筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

複数の小型プロペラを用いた力覚提示の方向知覚特性の調査

石井 晃斗

指導教員　川口 一画，志築 文太郎

2026年1月

概要

スマートウォッチなどの小型デバイスを用いた方向提示が，道案内などの場面で活用されている．現在，スマートウォッチ等で一般的に用いられている方向提示手法は，短い振動の回数やパターンで方向を符号化する方法，あるいは瞬間的な触覚提示に依存する方法が多く用いられている．しかし，これらの手法には提示できる方向数が限られる，あるいは解釈のための認知負荷が高いといった課題がある．一方，より大型の装置では継続的な力覚による分かりやすい方向提示を実現することが可能であり，例として盲導犬ロボットや圧縮空気噴射デバイスを用いる手法が研究されている．しかし，これらは強力な力覚を発生させるために大型の装置を要し，小型デバイスへの実装には適さない．そこで本研究では，小型デバイスで力覚による方向提示を実現するため，ドローン用の小型プロペラを用いた力覚提示手法を提案する．本研究では，2 種類の保持方法からなる，複数の小型プロペラを組み込んだ力覚提示デバイスを用いて提示方向の知覚特性を調査した．調査の結果，プロペラによる方向提示を行うデバイスにおいては，保持方法が知覚特性と作業負荷に大きく影響することが示唆された．

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1 背景 1
1.2 目的とアプローチ 1
1.3 貢献 2
1.4 本論文の構成 2

第 2 章　関連研究 **3**
2.1 ウェアラブルデバイスを用いた方向提示手法に関する研究 3
2.2 大型装置によるナビゲーションに関する研究 3
2.3 継続的な力覚提示を行うデバイスに関する研究 4

第 3 章　提案システム **5**
3.1 設計指針 5
3.2 システム構成 5
3.2.1 ハードウェア 5
3.2.2 ソフトウェア 11

第 4 章　実験 **12**
4.1 実験条件 12
4.2 実験タスク 12
4.3 実験環境 15
4.4 実験参加者 15
4.5 実験手順 15
4.6 評価指標 16
4.6.1 NASA-TLX 16
4.6.2 方向知覚精度の客観的評価 16
4.6.3 方向知覚の印象についての主観的評価 16

第 5 章　実験結果および考察 **18**
5.1 NASA-TLX 18
5.2 方向知覚精度の客観的評価 19
5.3 方向知覚の印象についての主観的評価 23
5.3.1 力覚の分かりやすさおよび回答への確信度 23

5.3.2 条件の好み 23
5.4 考察 24
5.4.1 小型力覚デバイスによる方向提示の知覚特性 24
5.4.2 保持方法が知覚特性に与える影響 25

第 6 章 本研究の制約および今後の課題 **27**
6.1 システムによる制約 27
6.2 実験設計による制約 27
6.3 実用化に向けた制約 28

第 7 章 おわりに **29**

謝辞 **30**

参考文献 **31**

付 録 A 実験にて使用したアンケート **33**
A.1 実験前アンケート 34
A.2 実験後アンケート 35

図 目 次

3.1 モータ制御回路の実装図 6
3.2 デバイスを上から見た際の各モータ配置と正転時の力覚提示方向 6
3.3 筐体の試作品の一例 8
3.4 手首に装着するタイプの筐体 9
3.5 手で握るタイプの筐体 10

4.1 Web アプリの回答用画面 13
4.2 7 段階リッカート尺度のアンケート回答画面 14
4.3 実験環境 15

5.1 NASA-TLX の結果（*: $p < 0.05$） 19
5.2 条件とデューティ比ごとの方向別誤差 20
5.3 条件とデューティ比ごとの方向別平均正答率（平均 $\pm$ 標準偏差） 21
5.4 条件とデューティ比ごとの混同行列 22
5.5 力覚の分かりやすさと回答への確信度の評価結果 23
5.6 条件の好みのアンケート結果 24

表 目 次

3.1 角度コマンドと各モータの回転方向の対応 11

4.1 7 段階リッカート尺度のアンケートの内容 13
4.2 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目. 17

第1章　はじめに

本研究では，複数のドローン用小型プロペラを用いた力覚による方向提示デバイスを提案する．さらに，提案システムを用いた実験を実施し，保持方法が力覚による方向提示の知覚特性に与える影響を調査した．本章では，本研究の背景として，既存の方向提示手法の知見および課題を説明する．次に，本研究の目的とアプローチ，貢献，および本論文の構成を示す．

1.1　背景

小型デバイスを用いる道案内などの場面で，視覚に依らない手法を用いた方向提示が利用されることがある．現在，市販品のスマートウォッチ等では，右や左などの方向に対応する複数の振動パターン（例: 短い振動 2 回で右折，長い振動 1 回で左折）を使って方向提示が行われている．しかし，振動パターンを用いた手法には，方向に感覚的な接続がないなどの理由から認知負荷が高いという課題がある．その他にも，小型デバイスに搭載した振動デバイスを活用し，瞬間的な触覚刺激によって方向を伝える手法が多く研究されている [1][2]．しかし，このような瞬間的な振動触覚による方向提示には，実際に引っ張られるような継続的な力覚を再現することができないという課題がある．

一方，より大型の装置では継続的な力覚による直接的な方向提示を実現することが可能であり，例として盲導犬ロボット [3] や圧縮空気噴射デバイスを用いる手法 [4] が研究されている．しかし，これらは強力な力覚を発生させるために大型の装置を要し，小型デバイスへの実装には適さないという課題が存在する．力覚提示デバイスに関する研究の多くは VR などの体験向上を目的としたものであり，屋外で携帯可能な大きさの小型デバイスに関する研究は我々の知る限りでは見当たらない．そこで本研究では，小型デバイスで力覚による方向提示を行った際の知覚特性を調査することを目的とし，ドローン用の小型プロペラを用いた力覚提示手法を提案する．

1.2　目的とアプローチ

本研究の目的は，小型デバイスで力覚による方向提示を行った際の知覚特性を調査することである．先行研究で実装されている力覚提示デバイスの多くでは，力覚フィードバックによる触覚再現を目的としていることから，仮想物体から押された感覚などを再現するための，方向提示単体を目的とするには強力すぎる力覚提示機能を搭載している．そのため，方向提示のみを目的とした，最小構成の力覚提示デバイスに関する知見は限られている．

そこで本研究では，ドローン用の小型プロペラを複数搭載した力覚提示デバイスを設計・製作した．このデバイスは，4 つのプロペラを円周上に配置し，各プロペラの駆動によって任意の方向へ継続的な力覚を提示することが可能である．また，保持方法による違いを評価するため，手首装着型および手持ち型の 2 種類の筐体を実装した．このデバイスを用いた力覚による方向提示を行った際の知覚特性を調査するとともに，保持方法が知覚特性と作業負荷に与える影響を評価する．

1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- ドローン用の小型プロペラを用いた小型デバイスによる力覚提示手法を提案した．
- 提案システムを使用した力覚による方向提示を行った際の知覚特性を調査した．
- 保持方法が知覚特性と作業負荷に与える影響を評価した．

1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる．第 1 章においては，本研究の背景，目的とアプローチ，および貢献を示した．第 2 章においては，本研究に関連する研究を述べ，本研究の位置づけを示す．第 3 章においては，本研究における提案システムを示す．第 4 章においては，本研究を評価するために行った評価実験について述べる．第 5 章においては，4 章において述べた実験における結果，および考察を述べる．第 6 章においては，本研究における制約および今後の課題を述べる．第 7 章においては，本研究の結論を述べる．

第2章　関連研究

本章では，これまで行われてきたナビゲーションや方向提示に関する研究を提示し，力覚提示による方向提示を行うことでどのような利点があるかを述べる．その後，力覚提示を行うデバイスに関する研究を提示し，本研究の位置づけを示す．

2.1　ウェアラブルデバイスを用いた方向提示手法に関する研究

ウェアラブルデバイスや，携帯可能な小型デバイスを用いた方向提示に関する研究が複数行われている．FEEDI[1] は，足部に装着することで，ナビゲーションや方向提示を行うことが可能なデバイスである．このデバイスでは，8 方向にそれぞれ対応する振動モータを搭載し，振動による触覚提示を用いて方向提示を行うことが可能である．一方で，振動モータを利用する方式では提示できる方向数が限られるという課題が存在する．そのほかにも，ぶるなび 4[2] は，非対称振動による錯覚を利用した方向提示デバイスである．しかし，このような振動による触覚提示では，実際に引っ張られるような直接的な力覚を再現することができないという課題がある．Yuxin らの研究 [4] では，振動触覚は質感の表現によく用いられるが，持続的な重みや物体からの反力といった継続的な物理的抵抗を表現するには不十分であることを指摘している．

以上のことから，より質の高い方向を提示するためには，継続的な力覚提示を行うデバイスを用いることが有効であると考えられる．

2.2　大型装置によるナビゲーションに関する研究

大型装置による方向提示手法は，主にナビゲーションなどの用途で多く研究されている．Cai らが提案する RDog[3] は，4 足歩行型ロボットを用いて視覚障害者の移動を支援するシステムである．このシステムでは，力覚フィードバックを伴う具体的な経路の誘導を行うことによって，従来の音声のみでの案内を行うデバイスと比較してより効率的なナビゲーションと認知負荷の軽減を実現可能であることが示された．また，高田らの研究 [5] では，ヘルメットの頭頂部に飛行ドローンを装着することにより，プロペラの推進力によってユーザの頭部を牽引し，ユーザの歩行方向を制御する手法を提案している．この手法を用いることにより，歩行時および静止時に，意図して逆らわないと歩き出す程度の牽引力を提示できることが示されている．

以上のことから，牽引力などの力覚を利用した方向提示手法は，ナビゲーションなどの用途において有効な手法であると考えられる．しかしながら，これらの手法は大型のロボットやドローンを必要とすることから，ウェアラブルデバイスへ直接応用することは難しいと考えられる．

2.3 継続的な力覚提示を行うデバイスに関する研究

継続的な力覚提示を行うデバイスに関する研究は多数行われている．主に VR の体験向上を目的としたものであり，力覚の発生源としても様々なものが提案されている．AirPush[4] は，指先に圧縮空気を噴射することにより，指先に方向を伴う力覚フィードバックを提示するデバイスである．このデバイスでは，力覚の発生源として大型の設置型エアコンプレッサを使用している．また，Thor's Hammer[6] は，6 つのモータとプロペラを利用して 3 次元の自由な方向に力覚を発生させることが可能なデバイスであり，プロペラを利用した手持ち型のデバイスにより高精度な方向提示が可能であることを示している．このデバイスでは，力覚の発生源として複数の大型プロペラの回転を利用しており，モータへの電力供給を外部の電源から行っている．

これらの研究は，力覚提示を用いることによりユーザに対して高精度な方向提示を行うことが可能であることを示している．しかしながら，これらのシステムの研究目的は VR の体験向上を目的としているため，触覚再現のために方向提示としては過剰な強さの力覚を提示する機能を備えている．結果，強力な力覚を発生させるために大型のプロペラや外付けのパワーソースを必要とすることから，これらのシステムを直接ウェアラブルデバイスとして活用することは難しい．しかしながら，ナビゲーション用の方向提示に役割を限定させた，より小型の動力源とバッテリを備えた小型デバイスを実装することは十分可能であると考えられる．

そこで本研究では，小型デバイスで力覚による方向提示を行うため，ドローン用の小型プロペラを用いた力覚提示手法を提案し，小型デバイスで力覚による方向提示を行った際の知覚特性を調査することを目的とする．

第3章　提案システム

本章では，本研究にて用いたシステムの設計を述べる．最初にシステムの設計指針について述べた後，システムの構成について述べる．

3.1　設計指針

2 章で得られた知見をもとに，本研究では，携帯可能かつ，継続的な力覚提示を行うことが可能な方向提示デバイスを提案する．本システムでは，力覚の発生源としてドローン用の小型プロペラを用いることにより，小型デバイスでも力覚による方向提示を行うことが可能である．このシステムを使用することにより，ユーザは力覚による高精度な方向提示を受けることが可能となることが期待される．

また，力覚を手のどの個所に与えるかによって提示方向の知覚特性が異なることが考えられる．そこで本研究では，保持方法が提示方向の知覚特性に与える影響を評価することを目的として，手首装着型および手持ち型の 2 種類の筐体を製作する．

3.2　システム構成

本研究にて製作したシステムは，4 つの小型モータを ESP32 マイコン [7] と MX1508 モータドライバ [8] で制御する形で実装した．ESP32 マイコンは，Bluetooth Low Energy (BLE)[9] を用いて外部のアプリケーションから制御を受けることが可能である．

3.2.1　ハードウェア

本システムでは，4 つの直径 75 mm プロペラを同一平面上の 4 方向に配置し，約 40000RPM の 3.7 V マイクロコアレスモータで駆動する．このモータを，MX1508 モータドライバで制御することにより，モータの回転方向および回転速度を制御することが可能である．4 つのプロペラから生じる推力を合成することで，同一平面上の任意の方向に調整可能な力覚を発生させることができる．モータ制御回路の実装図を図 3.1 に示す．また，デバイスを上から見た際の各モータの配置およびモータ正転時の力覚提示方向を図 3.2 に示す．

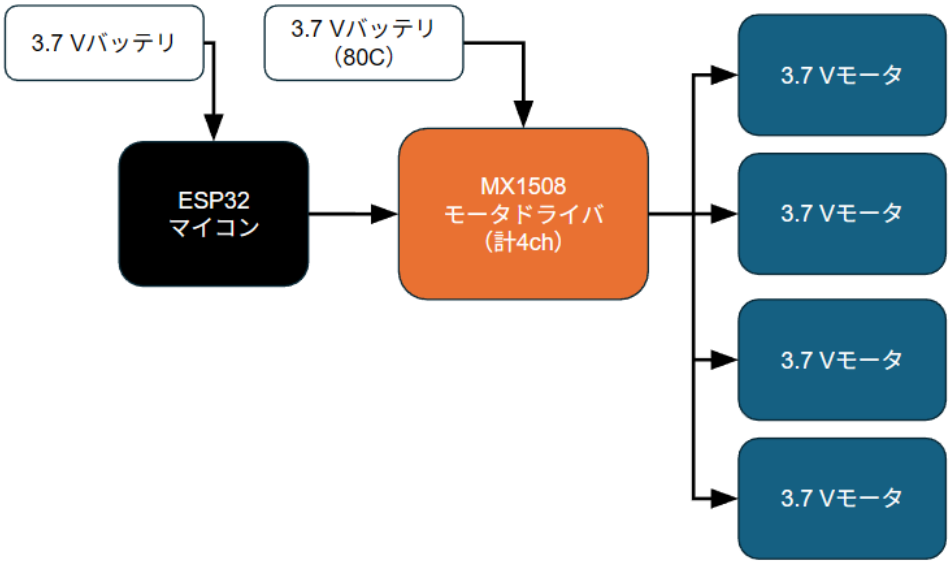


図 3.1: モータ制御回路の実装図

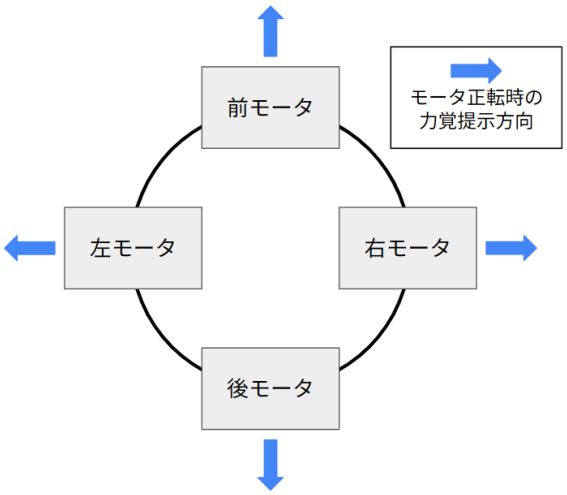


図 3.2: デバイスを上から見た際の各モータ配置と正転時の力覚提示方向

本システムの実装においては，マイコンに ESP32-DevKitC を使用した．ESP32-DevKitC は，ESP-WROOM-32 マイコンを搭載した開発ボードであり，2.4 GHz の Wi-Fi と Bluetooth による通信機能を内蔵している．また，これらのマイコンおよびモータドライバへの電源供給はそれぞれ独立したリチウムイオンバッテリから行うことにより，デバイスの小型化を実現した．また，モータドライバに接続するバッテリには高 C レートのバッテリを使用することで，全てのモータが高速回転している際にも安定して電力を供給することが可能となっている．これらのバッテリやマイコンなどは十分に軽量かつ小型であるため，先行研究で提案されている力覚提示デバイスの課題点である携帯性の低さを克服している．なお，4 章で実施した実験においては，モータ制御回路の一部をブレッドボード上に実装しており，バッテリおよびモータドライバはデバイス本体に格納されていない．

デバイス本体の筐体作成は 3D プリンタを用いて行った．筐体 3D データの設計には Autodesk Fusion 360[10] を使用している．また，筐体を設計するにあたり，最適なプロペラの配置や筐体の形状を探るため，複数の試作品を作成した．筐体の試作品の一例を図 3.3 に示す．

最終的に，保持する手法が異なる 2 種類の筐体を製作した．1 つは，手首に装着するタイプの筐体であり，もう 1 つは，手で握るタイプの筐体である．手首に装着するタイプの筐体を図 3.4 に示し，手で握るタイプの筐体を図 3.5 に示す．これらの筐体には回転するプロペラから身体を保護するためのシールドが設けられている．



図 3.3: 筐体の試作品の一例



図 3.4: 手首に装着するタイプの筐体



図 3.5: 手で握るタイプの筐体

3.2.2 ソフトウェア

本システムでは，ESP32 マイコンを Arduino 言語のプログラムで制御することにより，モータの制御を行う．通信には Bluetooth Low Energy (BLE) を用い，ESP32 は BLE ペリフェラルとして動作する．送信データは UTF-8 テキストとし，角度のみのコマンド（例：‘90’）または角度とデューティ比を併記したコマンド（例：‘90 75’）を送信する．

4 章で実施する実験においては，角度は 0°，45°，90°，135°，180°，225°，270°，315° の 8 方向のみを用い，デューティ比は 70%および 100%の 2 段階で指定可能である．角度コマンドと各モータ（右 A，前 B，左 C，後 D）の回転方向（正転・逆転・停止）の対応を表 3.1 に示す．

表 3.1: 角度コマンドと各モータの回転方向の対応

角度コマンド	右 A	前 B	左 C	後 D
0	正転	停止	逆転	停止
45	正転	正転	逆転	逆転
90	停止	正転	停止	逆転
135	逆転	正転	正転	逆転
180	逆転	停止	正転	停止
225	逆転	逆転	正転	正転
270	停止	逆転	停止	正転
315	正転	逆転	逆転	正転

実験においては，実験用 Web アプリと提案デバイスを BLE 経由で通信することによりデバイスの制御を行う．実験用 Web アプリの仕様に関しては，4 章で詳述する．

第4章　実験

本研究では，小型プロペラによる力覚提示による方向知覚特性を調査するため，実装したシステムを用いて実験を行った．本章では，本実験における実験条件，実験タスク，実験環境，実験手順，および評価指標を述べる．

4.1　実験条件

実験条件は以下の 2 条件で，全て参加者内配置で設計した．

- **wrist-worn 条件** 図 3.4 の手首に装着するタイプの筐体を使用する．
- **hand-grip 条件** 図 3.5 の手で握るタイプの筐体を使用する．

なお，wrist-worn 条件においては，利き手を前方に向けた状態で，手首にある筐体から見て手の方向が図 3.2 の前モータの方向になるように筐体を装着した．

4.2　実験タスク

本実験では，提案システムからランダムに提示される力覚の方向を参加者が回答するタスクを設定した．タスクの進行は専用の Web アプリを用いて実施した．タスクを開始すると，参加者にはデバイスから 8 方向および 2 段階の力覚強度のランダムな力覚が 3 秒間提示された．力覚提示を開始した時点から，参加者は Web アプリ画面の円形の回答エリアをクリックすることで知覚した力覚の方向を回答することが可能となった．Web アプリの回答用画面を図 4.1 に示す．角度の回答は 0.01° 刻みで選択できるほか，方向を判別できなかった場合はスキップすることが可能であった．知覚した回答を選択した後に「次のタスク」ボタンをクリックする，もしくは「スキップ」ボタンをクリックすると，直前に提示された力覚に対する主観的評価に関するアンケート回答画面が表示され，力覚の分かりやすさと回答への確信度について 7 段階リッカート尺度で評価を行った．アンケート回答画面を図 4.2 に示し，また，アンケートの内容を表 4.1 に示す．両方の項目に回答すると次試行へ進み，異なる方向と強さの力覚提示が開始された．参加者 1 人あたり，これらの小タスクを 2 手法× 8 方向× 2 力覚強度の計 32 試行実施した．



図 4.1: Web アプリの回答用画面

表 4.1: 7 段階リッカート尺度のアンケートの内容

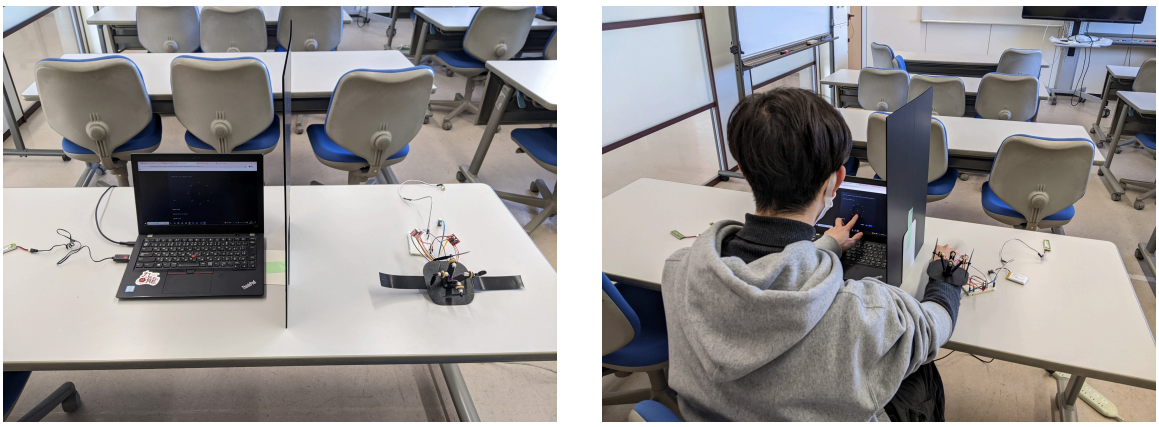
項目	内容
力覚の分かりやすさ	提示された力覚が直感的に理解できたか
回答への確信度	回答した方向に対してどの程度確信があるか



図 4.2: 7 段階リッカート尺度のアンケート回答画面

4.3　実験環境

実験環境を図 4.3 に示す．実験は，ラップトップコンピュータ ThinkPad X280（CPU: Intel Core i7-8550U，メモリ：8GB，OS: Windows 10）を用いて実施した．また，実装デバイスを参加者が視認することで知覚特性に影響を与えないために，デバイスを隠す仕切り板を設置した．参加者はラップトップコンピュータの正面に着席し，各条件の装着方法に応じてデバイスを利き手に装着し，仕切り板の背後に提案デバイスを配置して実験を行った．実験者は，同室にて参加者の視界に入らない位置からシステムの監視を行った．ただし，タスク実施前後のデバイスとの接続確認時やタスク実施ログの保存時には，実験者がコンピュータを直接操作した．



(a) 実験環境　　(b) 実験を実施している様子

図 4.3: 実験環境

4.4　実験参加者

実験参加者は計 10 名（男性 8 名，女性 2 名，平均 21.2 歳，標準偏差 0.79 歳，右利き 10 名）の大学生である．実験は参加者内配置で行い，各参加者に対して 2 条件を実施した．実験全体の所用時間は 45 分程度であった．

4.5　実験手順

実験では，最初にシステムの説明，タスクの説明，注意事項の説明を行った．このとき，参加者にはデバイスから提示される方向の種類が 8 方向であることは伝えず，自身が知覚した方向を正確に回答するように指示した．続いて，実験前アンケートを実施した．その後，参加者は，提案システムを装着しながら 4.2 節で述べたタスクを行った．ここで，実験参加者のうち，参加者 ID が奇数の参加者は wrist-worn 条件，参加者 ID が偶数の参加者は hand-grip 条

件を先に実施した．そして，それぞれの条件に対して，タスク終了後に作業負荷調査のための NASA Task Load Index (NASA-TLX)[11] を実施した．最後に，全ての条件が終了した後に実験全体に対するアンケートを行った．

タスクに対するアンケート，および実験全体に対するアンケートの具体的な内容を，付録 A として掲載する．

4.6 評価指標

各条件において，提案システムによる力覚提示の作業負荷および方向知覚特性を評価するため，以下の 3 つの指標を用いた．

4.6.1 NASA-TLX

システムの作業負荷を評価するために，NASA-TLX を用いた．NASA-TLX では，知的・知覚的要求，身体的要求，時間的要求，作業成績，努力，フラストレーションの 6 つの尺度を用いてワークロードを評価する．評価は 0 から 100 の範囲で 5 点刻みの 21 段階で行い，さらに各尺度の重要度を一対比較して加重平均を算出することで，総合的な作業負荷スコアを導出する．本実験では，表 4.2 に示す質問項目を用いて評価を実施した．

4.6.2 方向知覚精度の客観的評価

提案システムによる力覚提示の方向知覚特性を評価するため，各条件のタスク試行において，以下の 2 つの指標を用いた．

誤差 回答角度と正解角度の差（360° の循環を考慮．例えば，正解角度が 315°，回答が 10° の場合，誤差は +55° となる．）

正答率 誤差の大きさが一定の閾値（22.5°）以内の試行の割合

4.6.3 方向知覚の印象についての主観的評価

提案システムによる力覚提示の方向知覚特性を評価するため，各条件のタスク試行において，以下の 2 つの指標について，7 段階リッカート尺度（1: 全くそう思わない 〜 7: 非常にそう思う）を用いて評価を行った．

力覚の分かりやすさ 提示された力覚が直感的に理解できたか

回答への確信度 回答した方向に対してどの程度確信があるか

また，実験終了時に，より好ましいと感じた条件を選択させ，その理由について任意で記述するアンケートを実施した．最後に，実験や提案システム全体に対する意見について任意で記述するアンケートを実施した．

表 4.2: 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目.

	質問項目
知的・知覚的要求	どの程度の知的・知覚的活動（考える，決める，計算する，記憶する，見るなど）を必要としましたか．課題はやさしかったですか難しかったですか，単純でしたか複雑でしたか，正確さが求められましたか大ざっぱでよかったですか
身体的要求	どの程度の身体的活動（押す，引く，回す，制御する，動き回るなど）を必要としましたか．作業はラクでしたかキツかったですか，ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたか，休み休みできましたか働きづめでしたか
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか．ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか，それとも速くて余裕のないものでしたか
作業成績	作業指示者（またはあなた自身）によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか．目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか
努力	作業成績のレベルを達成・維持するために，精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたか
フラストレーション	作業中に，不安感，落胆，いらいら，ストレス，悩みをどの程度感じましたか．あるいは逆に，安心感，満足感，充足感，楽しさ，リラックスをどの程度感じましたか

第5章　実験結果および考察

本章では，実験結果について，各評価指標ごとの結果を述べる．また，結果に基づく考察についても述べる．なお，本研究の各検定において，p 値が 0.05 未満の場合に統計的に有意差があると判断した．

5.1　NASA-TLX

NASA-TLX の結果について，条件間で比較を行った．各スコアにつき，シャピロ・ウィルク検定を行い正規性を判定し，正規性が認められるものについては対応のある t 検定を，認められないものについてはウィルコクソンの符号順位検定を行った．結果としては低い方が作業負荷が小さいことを表している．

各条件の NASA-TLX における，下位尺度のスコアおよび総合スコアを図 5.1 に示す．まず，総合スコアに基づき wrist-worn 条件と hand-grip 条件の作業負荷を比較する．総合スコアに対してシャピロ・ウィルク検定を実施した結果，正規性がみられたため，対応のある t 検定を実施した結果，有意差がみられた（$t(9) = 3.206$，$p = 0.0107$）．参考に，下位尺度における検定結果についても記述する．各下位尺度に対してシャピロ・ウィルク検定を実施した結果，知的・知覚的要求，身体的要求，作業成績，努力，およびフラストレーションの尺度において正規性がみられた．これら 5 項目に対して対応のある t 検定を実施した結果，有意差はみられなかった（知的・知覚的要求: $t(9) = 2.228$，$p = 0.0528$，身体的要求: $t(9) = 1.435$，$p = 0.185$，作業成績: $t(9) = 2.097$，$p = 0.0654$，努力: $t(9) = 2.116$，$p = 0.0635$，フラストレーション: $t(9) = 1.872$，$p = 0.0940$）．正規性がみられなかったタイムプレッシャー尺度に対しては，ウィルコクソンの符号順位検定を実施した．その結果，有意差はみられなかった（$W = 11$，$p = 1.00$）．

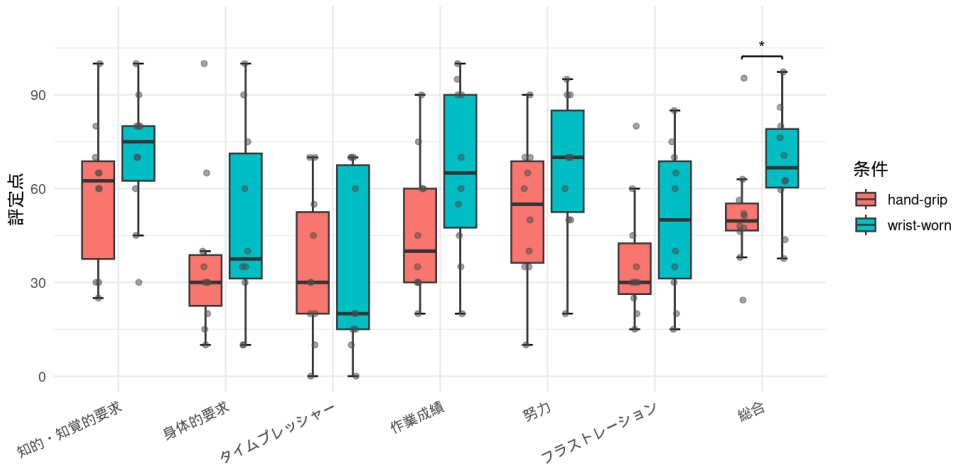


図 5.1: NASA-TLX の結果（*: $p < 0.05$）

5.2 方向知覚精度の客観的評価

実験結果の分析を行うにあたって，スキップした回答については，正答率および平均誤差の計算において除外した．

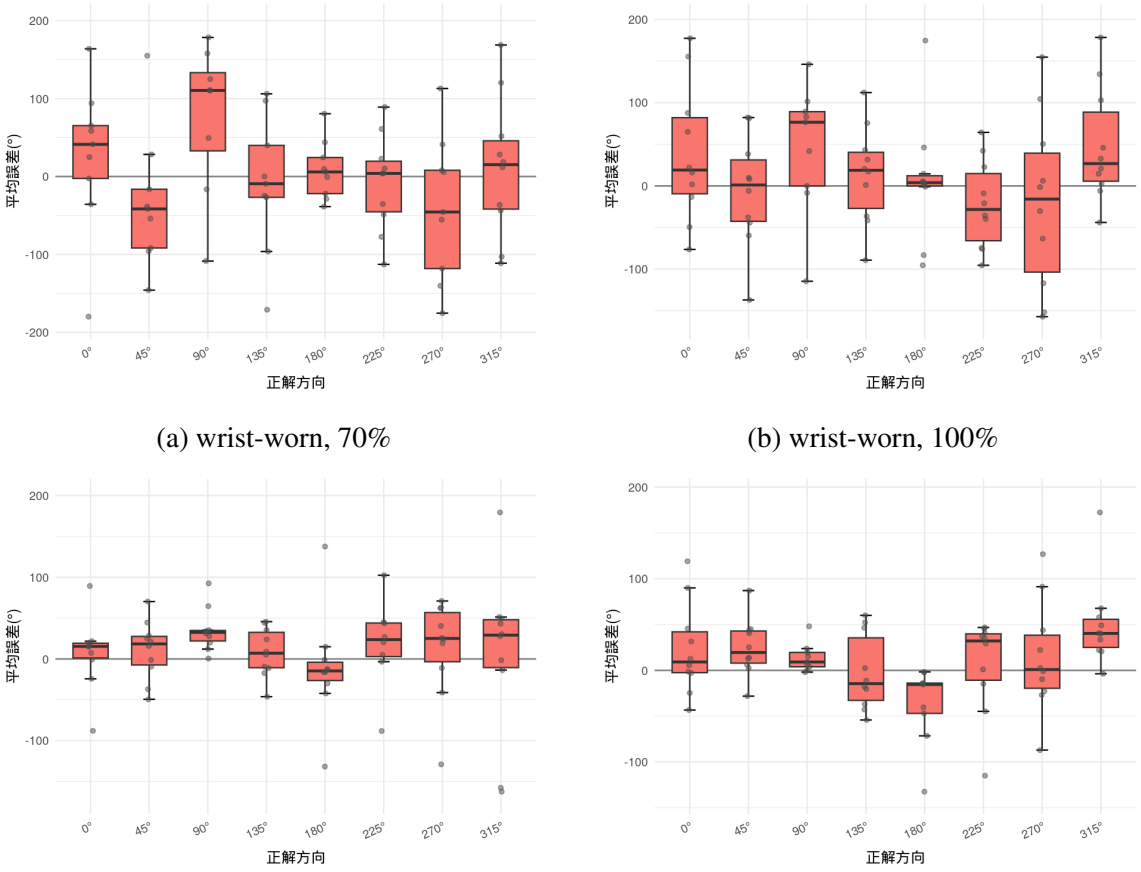
条件とデューティ比ごとの，方向別誤差を図 5.2 に示す．同様に，方向別平均正答率を図 5.3 に示す．また，条件とデューティ比ごとの混同行列を図 5.4 に示す．混同行列における回答方向は，8 方向（0°，45°，90°，135°，180°，225°，270°，315°）のうち最も近い方向として扱った．境界値（例：22.5°，67.5°）のように距離が同率最小となる場合は，方向配列の順序に従い小さい角度側に割り当てた．すなわち，0° は $337.5° \leq \theta < 360°$ または $0° \leq \theta \leq 22.5°$ に対応し，45° は $22.5° < \theta \leq 67.5°$ に対応する．スキップ（$\theta < 0$）は「skip」として別カテゴリに集計した．

hand-grip 条件の平均正答率は 41.7%，標準偏差は 49.5%だった．また，誤差の大きさの平均は 38.5°，標準偏差は 37.0° だった．最も正答率が高い参加者の正答率は 68.8%，誤差の大きさの平均は 18.5° だった．最も正答率が低い参加者の正答率は 0.0%，誤差の大きさの平均は 59.6° だった．wrist-worn 条件の平均正答率は 27.6%，標準偏差は 44.9%だった．また，誤差の大きさの平均は 62.5°，標準偏差は 51.4° だった．最も正答率が高い参加者の正答率は 35.7%，誤差の大きさの平均は 34.4° だった．最も正答率が低い参加者の正答率は 14.3%，誤差の大きさの平均は 67.9° だった．

タスク結果の誤差について，絶対誤差を従属変数とし，方向（8 方向），条件（hand-grip / wrist-worn），デューティ比（70% / 100%）を固定効果，参加者をランダム効果とする線形混合効果モデル（LMM）を適用した．その結果，条件の主効果は有意であり（$\chi^2(1) = 24.263$, $p = 8.41 \times 10^{-7}$），条件×方向の交互作用も有意であった（$\chi^2(7) = 18.961$，$p = 0.00831$）．一方で，方向の主効果は有意ではなく（$\chi^2(7) = 13.333$，$p = 0.0644$），デューティ比の主効果も有意ではなかった（$\chi^2(1) = 1.414$，$p = 0.234$）．また，条件×デューティ比（$\chi^2(1) = 0.241$,

$p = 0.623$）およびデューティ比×方向（$\chi^2(7) = 4.454$，$p = 0.726$）の交互作用は有意ではなかった．

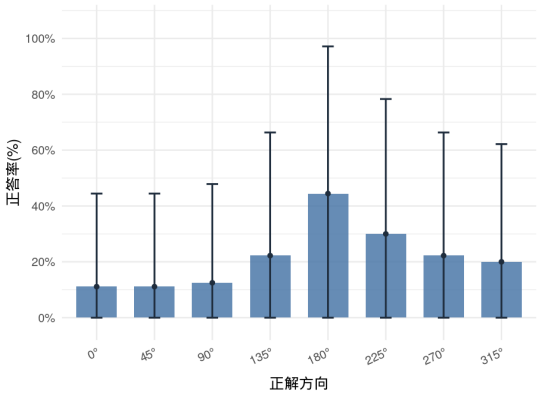
条件×方向の交互作用について，方向ごとの条件差を Tukey 法で多重比較した．その結果，0°（$p = 0.0056$），45°（$p = 0.0177$），90°（$p = 2.05 \times 10^{-6}$），および 270°（$p = 0.0080$）で hand-grip の絶対誤差が wrist-worn より有意に小さかった．一方，135°（$p = 0.0514$），180°（$p = 0.7765$），225°（$p = 0.6010$），315°（$p = 0.8438$）では有意差はみられなかった．このことから，絶対誤差の条件差は全方向で一様ではなく，保持方法の優位性は特定の方向に限られることが示された．



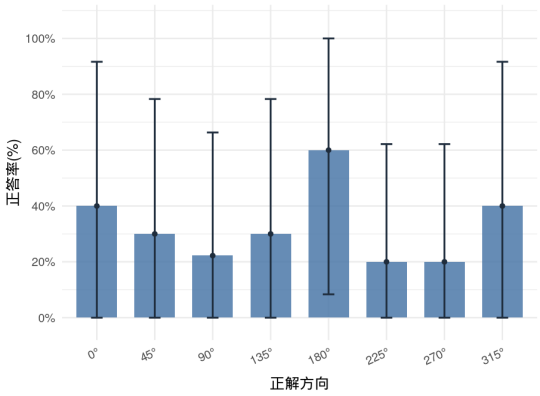
(a) wrist-worn, 70%　(b) wrist-worn, 100%

(c) hand-grip, 70%　(d) hand-grip, 100%

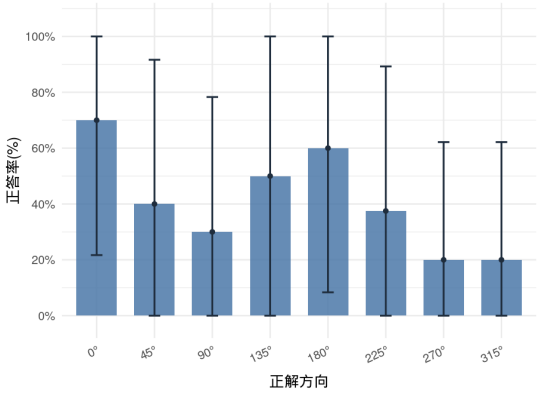
図 5.2: 条件とデューティ比ごとの方向別誤差



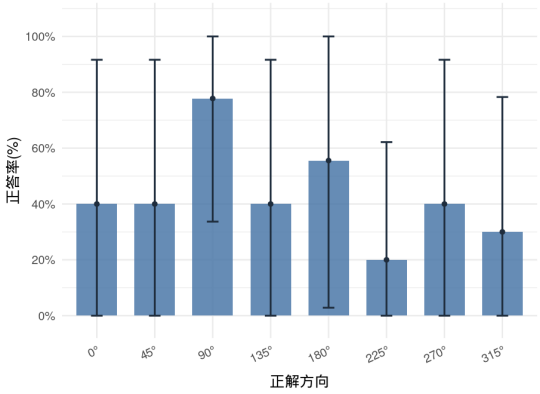
(a) wrist-worn, 70%



(b) wrist-worn, 100%

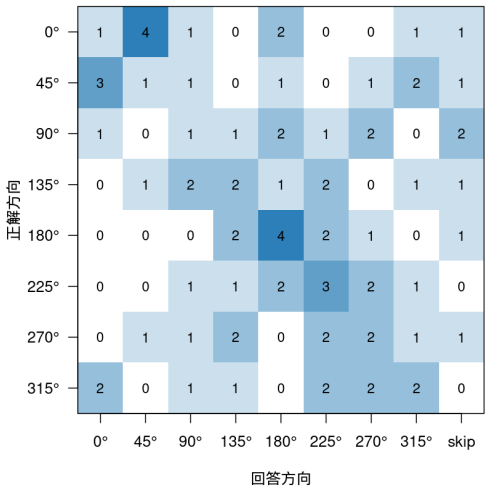


(c) hand-grip, 70%

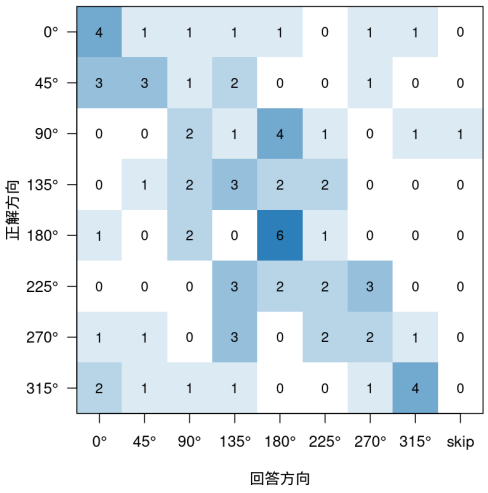


(d) hand-grip, 100%

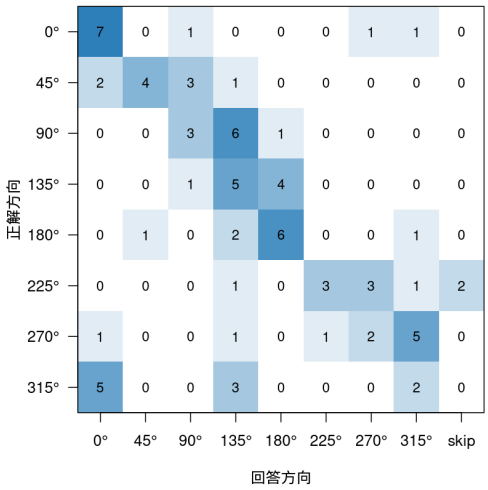
図 5.3: 条件とデューティ比ごとの方向別平均正答率（平均 ± 標準偏差）



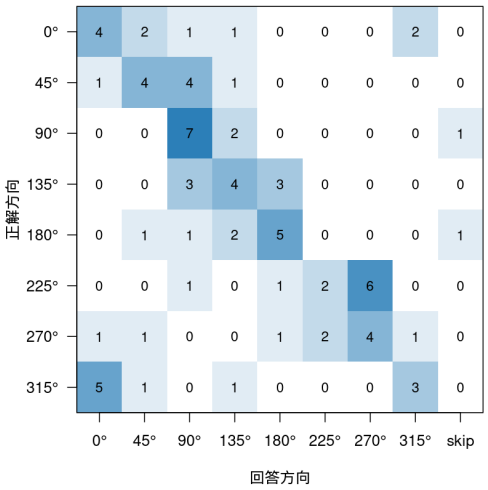
(a) wrist-worn, 70%



(b) wrist-worn, 100%



(c) hand-grip, 70%



(d) hand-grip, 100%

図 5.4: 条件とデューティ比ごとの混同行列

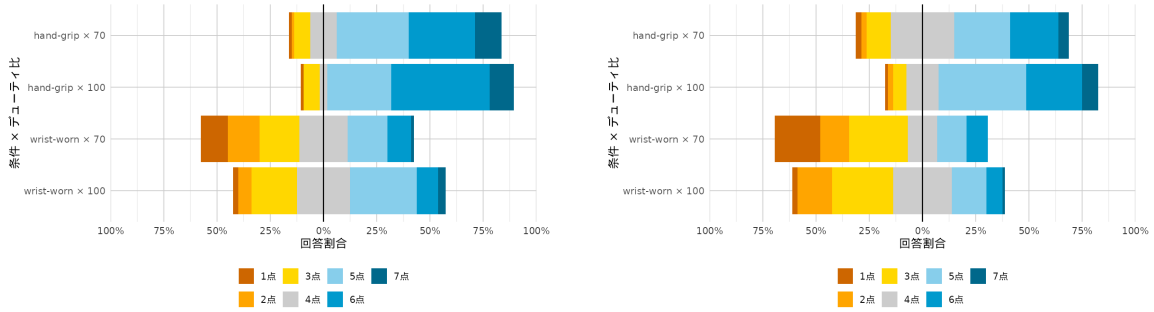
5.3　方向知覚の印象についての主観的評価

本節においては，力覚の分かりやすさと回答への確信度，および条件の好みの結果について述べる．

5.3.1　力覚の分かりやすさおよび回答への確信度

条件とデューティ比ごとの，力覚の分かりやすさと回答への確信度に対する 7 段階リッカート尺度を用いた評価結果を図 5.5 に示す．

力覚の分かりやすさおよび回答への確信度を従属変数とし，条件，方向，デューティ比を固定効果，参加者をランダム効果とする順序ロジスティック混合効果モデル（CLMM）を適用した．力覚の分かりやすさでは条件（$\chi^2(1) = 123.141$，$p = 1.30 \times 10^{-28}$）およびデューティ比（$\chi^2(1) = 11.351$，$p = 7.54 \times 10^{-4}$）の主効果が有意であり，方向の主効果は有意ではなかった（$\chi^2(7) = 7.788$，$p = 0.352$）．回答への確信度でも条件（$\chi^2(1) = 90.566$，$p = 1.79 \times 10^{-21}$）およびデューティ比（$\chi^2(1) = 11.722$，$p = 6.18 \times 10^{-4}$）の主効果が有意であり，方向の主効果は有意ではなかった（$\chi^2(7) = 4.067$，$p = 0.772$）．



(a) 力覚の分かりやすさ　　(b) 回答への確信度

図 5.5: 力覚の分かりやすさと回答への確信度の評価結果

5.3.2　条件の好み

実験後に実施した，より好ましいと感じた条件を選択させ，その理由について任意で記述するアンケートの結果を図 5.6 に示す．

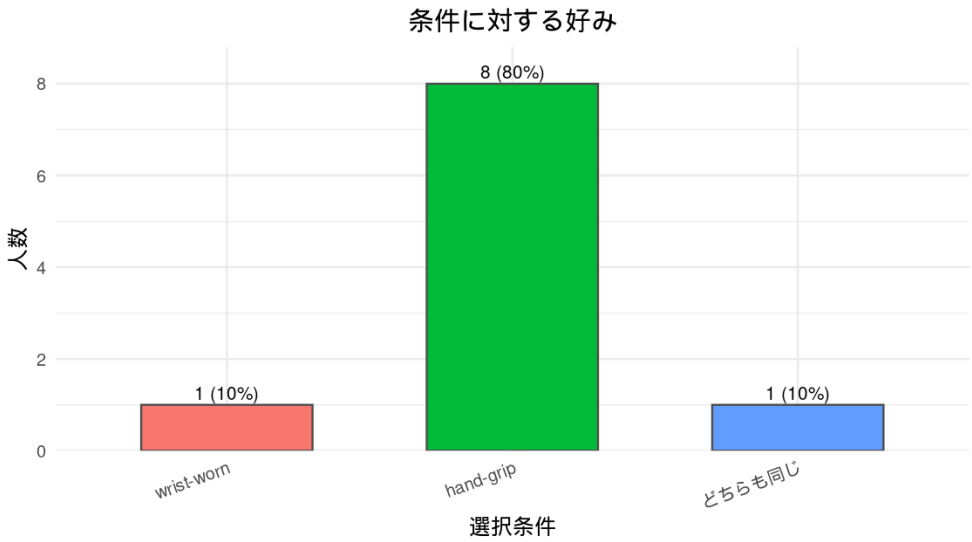


図 5.6: 条件の好みのアンケート結果

10 名の参加者のうち，8 名の参加者が hand-grip 条件を好ましいと回答した．その理由としては,「力覚を手の指全体で近くできたから.」（P01）,「プロペラと身体の位置が遠く，てこの原理のような感じでより力を感じやすかったから.」（P09）のような，デバイスを指で把持することに対する利点を述べる回答が多かった．一方で，wrist-worn 条件を好ましいと回答した参加者の理由としては,「（hand-grip 条件では）つねに腕を持ち上げている必要があったが，wrist-worm（原文ママ）はそれらが少なかった.」（P06）のような，身体的負荷が小さいと感じたことに言及する回答があった．また，どちらも同じと回答した参加者の理由としては,「それぞれの条件ごとに感じやすい角度と感じにくい角度があるように思えた．wirst-wom（原文ママ）は奥側が感じにくく，hand-grip は右側が感じにくく思えた.」（P10）のような，条件ごとに感じやすい角度と感じにくい角度があるという意見を述べる回答があった．

5.4 考察

5.1 節，5.2 節，5.3 節に示した実験結果をもとに，提案システムのような小型力覚デバイスによる方向提示の知覚特性および保持方法が知覚特性に与える影響について考察する．

5.4.1 小型力覚デバイスによる方向提示の知覚特性

方向の主効果は誤差・主観評価ともに有意ではなく，方向ごとの差は統計的に確認されなかった．同時に，図 5.4 に示した混同行列の結果から，誤答は正解方向の 1 近傍（$\pm 45°$ 程度）の範囲に集中する傾向が観察され，hand-grip 条件における誤差の大きさの平均は $38.5°$ であった．この結果から，提案デバイスを用いることで，ユーザはおおよそ誤差 $\pm 40°$ 程度の精度で

力覚による方向提示を認識できることが示された．この結果は，先行研究 [4][6][12][13] の方向提示手法における丁度可知差異（9.0° – 36.5°）と比較すると精度面では劣る．しかしながら，本デバイスは小型で携帯性に優れている点と，4 方向を区別できる程度の精度が確保されている点を考えると，例えば道案内システムにおいて「右折」,「前進」などの大まかな進行方向をユーザに示す用途では十分な実用性があると考えられる．

また，方向の感じやすさについては参加者ごとの主観的な差が大きく,「(wrist-worn 条件は) 左右は分かりやすい.」（P06）,「wrist-worn 条件のとき右側の力覚が感じづらかった.」（P01）のように，同一条件でも感じやすいと思った方向が一致しないことから，提示位置や個人差（皮膚感覚，デバイスの位置，握り方など）などが方向知覚に影響していると考えられる．

デューティ比の主効果は誤差には現れなかった一方で，分かりやすさ・確信度には有意な影響がみられた．これは，力覚の強さが方向の精度を直接高めるのではなく，提示の明瞭さ・確信度を高める効果として現れる可能性を示している．すなわち，強い力覚は「方向が分かった気がする」感覚を強めるが，実際の角度誤差を縮小するには限界があることが考えられる．

さらに，誤答パターンが近傍方向に集中したことは，提示が「前後」,「左右」といった粗い軸で捉えられやすい可能性を示す．統計的な有意差は確認できないものの，図 5.2 や図 5.3 に示した誤差や正答率の結果から，前後左右の方向に対する正答率が高い傾向にあることが観察された．

本研究の結果から，小型プロペラを用いた力覚提示における方向知覚は，高精度な角度同定というよりも，おおまかな方向の手掛かりとして機能する特性が確認された．このことは，小型力覚デバイスによる方向提示が，視覚や聴覚の補助情報としての役割に適している一方で，精密な方向提示を単独で担わせるには課題が残ることを示唆する．そのため，小型力覚デバイスの方向提示は，例えば道案内における「右折」,「左折」のように，方向の大まかな傾向を伝える用途で有効性が高いと考えられる．

5.4.2　保持方法が知覚特性に与える影響

保持方法の違いは，知覚特性および作業負荷に明確な影響を与えた．絶対誤差の主効果では hand-grip 条件が有意に小さく，wrist-worn 条件より高い知覚精度が示された．また，分かりやすさ・確信度の主観評価においても hand-grip 条件が有意に高く，力覚がより明瞭に伝わっていることが示唆される．これらの結果の理由としては，力覚を知覚する位置が wrist-worn 条件の手首よりも敏感な指であることにより，力覚方向の判断が安定しやすくなることが考えられる．実際，手法の好みでは hand-grip 条件を選ぶ参加者が多かった．加えて，絶対誤差の多重比較では 0°，45°，90°，270° で hand-grip が有意に誤差が小さく，保持方法の効果は方向依存である可能性が示唆される．

一方で，wrist-worn 条件では誤差が大きく，主観評価も低い傾向が示された．自由記述では「捻られるという感覚が強い.」（P06）「風邪によるデバイスの動き影響が大きいのかなと感じた.（原文ママ）」（P02）などが挙げられていた．wrist-worn 条件においてはマジックテープを用いてデバイスを手首に固定していたが，手指による把持とは異なり完全にデバイスを固定できず，デバイスが手首の上で動いてしまう可能性があった．その際に発生した副次的な感

覚が方向判断を不安定にし，誤差増大につながったことがこれらの結果の原因として考えられる．また，NASA-TLX の総合スコアは wrist-worn 条件で有意に高く，作業負荷が大きい傾向が示された．下位尺度においては，特に知的・知覚的要求の p 値（$p = 0.0528$）が比較的低かったことから，方向を判断する際の認知負荷が高まっていた可能性がある．

興味深い点として，wrist-worn 条件は装着が容易で楽と感じる参加者がいた一方で，方向の分かりやすさでは hand-grip 条件が優位であるという，利便性と知覚精度のトレードオフが示唆された．

以上の結果から，保持方法は知覚特性に大きく影響することがわかった．hand-grip 条件は知覚精度・主観評価の面で優位だが，装着性や疲労といった観点では改善の余地が残る．今後は，装着位置や固定方法の最適化により，wrist-worn 条件の知覚特性向上と，認知負荷および作業負荷の低減を両立する設計が求められる．

第6章　本研究の制約および今後の課題

実験結果から，現時点における提案システムの課題が明らかになった．本章では，本研究の制約および今後の課題について述べる．

6.1　システムによる制約

本研究でモータを制御するために使用した MX1508 モータドライバは定格電流が 2 A であるが，本研究で使用したようなドローン用小型モータでは起動時や高速回転時に定格電流を超える電流が流れることがある．そのため，モータドライバがボトルネックとなり，モータの回転速度が本来の速度よりも低くなった結果，力覚提示の精度に悪影響を及ぼしている可能性が考えられる．この問題を解決するため，より高い電流に対応したモータドライバを使用する必要があると考えられる．また，本研究で実施した実験においては，モータ制御回路の一部をブレッドボード上に実装しており，バッテリおよびモータドライバはデバイス本体に格納されていない．そのため，タスク試行中にデバイスが制御回路へ繋がるケーブルからの干渉によって力覚提示の精度に悪影響を及ぼしている可能性が考えられる．加えて，本デバイスは本来，携帯性や装着性の高さを特徴とすることを意図しているが，現状の実装では制御回路が外付けであるため，実使用を想定した携帯性を十分に実現できていない点が課題として挙げられる．この問題を解決するため，デバイス本体にバッテリおよびモータドライバを格納し，真に携帯性の高いシステムとする必要があると考えられる．また，高速回転するプロペラを搭載したデバイスである以上，安全性に対する配慮も必須である．現在の実装においては，使用者の手や手首とプロペラの間に板状のシールドを設けてはいるものの，それ以外の方向からの接触を防ぐことはできない．実験においても，参加者から「モータが高速回転しているというのは、保護パーツがついてるとしていても若干怖かった.」（P06）という意見があった．そのため，プロペラを包むようなシールドを設けることで，安全性を向上させることができると考えられる．

6.2　実験設計による制約

本研究の実験においては，提案デバイスから提示できる力覚の方向を 0°，45°，90°，135°，180°，225°，270°，315° の 8 方向のみに制限している．技術的には，現時点の実装においても 4 つのプロペラの回転速度を制御することで，任意の方向に力覚を提示することが可能で

あるため，より細かい角度の力覚に対する知覚特性についても今後の調査が必要であると考えられる．

本研究における比較対象として，既存のスマートウォッチによる方向提示手法や先行研究で提案されている力覚提示デバイスを含んでいない点も制約として挙げられる．そのため，これらの手法と同条件で実験を行い，提案デバイスの有効性を調査する必要がある．

6.3 実用化に向けた制約

本研究では，提案デバイスの基礎的な知覚特性・制御方式について検証を行ったが，実際の応用場面——たとえば道案内システムのようなアプリケーションにおける有効性検証や設計については十分に検討ができていない．道案内などの現実の利用シーンでは，ユーザの現在位置や向いている方向をリアルタイムに取得し，その情報に応じてデバイスが提示する力覚方向を動的に変化させる必要がある．しかし，現時点の実装ではこのようなリアルタイム制御の機能は未実装である．また，実際の道案内タスクの中でユーザの行動や認識を評価する環境実験なども実施できていない．今後は，実際のアプリケーションシナリオでリアルタイムに方向提示を行うシステムの実装と，その有用性を明らかにするための実地検証が必要になる．

第7章　おわりに

本研究では，小型ドローン用プロペラを用いた力覚提示デバイスを提案し，その知覚特性を調査した．評価実験の結果を通じて，提案デバイスは保持方法によって知覚特性に大きく影響することがわかった．手持ち型の筐体と手首装着型の筐体の間では，知覚特性に有意な差があり，手持ち型の筐体の方が方向提示への知覚精度が高く作業負荷が低いことが示された．

実験結果はプロペラを用いた小型力覚デバイスにおける方向提示の可能性を示した一方で，方向提示への知覚精度には課題が残るほか，実用化に向けた装着性と安全性の改善が必要であることが示唆された．そのため，実験で得られた課題を解決するためのデバイス設計を検討し，より保持しやすく，高精度の力覚提示が可能なシステムの実現を目指す必要があると考えられる．

今後は，システムの改良を行い，改良されたシステムと既存の力覚提示手法を比較し，評価実験を行う．さらに，実際の道案内アプリケーションを想定したリアルタイムの方向提示機能の実装や，現実環境におけるユーザ評価の実施も進めていくことで，実応用シナリオにおける有用性と課題の検証を目指す．

謝辞

本研究を進めるにあたり，川口一画先生，志築文太郎先生，高橋伸先生には多大なご支援をいただきました．心から感謝申し上げます．特に，川口先生には，研究の進め方や論文執筆の方法など，研究に関する手厚いご指導をいただきました．さらに，研究や論文執筆において様々なご心配をおかけしました．また，研究生活に関する様々なご相談にもお答えいただき，大変お世話になりました．ここに深く感謝の意を表します．インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究生活においてお世話になりました．COMMUNICATIONチームの皆様には，チームゼミやその他の研究生活において，研究のご助言やご支援をいただきました．特に，大澤怜二さん，石井泰斗さんには，論文執筆や研究発表において多くのご助言を頂戴したのみならず，私生活においても様々な面で支えてくださいました．深く感謝いたします．また，実験にご協力いただいた多くの皆様にも，この場を借りて厚く御礼申し上げます．最後に，学生生活においてお世話になった皆様，そして，家族と友人に深く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Simon Stock, Alain Bertemes, Marco Stang, Martin Böhme, Daniel Grimm, and Wilhelm Stork. Feedi - a smart wearable foot-band for navigation and guidance using haptic feedback. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, volume 1152, pages 349–355. Springer Nature Switzerland AG, 2020.

[2] 錯覚で実現する力覚情報の伝達 | ntt r&d website. NTT R&D Website. 参照日: 2026-01-23.

[3] Shaojun Cai, Ashwin Ram, Zhengtai Gou, Mohd Alqama Wasim Shaikh, Yu-An Chen, Yingjia Wan, Kotaro Hara, Shengdong Zhao, and David Hsu. Navigating real-world challenges: A quadruped robot guiding system for visually impaired people in diverse environments. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*, Honolulu, HI, USA, May 2024. ACM.

[4] Yuxin Ma, Tianze Xie, Peng Zhang, Hwan Kim, and Seungwoo Je. Airpush: A pneumatic wearable haptic device providing multi-dimensional force feedback on a fingertip. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*, Honolulu, HI, USA, May 2024. ACM.

[5] 高田 崚介, 礒本 俊弥, 山田 渉, 真鍋 宏幸, and 志築 文太郎. プロペラを用いた頭部装着型歩行牽引デバイス. In **情報処理学会 インタラクション** *2019*, pages 236–237. 情報処理学会, March 2019. 1B-15.

[6] Seongkook Heo, Christina Chung, Geehyuk Lee, and Daniel Wigdor. Thor's hammer: An ungrounded force feedback device utilizing propeller-induced propulsive force. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*, Montreal, QC, Canada, April 2018. ACM.

[7] Esp-wroom-32 datasheet. Espressif Systems. 参照日: 2026-01-23.

[8] Mtr-09-017 datasheet. Robot Coders. 参照日: 2026-01-23.

[9] Bluetooth technology overview. Bluetooth SIG. 参照日: 2026-01-23.

[10] Autodesk fusion 360 — 3d cad/cam/cae ソフトウェア. Autodesk 公式サイト. 参照日: 2026-01-23.

[11] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, volume 52 of *Advances in Psychology*, pages 139–183. North-Holland, 1988.

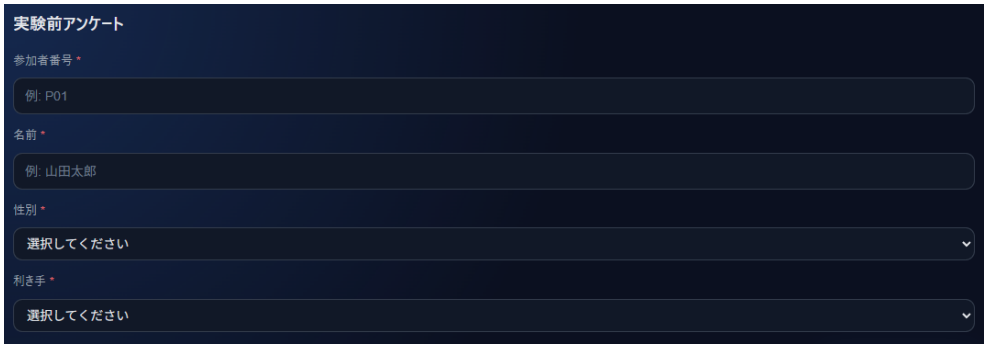
[12] Knut Drewing, Michael Fritschi, Regine Zopf, Marc O. Ernst, and Martin Buss. First evaluation of a novel tactile display exerting shear force via lateral displacement. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(2):118–131, April 2005.

[13] Hwan Kim, HyeonBeom Yi, Hyein Lee, and Woohun Lee. Hapcube: A wearable tactile device to provide tangential and normal pseudo-force feedback on a fingertip. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, page 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

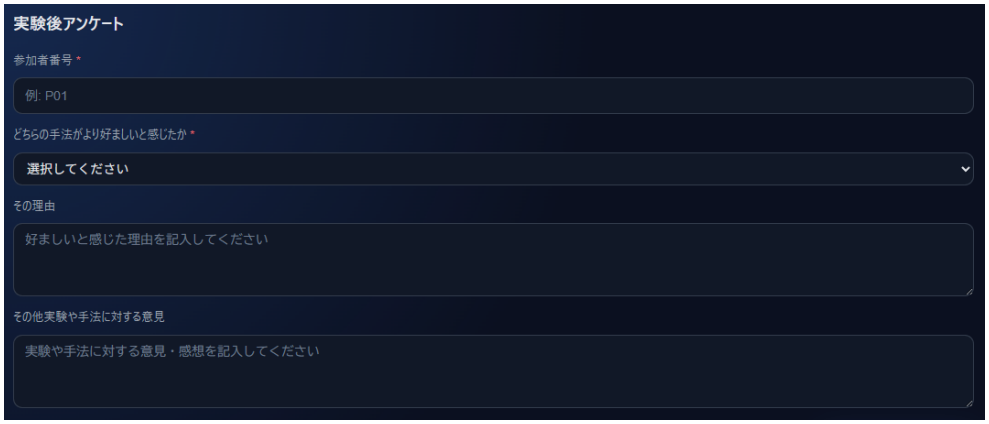
付 録A　実験にて使用したアンケート

実験にて使用したアンケートの具体的な内容を以下に示す.

A.1　実験前アンケート



A.2　実験後アンケート


実験後アンケート
参加者番号 *
例: P01
どちらの手法がより好ましいと感じたか *
選択してください
その理由
好ましいと感じた理由を記入してください
その他実験や手法に対する意見
実験や手法に対する意見・感想を記入してください