片岡馨氏，又賀祐樹氏に感謝します．

本研究における被験者実験は，大阪大学大学院基礎工学研究科 人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認（27-14）を得て行ったものであり，被験者には実験内容について説明を行い，書面にて同意を得られた場合にのみ測定を行った．

参考文献

[1] 谷口功. 位置情報の基本と技術. 翔泳社 (東京), 2012.

[2] 長谷川保, 松田三恵子, 久保田浩明. 歩行者向け対話型道案内サービスのための案内テキスト生成. 信学技報, TECHNICAL REPORT OF IEICE, HIP2001-13 (2001-07), 2001.

[3] 館暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝. バーチャルリアリティ学. コロナ社 (東京), 2011.

[4] 松田晃一, 細部博史, 由谷哲夫. 3D ユーザインタフェース. 丸善株式会社 (東京), 2005.

[5] 岩田洋夫. ウェアラブル・ハプティックインターフェース. 日本ロボット学会, Vol.20, No.8, pp.809-811, 2002.

[6] 田島寛之, 李雨農, 馬姝涵, 赤羽克仁, 佐藤誠. 6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について. 情報処理学会, インタラクション,2014,C4-2, 2014.

[7] 日本バイナリー株式会社. `http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/Phantom/index.html`. 2015/12/28 閲覧.

[8] 仲田謙太郎, 中村則雄, 山下樹里, 西原清一, 福井幸男. 角運動量変化を利用した力覚提示デバイス. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.115-120, 2001.

[9] Ginga Kato, Yoshihiro Kuroda, Ilana Nisky, Kiyoshi Kiyokawa, and Haruo Takemura. *HapSticks: A Novel Method to Present Vertical Forces in Tool-Mediated Interactions by a Non-Grounded Rotation Mechanism.* IEEE World Haptics Conference 2015, pp. 400-407, 2015, 2015.

[10] CyberGlove Systems 社. `http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/`. 2016/01/07 閲覧.

[11] 吉江将之, 中泉文孝, 矢野博明, 岩田洋夫. ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置による空間探索. 日本 VR 学会論文誌, TVRSJ, Vol.6, pp.95-98, 2001.

[12] Tomohiro Amemiya and Hiroaki Gomi. *Buru-Navi3: Behavioral Navigations Using Illusory Pulled Sensation Created by Thumb-sized Vibrator.* Proceedings of ACM SIGGRAPH Emerging Technologies 2014, Article 4., 2014.

[13] Rekimoto Jun. *Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation.* ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, 2014.

[14] 天目健二, 山口盛兄. 道路網の動的経路誘導システム. 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.211-216, 2002.

[15] 渡辺英寿. ニューロナビゲータのさまざまな応用. 脳神経外科ジャーナル, Vol.7, pp.170-176, 1998.

[16] Reha Vision. `http://www.reha-vision.com/products/index.html`. 2016/01/12 閲覧.

[17] Panasonic. `http://panasonic.jp/car/navi/products/`. 2016/01/12 閲覧.

[18] 雨宮智浩, 杉山久. 牽引力錯覚を利用した牽引式羅針盤による視覚障がい者の歩行誘導の評価. 信学技報, IEICE Technical Report, HCS2009-43, HIP2009-43, WIT2009-43, 2009.

[19] 國安裕生, 中田五月, 橋本悠希, 梶本裕之. 前腕部牽引触覚を用いた方向提示装置. 情報処理学会, インタラクション, 2010, 2010.

[20] 塚田浩二, 安村通晃. Active Belt:触覚情報を用いたベルト型ナビゲーション機構. 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2649-2658, 2002.

[21] 大上毅彦, 曽根順治, 徳山喜政, 今野晃市. 風力を用いた装着型力覚提示デバイスの検討. TVRSJ, Vol.13, No.1, pp.105-108, 2008.

[22] Adam Spiers, Aaron Dollar, Janet van der Linden, and Maria Oshodi. *First Validation of the Haptic Sandwich: A Shape Changing Handheld Haptic Navigation Aid.* 17th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2015), 27-31 July 2015, Istanbul, Turkey, IEEE, pp. 144-151, 2015.

[23] 小池勝. 流体機械工学 (機械系教科書シリーズ). コロナ社 (東京), 2009.

[24] PEAD14028BH. `http://www.aavid.com/sites/default/files/products/fans/pdf/aavid31_PE4028.pdf`. 2016/02/02 閲覧.

[25] C1815. http://www.op316.com/tubes/tips/image/2sc1815.pdf. 2016/01/27 閲覧.

[26] Bose QuietComfort 15. http://www.bose.co.jp/assets/pdf/manual/qc15s_manual.pdf. 2016/01/26 閲覧.