筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

スマートフォン内蔵磁気センサを用いた背面ジョイスティック

石川 和哉

指導教員　志築 文太郎，川口 一画

2026年2月

概要

本研究では，スマートフォン内蔵磁気センサを用いた背面操作ジョイスティックアクセサリを製作した．主要なスマートフォン操作であるタッチスクリーン操作において発生する指による画面遮蔽の問題に対し，背面を操作空間とする手法が提案されてきたが，多くは外部センサを要し，また離散的入力に留まるなどの制約がある．本研究では，スマートフォン内蔵センサおよび iPhone の MagSafe 機構を活用することにより，市販のスマートフォンアクセサリと同等の着脱性を備えるとともに連続入力が可能であるジョイスティックアクセサリを製作した．また，ジョイスティックアクセサリの動作を確認するためのシステムを実装した．本システムでは，ジョイスティック可動部に埋め込まれた金属プレートの移動に伴う磁場変化をスマートフォン内蔵磁気センサにて取得し，環境磁気干渉を補正した後，補正後の磁場データと対応する金属位置の座標から回帰モデルを学習する．構築した回帰モデルを用いて磁場データから金属位置をリアルタイムに推定することにより，スマートフォン背面における連続的なジョイスティック操作を実現する．本手法の位置推定精度を検証するため，光学式モーションキャプチャを用いた調査を行った．その結果，回帰モデルを用いた位置推定精度は，スマートフォン固定条件下において，決定係数（R^2）が 0.95 以上，平均絶対誤差（MAE）が 0.1 mm 未満であることから，本手法の位置推定精は高い精度であることが示された．また，把持状態におけるスマートフォンの姿勢変化が推定精度に与える影響についても調査を行うことにより，環境磁場の変動を考慮した補正の必要性を明らかにした．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1 背景 1
1.2 目的およびアプローチ 3
1.3 貢献 3
1.4 本論文の構成 4

第 2 章　関連研究 **5**
2.1 Back-of-Device 操作 5
2.2 スマートフォン内蔵磁気センサによる操作手法 5
2.3 MagSafe 機構を用いたスマートフォン操作手法 6

第 3 章　設計および実装 **8**
3.1 物理ジョイスティックアクセサリ設計 8
3.2 ジョイスティック位置推定システムの実装 11
3.2.1 実装環境 11
3.2.2 磁場変化の予備調査 13
3.2.3 キャリブレーション 13
3.2.4 回帰モデルの構築 15

第 4 章　ジョイスティック操作による入力精度調査 **16**
4.1 調査に用いる機器 16
4.2 データ収集方法 16
4.3 評価指標と分析手法 18
4.4 調査結果 19

第 5 章　考察 **23**
5.1 現在の設計の限界 23
5.2 今後の発展 23
5.2.1 物理ジョイスティックの設計の見直し 23
5.2.2 環境磁場の補正 25
5.2.3 金属プレートに起因する磁場変化の特徴 25
5.2.4 スマートフォンの回転に起因する磁場変化の特徴 26

5.2.5　スマートフォンの回転に起因する磁場変化の影響を考慮したジョイスティック位置推定 32

第 6 章　まとめ **33**

謝辞 **35**

参考文献 **36**

図目次

1.1 Web ブラウザ上のコンテンツを指が隠す例 2
1.2 目標をタッチするためにクラッチ操作が必要になる例 2

3.1 ジョイスティックアクセサリの全体図 8
3.2 MagSafe アクセサリのクリアランス [App24] 9
3.3 物理ジョイスティックの構成要素（(a)：バネ形状の操作部（ジョイスティック）．中心に 3 枚の金属プレートが埋め込まれている． (b)：MagSafe 機構を用いたスマートフォン装着部） 10
3.4 異なる直径の円を持つアクセサリ 10
3.5 各アクセサリの可動域の限界に沿って金属プレートを移動させた時の磁場変化 11
3.6 物理ジョイスティックの構成要素の詳細（(a)：使用した MagSafe リング（Anker） (b)：金属プレート．直径 12 mm，厚さ 1.0 mm） 12
3.7 本アクセサリとスマートフォンとの 6 mm クリアランス 12
3.8 ジョイスティックの可動域の円周上を 8 つの領域に分割 14
3.9 取得された磁気データ（横軸が磁気データにおける x 軸，縦軸が磁気データにおける y 軸） 14

4.1 ジョイスティックに装着された光学式マーカの設計（(a)：調査に用いたリング型ジョイスティック．リング上部に光学式マーカが取り付けられている． (b)：リング型ジョイスティックの使用例） 17
4.2 スマートフォン固定条件（スマートフォンを三脚に固定） 17
4.3 スマートフォン把持条件（スマートフォンを片手にて把持） 18
4.4 OptiTrack による入力精度調査環境の例 19
4.5 スマートフォン固定条件：2 次元および 3 次元空間における推定値と実測値の軌跡（水色が推定値．赤色が実測値） 20
4.6 スマートフォン固定条件：各軸における推定値と実測値（yyplot） 20
4.7 スマートフォン把持条件：2 次元および 3 次元空間における推定値と実測値の軌跡（水色が推定値．赤色が実測値） 22
4.8 スマートフォン把持条件：各軸における推定値と実測値（yyplot） 22

5.1 スマートフォン毎に異なる磁気センサの位置（(a)：iPhone 13 pro における磁気センサの位置． (b)：iPhone 17 における磁気センサの位置） 24

5.2 改良したジョイスティックアクセサリ 24
5.3 スマートフォンの姿勢，スマートフォンの位置，および使用環境（場所）を変更した 3 つの条件 26
5.4 各条件における磁場分布（水色：Condition A, オレンジ色：Condition B，緑色：Condition C） 27
5.5 回転動作による磁場変化計測の様子（青色：x 軸周りに回転， オレンジ色：y 軸周りに回転， 緑色：z 軸周りに回転） 28
5.6 x 軸周りにスマートフォンを回転 29
5.7 x 軸回転（Pitch）と磁場変化量の関係 29
5.8 y 軸周りにスマートフォンを回転 30
5.9 y 軸回転（Roll）と磁場変化量の関係 30
5.10 z 軸周りにスマートフォンを回転 31
5.11 z 軸回転（Yaw）と磁場変化量の関係 31

第1章　序論

本章では, 本研究の背景, 本研究の目的およびアプローチ, 本研究の貢献, ならびに本論文の構成を示す.

1.1　背景

近年，スマートフォンの操作の多くは，端末前面のタッチスクリーンに対するマルチタッチジェスチャ（タッチスクリーン操作）により行われる．しかし，タッチスクリーン操作には，いくつかの課題が存在する．

1. 画面の遮蔽問題（図 1.1）：指や手が画面を覆うことにより，主要コンテンツの一部が視認できなくなる．これは，特に地図上の細かい地点の選択や，高密度な情報の閲覧において操作性を低下させる要因となる．

2. 片手操作時の可動域の制限である（図 1.2）：スマートフォンの画面サイズが大型化する一方で，片手にて把持した際に親指が届く範囲は限定的である．そのため，画面上部のボタンを押す際に，スマートフォンを持ち直すクラッチ操作の必要が生じるという操作の不安定さを招く．

これらの課題を解決する手段として，スマートフォンの背面を入力領域として利用する Back-of-Device (BoD) 操作 [BC09] が提案されている．背面操作は，指による画面の遮蔽問題を回避でき，また把持した手の指を利用できるため，片手操作時の入力を拡張できるという利点を持つ．BoD 操作手法として，現在最も一般的に普及している操作に，iOS，ならびに Android OS に実装されている背面タップ操作が挙げられる．背面タップ操作とは，加速度センサ等を用いてスマートフォンの背面へのタップ動作を検出した後，カメラアプリの起動，またはスクリーンショットの撮影という特定の機能を呼び出す操作手法である．これまでにも，多様なセンシング技術を用いた BoD 操作手法に関する研究が行われてきた．BoD 操作を実現するアプローチとして，スマートフォンに内蔵されたカメラ [CCT20, WFZ16, XHW13, YMI18] やマイク [SZWX18, WZJ+21], あるいは外部センサ [BAI17, HH10, WFB+07, CLWP13, ABW11, MSK+19] を活用する手法が存在する．例えば，リアカメラに鏡を取り付けて背面の指を撮影する手法 [WFZ16] は，高精度の指のジェスチャ，ならびに位置検出を可能とし，それに基づいた背面操作を可能とする．また，マイクとスピーカを用いて筐体表面を伝わる音響信号を解析し，その後解析した音響信号から信号に応じたジェスチャ検出をする手法 [SZWX18] や，加速度・ジャイロセンサを



図 1.1: Web ブラウザ上のコンテンツを指が隠す例



図 1.2: 目標をタッチするためにクラッチ操作が必要になる例

用いて背面へのタップ位置を推定する手法 [GL17], さらには小型レーダを用いてデバイス周辺の空中ジェスチャを認識する手法 [HLG+21, CST+23] なども提案されている．

しかし，これらの手法にはいくつかの課題が残されている．

1. カメラ，またはレーダを用いる手法：高精度な連続入力が可能である反面，常時駆動させるには消費電力が高く，画像処理に伴う計算コストも増大する傾向にある．
2. 音響信号や加速度センサを用いる手法：低消費電力で実装可能だが，検出可能なジェスチャがタップ，あるいはスワイプという離散的な入力や単純なパターンに限られる場合が多く，ジョイスティックのような高精度かつ連続的な入力の実現は困難である．

これらの課題に対処するため，スマートフォンに内蔵されている磁気センサを利用した入力手法が注目されている．磁気センサは，カメラやレーダとは異なり，低消費電力で常時駆動が可能である [KHT16]．スマートフォンに内蔵されている磁気センサを利用した入力手法には，ユーザの指や爪に永久磁石を取り付けたアクセサリ，あるいは磁気センサを装着させるものがある．具体的には，装着されたアクセサリの位置や動きによる磁場変化を検出することにより操作を実現するものや，磁石を組み込んだケースや物理コントローラ，あるいはアクセサリをデバイスに取り付けて操作を実現するものがある．しかし，前者はユーザに対して常に磁石やセンサを身体に装着することを強いる，また後者は操作検出のために強力な永久磁石を使用する必要があり，使用する永久磁石の影響によりスマートフォンの機能に干渉するリスクがあるという課題が存在する．

この課題に対処するために，iPhone 12 以降に搭載された MagSafe 機構を活用した，アクセサリの識別手法 [CKK24]，ならびに電源不要な物理コントローラによる操作手法が存在する [KSC+25]．しかし，これらの手法は，単なるアクセサリの識別，もしくはボタンやレバー操作という離散的な入力しか提供しないという課題点が存在する．

1.2 目的およびアプローチ

本研究の目的は，スマートフォン内蔵の磁気センサのみを用いることにより，専用の電源や電子回路を必要としない着脱容易かつ連続的な入力が可能な背面ジョイスティックアクセサリを実現することである．本手法では，MagSafe 機構が形成する強力な磁場と，スマートフォン内蔵磁気センサを活用した MagSafe 対応のジョイスティックアクセサリを開発する．このアクセサリは，操作部に金属プレートを配置した構造を持つ．ユーザによるジョイスティック操作により，金属プレートが移動し，それに伴う磁場変化が生じる．この磁場変化をスマートフォンの内蔵磁気センサにより検出，および解析することにより，ジョイスティックの 2 次元座標における操作位置を推定する．

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に示す．

- スマートフォン内蔵磁気センサと MagSafe 機構を利用した，電源不要かつ，連続的な 2 次元入力が可能な背面ジョイスティックアクセサリの設計および実装を示した．
- 調査を通じて，ジョイスティック型の背面入力アクセサリの入力精度を示した．
- 調査と実験から得られる本手法の限界，ならびによりロバストな設計の可能性を示した．

1.4 本論文の構成

本論文の構成を示す．第 1 章では，本研究の背景，本研究の目的およびアプローチ，本研究の貢献，ならびに本論文の構成を示した．第 2 章では, 本研究の関連研究として，Back-of-Device 操作に関する研究，スマートフォン内蔵磁気センサによる操作手法，および MagSafe 機構を用いたインタフェース を示す．第 3 章では，本アクセサリの設計および本手法の実装を示す．第 4 章では，ジョイスティック操作による入力精度調査を示す．第 5 章では，考察として，現在の設計，および実装の限界，ならびに今後の発展について示す．第 6 章では，本研究のまとめを述べる．

第2章　関連研究

本手法はスマートフォン内蔵磁気センサを用いた背面ジョイスティック操作手法である．本章では，Back-of-Device 操作，スマートフォン内蔵磁気センサによる操作手法，ならびに MagSafe 機構を用いたインタフェースの研究を述べる．

2.1　Back-of-Device 操作

スマートフォンの背面へ操作領域を拡張する Back-of-Device（BoD）操作は，指や手による画面遮蔽を軽減しつつ，片手操作時の到達範囲を拡大する有効な手段として広く検討されてきた．BoD 操作手法の中には，キーパッド [KLHL20, KRL12, SIR$^+$10, YENG19]，タッチパッド [SH06, ZSP$^+$20]，およびその他のセンサ [HH10, WFB$^+$07, CLWP13, ABW11, MSK$^+$19] のような追加ハードウェアの装着するものが存在する．しかし，これらの手法は専用のハードウェアや電源を必要であるという制限のため，市販のスマートフォンとの互換性，および携帯性に課題がある．

これに対し，スマートフォン内蔵のセンサを BoD 操作に活用する手法が提案されている．例として，リアカメラ [CCT20, WFZ16, XHW13, YMI18] や，IMU センサ [GL17, ZGZ$^+$15, ZPS$^+$13] が BoD 操作における指を用いたジェスチャを認識するために使用されてきた．また，スマートフォン内蔵マイクとスピーカを用いて筐体表面を伝わる音響信号を解析することにより，タップ位置，およびジェスチャを特定する手法も存在する [SZWX18, WZJ$^+$21]．しかしながら，これらの手法は，カメラの常時駆動による消費電力の増大，あるいは音響・慣性センサによる入力語彙の制限（基本的なタップおよびスワイプなど）という課題を引き起こすため，ジョイスティックのような高精度かつ連続的な入力を低消費電力にて実現することは困難である．

これに対し，本手法は，低消費電力にて常時利用可能であるスマートフォンに標準搭載されている磁気センサを使用する．また，本手法に対する予備調査ならびに MagPie [KSC$^+$25] から，金属プレートの位置の変位に対する磁気データが位置ごとに固有かつ連続的な分布を示すため，高精度かつ連続的な入力を実現できる．

2.2　スマートフォン内蔵磁気センサによる操作手法

スマートフォンに標準搭載されている磁気センサは，低消費電力かつ常時利用可能であることから，空中ジェスチャ[AKY18, KRY10]，3D 力入力 [TFI$^+$22]，およびその他の操作手法

[AS21, HAW13, KSC+25] に応用されている．これらはウェアラブル型とアクセサリ型に分類される．

ウェアラブル型の手法では，ユーザの指や爪に永久磁石やセンサを装着し，その位置や動きによる磁場変化を検出することにより，操作を実現している．MagNail[KS15] では，付け爪（ネイルチップ）に微小な磁石を装着することにより，スマートフォン周辺の空間における指の微細なジェスチャ認識を行っている．また，Victor ら [CG19] は，指輪型の磁気リングを用いることにより，指輪を回転させることによる選択操作，ならびにタッチ操作を可能にしている．これらの既存研究は，デバイスに直接触れずに操作可能である，あるいは画面外の空間を広く利用できるという利点を持つ．その反面，ユーザに常に磁石やセンサを身体に装着することを強いるため，日常的な状況における使用には適さないという課題がある．

一方，アクセサリ型の手法では，磁石を組み込んだケースや物理コントローラ，もしくはアクセサリをデバイスに取り付けて操作を行う．MagGetz[HAW13] は，磁石付きの物理コントローラにより，スマートフォン周辺にてボタン操作やトグル操作などの複数の操作が可能である．TetraForce [TFI+22] は，スマートフォンケースの角に 4 つの磁石を装着し，その磁石が動くことによる磁場変化を検出することにより，スマートフォンの前面および背面への押し込み力やせん断力の入力を可能にした．しかし，これらのアプローチは，操作検出のために強力な永久磁石を使用する必要があり，地磁気センサへの恒常的なバイアスや磁気飽和を引き起こし，さらにナビゲーション等のスマートフォン本来の機能に干渉する懸念がある．

これに対し本手法は，追加磁場を生成しない金属プレートを採用することによりスマートフォン本来の機能に干渉しない設計であり，さらにスマートフォンの内部部品への干渉を避けるため，MagSafe ガイドラインに準拠した設計となっている．

2.3 MagSafe 機構を用いたスマートフォン操作手法

MagSafe は，交互に極性が配置されたリング状磁石と，位置合わせ用の整列磁石により構成され，磁力を用いてアクセサリをスマートフォンの正確位置に取り付けることができる機構である． 本機構は，iPhone 12 以降の機種に標準搭載されているほか，WPC （Wireless Power Consortium）[Wir24] によると，次世代のワイヤレス充電規格である Qi2 にも採用されており，今後は Android 端末を含む多くのスマートフォンへの搭載が見込まれている．

この MagSafe 機構をインタフェースに応用した研究として，MagID [CKK24] および MagPie [KSC+25] が挙げられる． MagID は，MagSafe 機構への接続時に生じる磁場変化を解析することにより，装着されたアクセサリの種類を識別する．これにより，特定のアクセサリ装着と連動したアプリケーションの起動を実現している． 一方，MagPie [KSC+25] は，MagSafe 機構に基づくアクセサリを 8 つの領域に分割し，そしてその各領域に「スライス」と呼称されるモジュール式の物理コントローラ（ボタンおよびレバーなど）を配置することにより，ボタンによる On，Off の切り替えや，レバーによる 3 状態の入力を可能にしている．

しかしながら，これらの先行研究には以下の課題が存在する． MagID は，あくまでアクセサリの識別に主眼を置いた技術であり，ユーザが直接操作することにより入力を実現するも

のではない． また，MagPie は入力機能を有するものの，ボタン押下やレバーの倒し込みといった離散的な入力に限定されており，ジョイスティック操作のような滑らかかつ連続的な 2 次元入力は実現されていない．

これに対し，本手法は，MagSafe の磁場環境下において金属プレートを移動させ，その干渉による微細な磁場変化を内蔵磁気センサを用いて解析することにより，連続的かつ高精度なジョイスティック操作を実現する．

第3章　設計および実装

本章では，アクセサリの設計，およびジョイスティック位置推定システムの実装の詳細を示す．

3.1　物理ジョイスティックアクセサリ設計

本節では，物理ジョイスティックアクセサリの設計について述べる．まずアクセサリの全体図を図 3.1 に示す．

MagSafe アクセサリの製作にあたり，Apple が公開しているアクセサリガイドライン（Accessory Design Guidelines for Apple Devices [App24]）を参照した．同ガイドラインにはアクセサリに関する様々な制約が記載されているが，そのうち，特に考慮した要件は以下の 2 点である．

- スマートフォンへの装着を目的とする磁石以外の，追加磁石の使用が禁止されていること．
- マグネットリング中心からデバイス上端方向への長さが 30 mm を超えないこと．また，アクセサリの半径 30 mm を超える部分においては，デバイス背面（接触面）から 5 mm のクリアランスを確保すること（図 3.2）．

本アクセサリは，このガイドラインに準拠して設計した．

本アクセサリは，以下に示す 2 つの要素から構成される．



図 3.1: ジョイスティックアクセサリの全体図

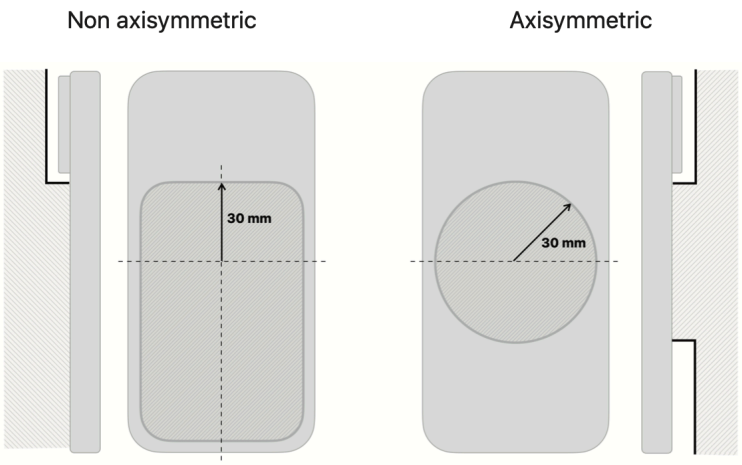


図 3.2: MagSafe アクセサリのクリアランス [App24]

- 操作部（図 3.3a）
- スマートフォン装着部（図 3.3b）

操作部の設計について述べる．操作部には，ユーザが軽い力でも負荷なく入力できるよう，渦巻き状の弾性構造を採用した（図 3.3a）．可動部中心には，直径 12 mm の金属プレートを 3 枚埋め込んだ．プレートサイズ選定においては，センシングに必要な磁場変化量を確保する観点からは大型化が望ましい．しかし一方で，前述のアクセサリガイドラインによる制約を守り，かつ筐体背面（特にカメラ突起部）との物理的干渉を回避する必要がある．そこで，適切なプレートサイズを決定するための予備調査を行った． 本調査では，22 mm，25 mm，28 mm の異なる直径を持つ複数のアクセサリを用い，金属プレートをジョイスティック可動域の限界に沿って移動させた際の磁場変化の分布を計測した（図 3.4, 3.5）． 予備調査の結果，アクセサリの直径が小さい場合，得られる磁場変化の分布の広がりが小さくなる傾向が確認された．対して，直径 25 mm のアクセサリを用いた場合においては，磁場変化の分布形状が比較的理想的な円形に近く，かつ金属プレートの各操作位置に対応する固有の磁気パターンが最も顕著に現れることが確認された．以上の 2 つの理由により，本設計では直径 25 mm を採用する．

MagSafe 機構を用いたスマートフォン装着部の設計について述べる．アクセサリの筐体は，PLA （ポリ乳酸）素材を使用し 3D プリンタ（Bambu Lab H2D）により造形した．筐体内部には MagSafe 固定用の金属リング（図 3.6 a）を配置し，ジョイスティック可動部の中心に前述の金属プレート（図 3.6 b）が位置する構成とした．図 3.7 に示すように，本アクセサリはデバイス上端方向へ大きく張り出す形状となっている．前述のガイドラインに基づき，半径 30 mm を超える領域においてはデバイス背面から 6 mm 以上の距離を確保する必要があるため，本設計では 6 mm のクリアランスを設けた．このような設計に至った背景には，センサ

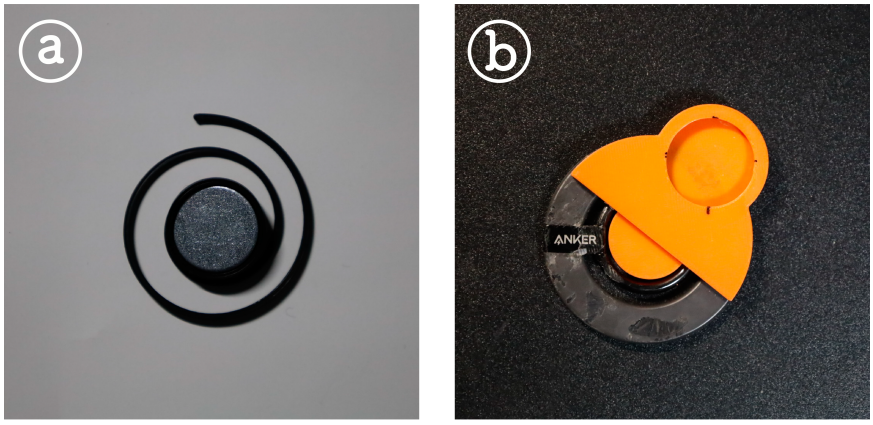


図 3.3: 物理ジョイスティックの構成要素（(a)：バネ形状の操作部（ジョイスティック）．中心に 3 枚の金属プレートが埋め込まれている． (b)：MagSafe 機構を用いたスマートフォン装着部）

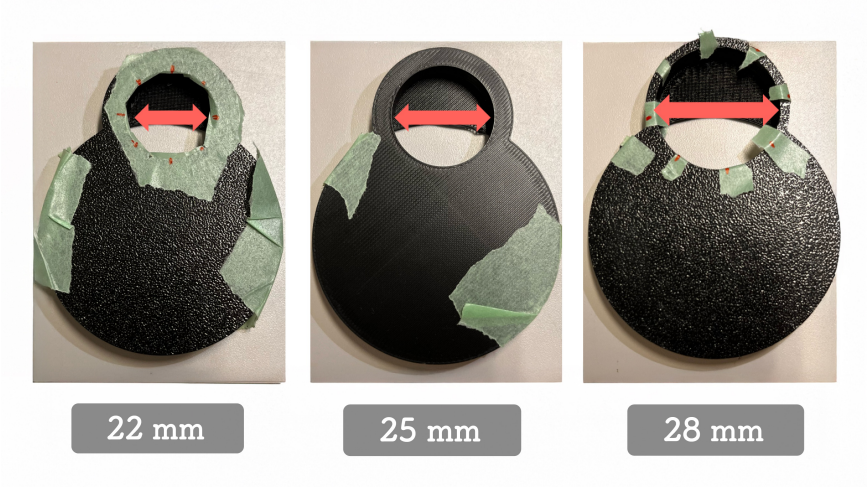


図 3.4: 異なる直径の円を持つアクセサリ

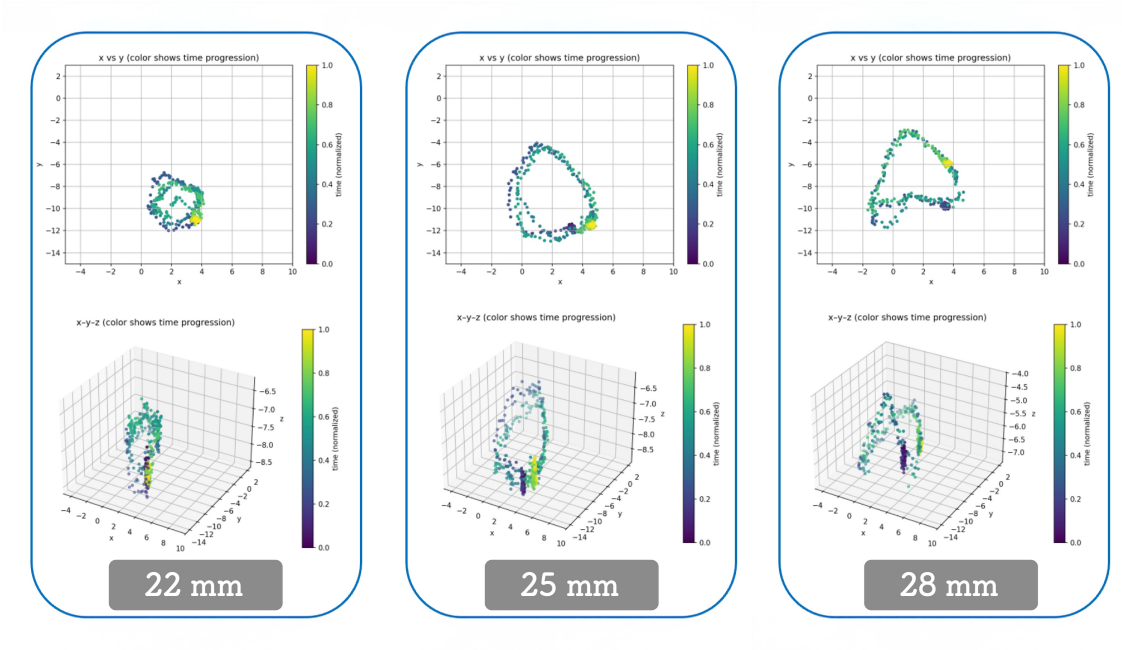


図 3.5: 各アクセサリの可動域の限界に沿って金属プレートを移動させた時の磁場変化

感度の課題がある．磁石を用いた手法と比較して，金属プレートの移動による磁場変化は微小である．そのため，高感度に信号を検出するには，センサの至近距離にて操作を行う必要がある．そこで，iPhone 内蔵磁気センサが配置されている端末右上付近，具体的には端末上部から 46 mm，右端から 19 mm の位置に，定常状態におけるジョイスティック中心が重なるように設計した．

3.2 ジョイスティック位置推定システムの実装

本節では，金属プレートの移動に伴う磁場変化を利用した，ジョイスティック位置推定システムについて述べる．

3.2.1 実装環境

本手法の実装に使用した装置を以下に示す．

- ラップトップ PC：MacBook Air（13 インチモデル，M3 2024）
  - OS：macOS Sequoia 15.7.3
  - プロセッサ：Apple M3

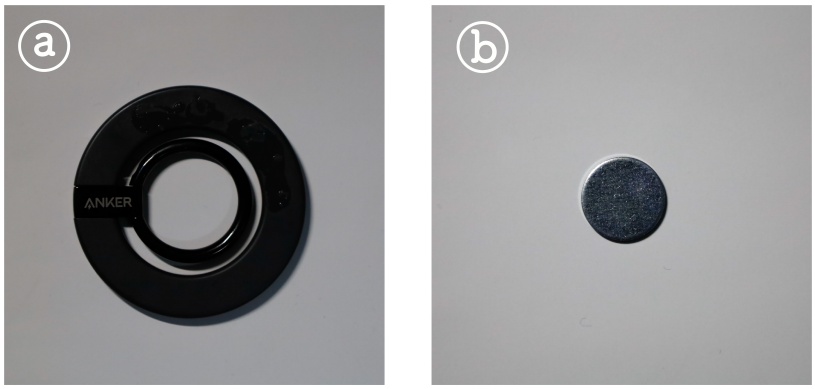


図 3.6: 物理ジョイスティックの構成要素の詳細（(a)：使用した MagSafe リング（Anker）（b)：金属プレート．直径 12 mm，厚さ 1.0 mm）

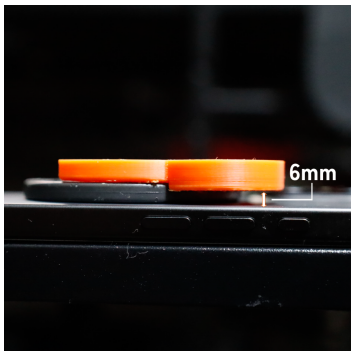


図 3.7: 本アクセサリとスマートフォンとの 6 mm クリアランス

  - RAM：16 GB
  - ストレージ：512 GB
  - 画面解像度：13.6 インチ（2560 × 1664 ピクセル）

また，本システムの開発に使用したソフトウェア，ならびにプログラミング言語およびフレームワークを以下に示す.

- ソフトウェア
  - Xcode（ver. 26.1）
  - Visual Studio Code（ver. 1.107.1）
- プログラミング言語およびフレームワーク
  - Swift（ver. 6.2.1）
  - SwiftUI

また，本手法の実装に使用した MagSafe リング，および金属プレートを以下に示す.

- MagSafe リング（610 Magnetic Phone Grip）（図 3.6）
- 金属プレート（図 3.6）
  - 寸法：12 mm × 1 mm
  - 材質：鉄

3.2.2 磁場変化の予備調査

システム構築に先立ち，金属プレートの位置と取得される磁気データとの関係性を検証する調査を行った．ジョイスティックの可動域（直径 25 mm の円内部）において，円周上を 8 つの領域（図 3.8）に分割し，各領域に金属プレートを配置した状態において磁気データを計測した．取得された 3 軸磁気データのうち 2 軸（x，y）の平均値をグラフにプロットした結果，各位置において固有の磁場分布が確認された（図 3.9）．この結果により，磁気データを用いた位置推定が可能であるという知見を得た.

3.2.3 キャリブレーション

磁気センサを用いた位置推定においては，環境磁場の影響を考慮する必要がある．未処理のセンサデータを用いた場合，地磁気やスマートフォン筐体自体が発する磁気ノイズの影響を受け，正確な推定が出来なくなる．そこで本システムでは，環境磁場成分を除去するキャリブレーション処理を導入した．具体的な手順は以下の通りである.



図 3.8: ジョイスティックの可動域の円周上を 8 つの領域に分割

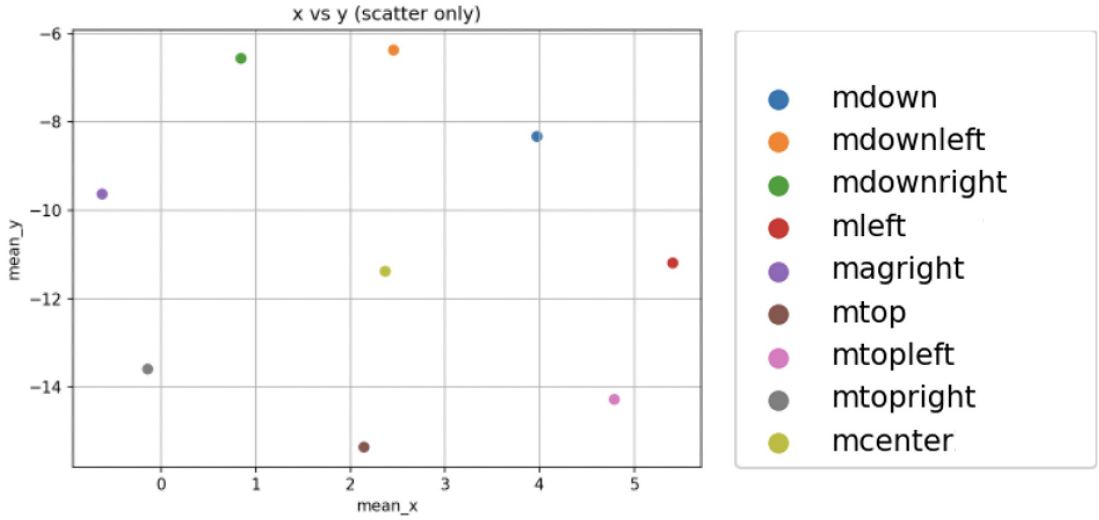


図 3.9: 取得された磁気データ（横軸が磁気データにおける x 軸，縦軸が磁気データにおける y 軸）

1. 端末を固定し，ジョイスティックを装着した状態において，3 軸（x, y, z）の磁気データを 5 秒間取得する．この間，端末の姿勢や周囲の磁性体の配置を変化させない．

2. 取得した各軸データの平均値を環境磁場のベースラインとして保存する．各軸 $i \in \{x, y, z\}$ に対して，静止状態において取得した N サンプルの磁場データを $B_{i,1}, B_{i,2}, \ldots, B_{i,N}$ と定義すると，ベースライン $\bar{B}_i$ は次式にて表される．

$$\bar{B}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} B_{i,k} \tag{3.1}$$

3. リアルタイムに計測される各サンプルから，手順 2 にて求めたベースラインを減算することにより，環境磁場によるノイズを除去する．例として，ある時刻 t における生の x 軸磁場データを $B_x(t)$，キャリブレーションを施したデータを $\tilde{B}_x(t)$ とすると，その関係は次式にて定義される．

$$\tilde{B}_x(t) = B_x(t) - \bar{B}_x \tag{3.2}$$

3.2.4 回帰モデルの構築

前述の予備調査およびキャリブレーション処理に基づき，金属プレートの位置を推定する回帰モデルを構築した． 磁気データは，前節にて述べたキャリブレーションによって環境磁場によるノイズの影響を除去した後，ジョイスティック操作による磁場変化を高感度に検出するために 100 Hz のサンプリングレートにて，ジョイスティック（金属プレート）を可動域の限界である円周に沿って動かすことにより取得した．この際，各時点の補正済み 3 軸磁場データ（$\tilde{B}_x$，$\tilde{B}_y$，$\tilde{B}_z$）に加え，ジョイスティックのニュートラルな位置（ジョイスティックを中心にて静止させた状態）における座標データおよび磁気データを取得した．教師データセットは，以下の入力特徴量と出力値のペアにより構成される． 入力特徴量には，取得された生の補正済み磁気データからジョイスティックのニュートラルな位置における磁気データを減算した値を用いる． 一方，出力値には，データ取得時の金属プレート座標情報からジョイスティックのニュートラルな位置の座標データを減算した値を用いる．構築したデータセットを CreateML（Apple）を用いて回帰モデルを学習させた．学習アルゴリズムには非線形性の高い磁場分布の回帰に適していることから，Boosted Tree Regression [ELH08] を採用した．

第4章　ジョイスティック操作による入力精度調査

本章では，3 章にて述べた本アクセサリ，ならびに本システムを実際に使用した際の入力精度調査について述べる．

4.1　調査に用いる機器

ジョイスティック操作の入力精度調査において，評価の基準となる正解値を取得する．正解値は，以下の機器を用いることにより取得した．

- OptiTrack V120:Duo
  - 方式：光学式モーションキャプチャシステム
  - 解像度：640 × 480 pixels
  - サンプリングレート：120 Hz（フレーム/秒）
  - レイテンシ：8.33 ms
  - 制御ソフトウェア：Motive:Tracker

4.2　データ収集方法

本節では，ジョイスティック操作の入力精度を調査するためのデータ収集手法について述べる．評価の基準となる正解値には，OptiTrack により計測されたジョイスティックの実測座標を用いる．本システムによる推定座標と，この正解値との比較検証を行った．

実験環境の構築として，まずジョイスティックの操作部に光学式マーカを装着した（図 4.1）．このマーカを OptiTrack により常時追跡することにより，ジョイスティックの 3 次元位置を高精度に取得可能な環境を整えた（図 4.4）．

本調査では，静的な環境における精度と，実使用環境における精度を検証するため，以下の 2 つの条件においてデータを収集した．

1. **スマートフォン固定条件**：ユーザはスマートフォンを机上にある三脚に固定し，ジョイスティック操作を行う



図 4.1: ジョイスティックに装着された光学式マーカの設計（(a)：調査に用いたリング型ジョイスティック．リング上部に光学式マーカが取り付けられている． (b)：リング型ジョイスティックの使用例）



図 4.2: スマートフォン固定条件（スマートフォンを三脚に固定）

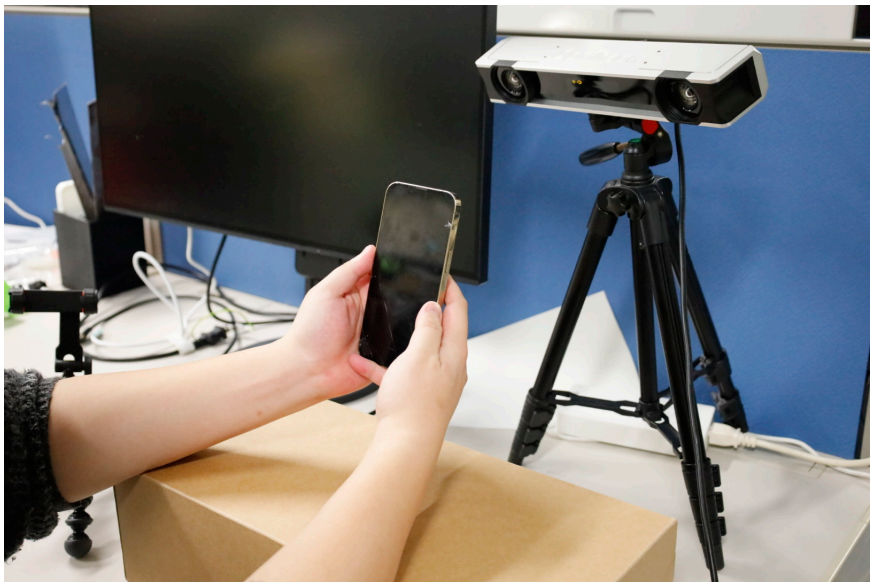


図 4.3: スマートフォン把持条件（スマートフォンを片手にて把持）

2. **スマートフォン把持条件**：ユーザはスマートフォンを片手にて把持し，ジョイスティック操作を行う

各条件におけるデータ収集の手順は以下の通りである．はじめに，3.3.2 節において述べた磁気センサのキャリブレーションを実行する．続いて，ジョイスティックを可動域の限界である円周上に沿って操作を行う．この際，以下の 2 つのデータを同時に記録する．

- **磁気データ（入力）**：取得された補正済み磁気データから，ジョイスティックがニュートラル位置にある際の磁気データを減算した値．すなわち，操作に伴う磁場変化量である．
- **座標データ（出力）**：OptiTrack により取得された金属プレートの座標情報から，ニュートラル位置における座標データを減算した値．すなわち，中心からの相対座標である．

最後に，これらの記録データを用い，入力（磁気データ）と出力（座標データ）のペアから構成される回帰モデル学習用データセットを構築した．

4.3 評価指標と分析手法

本節では，構築した回帰モデルの評価，ならびに分析手法を示す．4.2 節で述べたデータセットに対し，補正済み 3 軸磁場データを入力，座標データ（x, y, z）を出力とする回帰モデルの構築および評価を行った．評価手法には 5 分割交差検証を適用し，OptiTrack により計測された実測値と，回帰モデルにより導出された推定値との誤差を定量的に検証した．評価指標としては，各軸（x, y, z）成分の誤差，および 3 次元空間内におけるユークリッド距離誤差に基づき，以下の 4 項目を算出した．



図 4.4: OptiTrack による入力精度調査環境の例

- 決定係数 （R^2）
- 平方根平均二乗誤差 （RMSE）
- 平均二乗誤差 （MSE）
- 平均絶対誤差 （MAE）

4.4 調査結果

第 1 に，スマートフォン固定条件における調査結果について述べる．評価指標としては，4.3 節にて述べた通りである．5 分割交差検証による検証結果を表 4.1，ならびに図 4.5, 4.6 に示す．表 4.1 から，x 軸および y 軸においては，R^2 がそれぞれ 0.977，0.944 と高い値を示しており，ジョイスティックの主要な操作方向に対して正確な追従が可能であることを示している．一方で，z 軸の R^2 は 0.583 と他の軸に比べて低い値を示した．これは，本実験において用いたジョイスティック操作が主に xy 平面上の移動であり，z 軸における MAE の値が 0.008 mm を示したことから，z 軸方向への変位自体が極めて微小であったため，相対的に環境ノイズの影響が強く反映されたことに起因すると考えられる．また，3 次元位置推定における MAE は 0.089 mm，RMSE は 0.110 mm，および R^2 は 0.963 であった．これらの結果から，スマートフォン固定条件においては，ジョイスティックの 3 次元的な移動と磁場変化の関係を正確に捉えており，高精度なスマートフォン背面ジョイスティックアクセサリとして機能することが示される．

第 2 にスマートフォン把持条件における調査結果について述べる．5 分割交差検証による検証結果を表 4.2，ならびに図 4.7, 4.8 に示す．表 4.2 から，y 軸および z 軸においては，R^2 がそれぞれ 0.640，0.609 と正の値を維持しており，スマートフォン固定状態と比較すると低

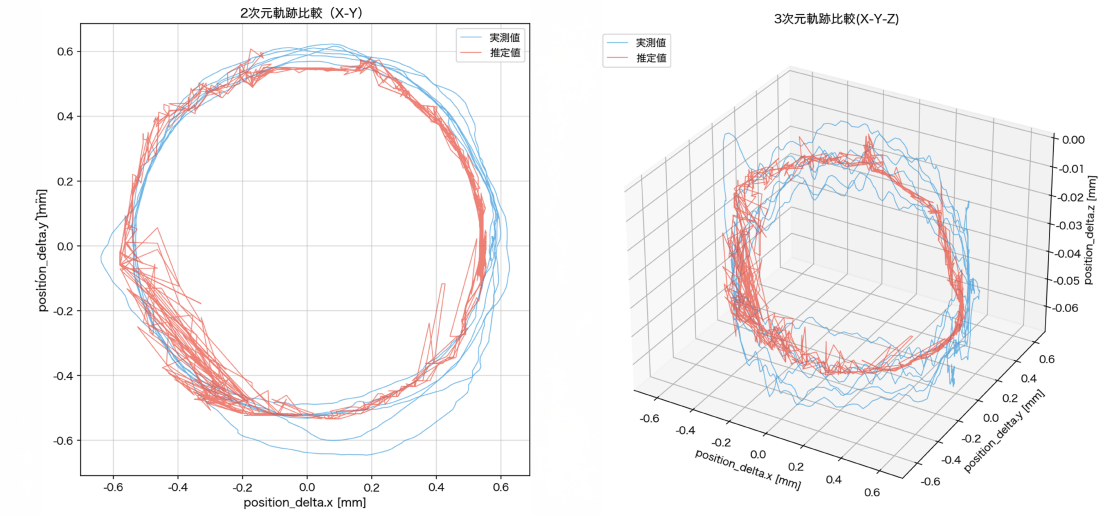


図 4.5: スマートフォン固定条件：2 次元および 3 次元空間における推定値と実測値の軌跡（水色が推定値．赤色が実測値）

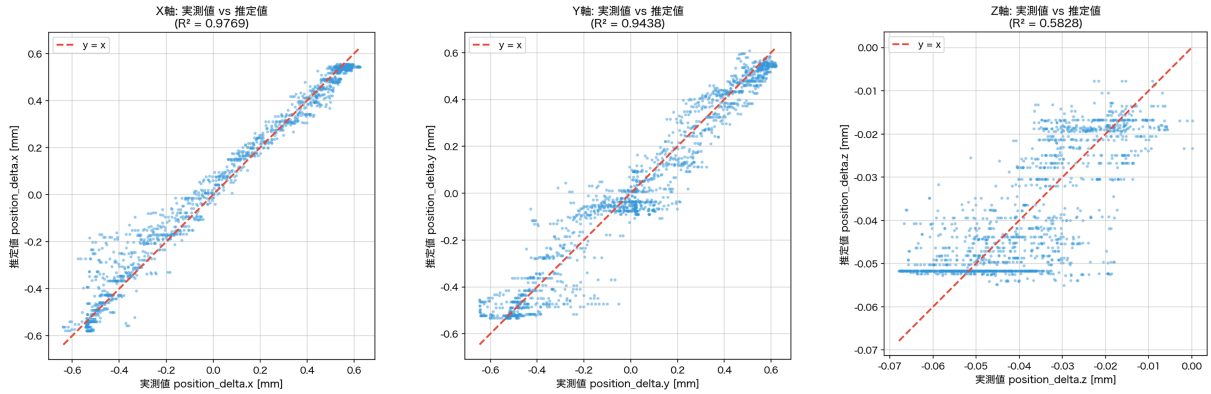


図 4.6: スマートフォン固定条件：各軸における推定値と実測値（yyplot）

表 4.1: スマートフォン固定条件における評価結果

Axis	MAE (mm)	RMSE (mm)	R^2
x	0.044	0.063	0.977
y	0.067	0.089	0.944
z	0.008	0.010	0.583
3 次元空間（x-y-z）	0.093	0.118	0.956

表 4.2: スマートフォン把持条件における評価結果

Axis	MAE (mm)	RMSE (mm)	R^2
x	0.232	0.062	-3.505
y	0.180	0.060	0.590
z	0.166	0.230	0.620
3 次元空間（x-y-z）	0.380	0.418	0.415

い精度ではあるものの，ジョイスティックの 3 次元的な移動と磁場変化の関係を捉えることが出来ている．しかし，x 軸においては R^2 が -3.505 と負の値を示しており，回帰モデルによる推定が行えていない．また，3 次元位置推定における MAE は 0.380 mm，RMSE は 0.418 mm，および R^2 は 0.415 であった．

この推定精度の低下は，把持に伴うスマートフォンの微細な姿勢変化，ならびに位置変化に起因すると考えられる．地磁気や周囲の環境磁場は空間に対して静的であるため，スマートフォン自体がわずかでも回転することにより，取得される磁気センサの値は大きく変動する．

以上の結果から，現在の実装方法においては，把持状態という実使用環境における安定した入力は実現出来ていない．これは，5 章にて示すスマートフォンの回転に起因する磁場変化の影響を考慮したジョイスティック位置推定入力の手法が不可欠であることを示唆している．

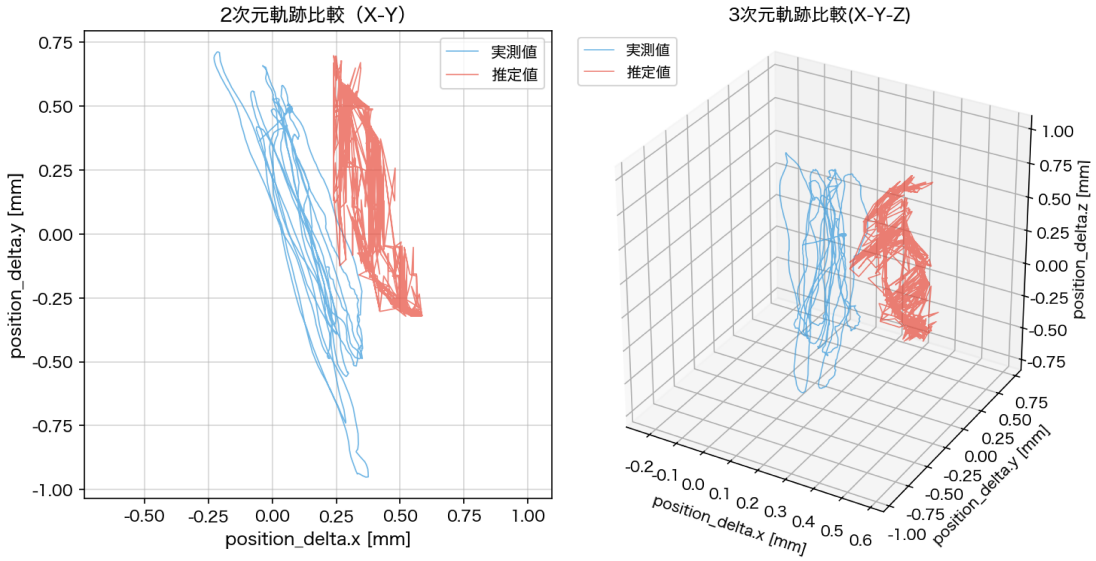


図 4.7: スマートフォン把持条件：2 次元および 3 次元空間における推定値と実測値の軌跡（水色が推定値．赤色が実測値）

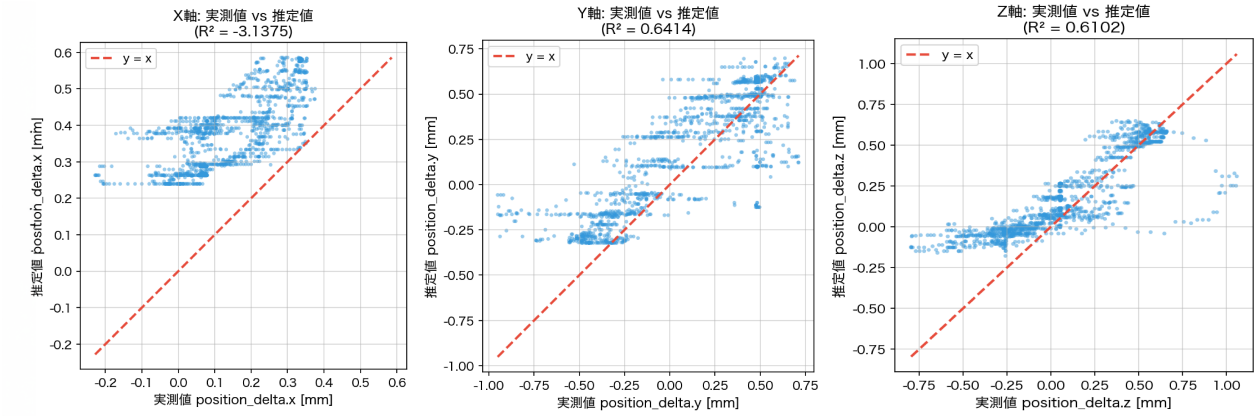


図 4.8: スマートフォン把持条件：各軸における推定値と実測値（yyplot）

第5章　考察

本節では, 本手法の設計，ならびにジョイスティック操作による入力精度調査を踏まえた，現在の設計の限界，ならびに今後の発展を議論する．

5.1　現在の設計の限界

4.4 節でも述べたように，本設計には，スマートフォンの姿勢や位置がわずかでも変化すると，推定精度が著しく低下するという課題がある．この原因は，現在のキャリブレーション手法にある．本キャリブレーション手法では，初期位置において 5 秒間計測したデータの平均値をベースラインとして固定している．しかし，使用中にスマートフォン自体が移動や回転を行うと，それに伴う環境磁場の変化量が，金属プレートの操作に起因する微細な磁場変化量と比較して極めて大きくなる．これにより，日常的な使用に伴う手ブレや，歩行時のような動的な環境下での本アクセサリの使用が困難となる．

5.2　今後の発展

5.2.1　物理ジョイスティックの設計の見直し

iPhone 15 シリーズ以降において，スマートフォン内蔵磁気センサの配置が変更された [App24]．本手法の初期段階においては iPhone 13 Pro を対象とした実装を行っていたが，同端末の内蔵磁気センサは筐体の右上部（図 5.1a）に配置されていた． 3.2.1 節で述べたように，MagSafe のアクセサリデザインガイドラインに基づく制約により，マグネットリング中心からデバイス上端方向への長さが 30 mm を超える領域においては，デバイス背面から 5 mm のクリアランス（隙間）を確保する必要があった．このため，センサと金属プレートの距離が離れ，検出感度が低下するという課題があった．

しかし，iPhone 15 シリーズ以降では，内蔵磁気センサの配置が筐体の右下部へと変更された（図 5.1b）． この変更により，ジョイスティック（金属プレート）の配置位置が，ガイドラインによるクリアランス制限の対象となる上端領域（カメラ突起周辺）から外れることとなった．その結果，デバイス背面との距離を密接させることが可能となり，金属プレートの変位に伴う磁場変化をより高感度に検出できる設計（図 5.2）へと改良した．

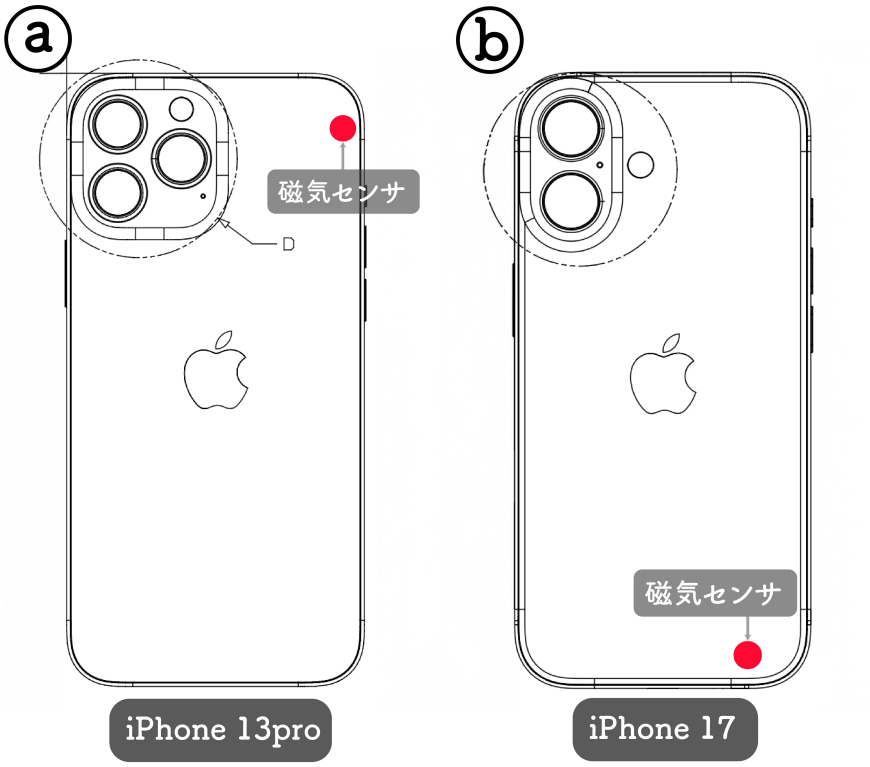


図 5.1: スマートフォン毎に異なる磁気センサの位置（(a)：iPhone 13 pro における磁気センサの位置．　(b)：iPhone 17 における磁気センサの位置）



図 5.2: 改良したジョイスティックアクセサリ

5.2.2　環境磁場の補正

地球の磁場は概ね北方向を向いており，局所的には強度が一定とみなせるため，理想的な 3 次元地磁気センサの測定値は原点を中心とする球面上に分布する．しかし，実際には地球以外にも磁場を発生させる物体が存在するため，地磁気センサは外乱の影響を受けやすいという特性を持つ．

MathWorks のドキュメント [Mat] によると，地磁気センサの測定誤差は，主に以下の 2 つの要因に分けられる．

- **硬鉄の影響（Hard Iron Effect）**：センサが搭載された回路基板上の金属や磁石など，固定的な干渉磁気ノイズ源に起因する誤差．これらはセンサ座標系に対して常に一定方向の磁場バイアスとして作用するため，測定値の分布中心を原点に移動させる必要がある．
- **軟鉄の影響（Soft Iron Effect）**：センサ近傍の磁性体が周囲の磁場を歪めることに起因する誤差．これは測定値の分布球体を楕円体へと変形させる効果を持つ．

したがって，地磁気センサから正確な値を得るためには，これら硬鉄および軟鉄の影響を適切に補正するキャリブレーションが必要となる．前項で述べた誤差要因を取り除き，歪んだ磁場データを理想的な球面上へ写像するためのキャリブレーション手法を以下に示す．

未補正の磁気センサデータを x，補正後のデータを m と定義した際，両者の関係は次式により表される [Ozy15]．

$$m = (x - b)A \tag{5.1}$$

ここで，b は 1×3 のバイアスベクトルであり，硬鉄の影響による原点オフセット（楕円体の中心座標）に相当する．また，A は 3×3 の変換行列であり，軟鉄の影響による楕円体の歪みを補正する係数である．具体的な校正手順は以下の通りである．

1. **データ収集**：センサを搭載したデバイスを様々な方向に移動させる，および回転させることにより全方位の磁場データを収集する．この際，取得される点群は，誤差要因により原点からずれた楕円体状に分布する．
2. **パラメータ推定**：収集した点群データに対し，楕円体フィッティング（最小二乗法等）を適用する．これにより，当該環境における最適な補正パラメータ（A および b）を算出する．
3. **補正の適用**：算出したパラメータを式 (1) に適用することにより，リアルタイムに得られる測定値を，原点を中心とする単位球面上へ正規化する．

5.2.3　金属プレートに起因する磁場変化の特徴

金属プレート（ジョイスティック）を可動域の限界である円周上に沿って操作した際の磁場分布について，調査を行った． 調査では,「スマートフォンの姿勢」,「スマートフォンの位置」,および「使用環境（場所）」を変更した 3 つの条件下（図 5.3）においてデータを取得した．



図 5.3: スマートフォンの姿勢，スマートフォンの位置，および使用環境（場所）を変更した 3 つの条件

- Condition A
  - 環境：デスク上（磁力あり）
  - スマートフォンの姿勢：垂直
- Condition B
  - 環境：デスク上（磁力あり）
  - スマートフォンの姿勢：水平
- Condition C
  - 環境：デスク上（磁力なし）
  - スマートフォンの姿勢：水平

各条件における分布を（図 5.4）に示す．
調査の結果，スマートフォンの姿勢，位置，および周囲の環境にかかわらず，金属プレートの操作に起因する磁場分布の形状は一定であることが確認された．

5.2.4 スマートフォンの回転に起因する磁場変化の特徴

次に，スマートフォンの回転動作に起因する磁場変化の特徴を述べる．スマートフォンを把持した状態において，磁場データが変動する主な要因として，端末位置の並進移動および端末の回転動作の 2 点が挙げられる．これら 2 つの要因による影響の差異を検証するために，端末を回転させずに各方向へ約 20 cm 並進移動させた際の磁場変化量に対し，位置を固定したまま各軸周りに約 30° 回転させた．その結果，位置を固定したまま各軸周り回転させた際

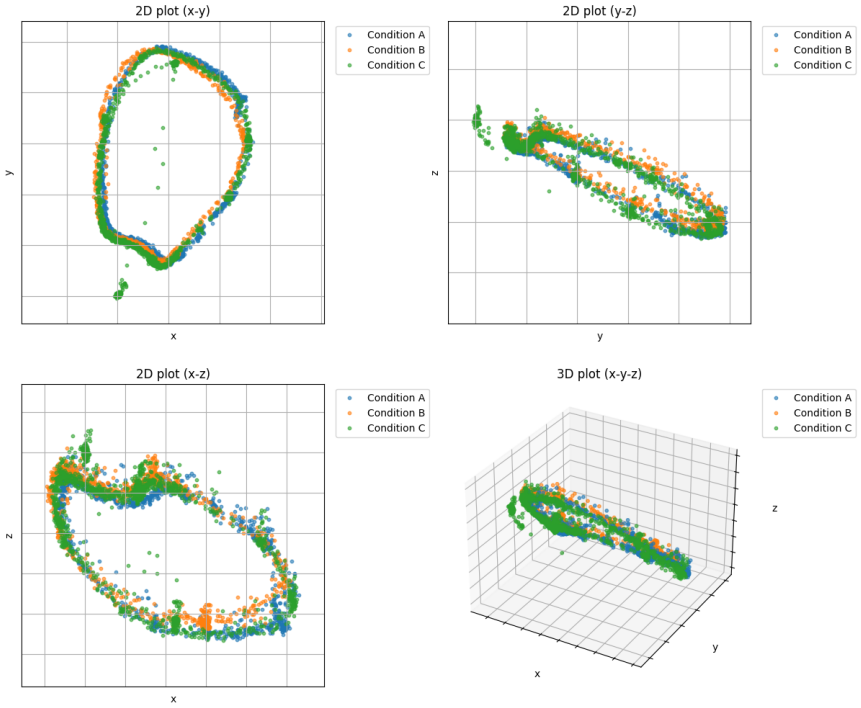


図 5.4: 各条件における磁場分布（水色：Condition A, オレンジ色：Condition B，緑色：Condition C）

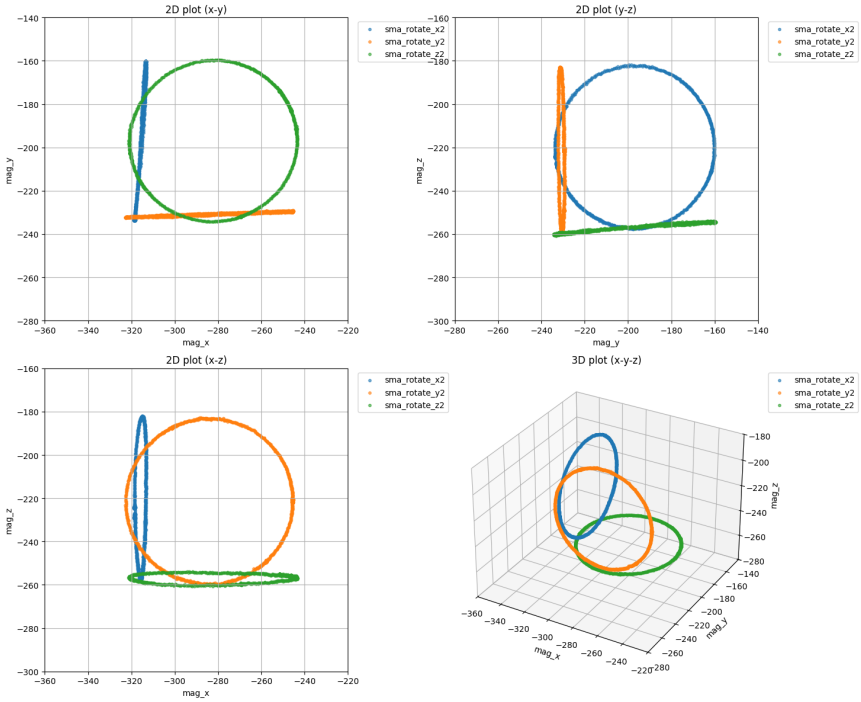


図 5.5: 回転動作による磁場変化計測の様子（青色：x 軸周りに回転， オレンジ色：y 軸周りに回転， 緑色：z 軸周りに回転）

の磁場変化量は，端末を回転させずに各方向へ約 20 cm 並行移動させた際の磁場変化量の約 10 倍に達した．このことから，端末の回転動作に起因する磁場変化が，ジョイスティック操作時の計測に多大な影響を与えることが示唆される．したがって，回転に伴う磁場変化を予測することができれば，その影響を排除可能であると考えられる．

予備調査として，スマートフォンの位置を固定し，各軸周りに回転させた際のデータを収集した．スマートフォンは回転テーブル上に固定しながら回転させている．データ収集の手順は以下の通りである．まず，スマートフォンを設置した初期姿勢における磁場データと姿勢データ（Yaw, Roll, Pitch）を 5 秒間計測し，その平均値をベースラインとする．分析には，生の磁場データからベースラインを減算した変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を用いる．データセットは，この磁場変化量と，その際の姿勢データにより構成される．計測結果を図 5.5 に示す．図 5.6, 5.8， 5.10 は実験の様子を，図 5.7， 5.9， 5.11 は横軸を姿勢データ（角度），縦軸を磁場変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ としてプロットした結果である．これらの結果より，各軸周りの回転動作に対し，それぞれ固有の磁場変化パターンが現れることが確認された．

以上の結果から，スマートフォンの姿勢データを入力，初期姿勢からの磁場変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を出力とする回帰モデルを構築することにより，スマートフォンの姿勢から，その姿勢に起因する磁場変化成分を予測可能であると考えられる．

この考察に基づき，回帰モデル構築用のデータ収集を行った．まず，実際にスマートフォ

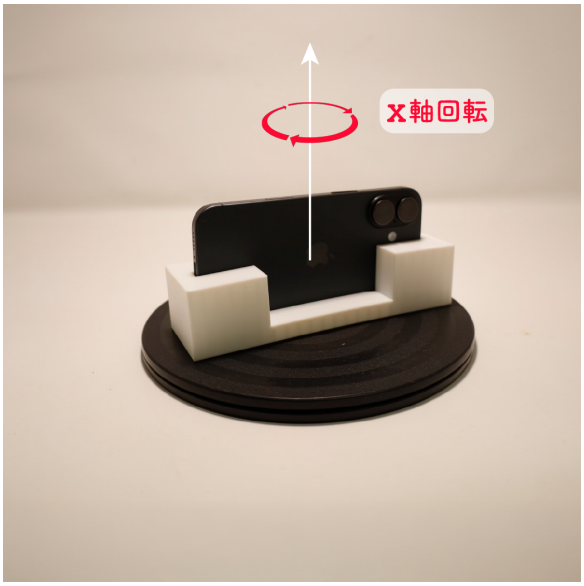


図 5.6: x 軸周りにスマートフォンを回転

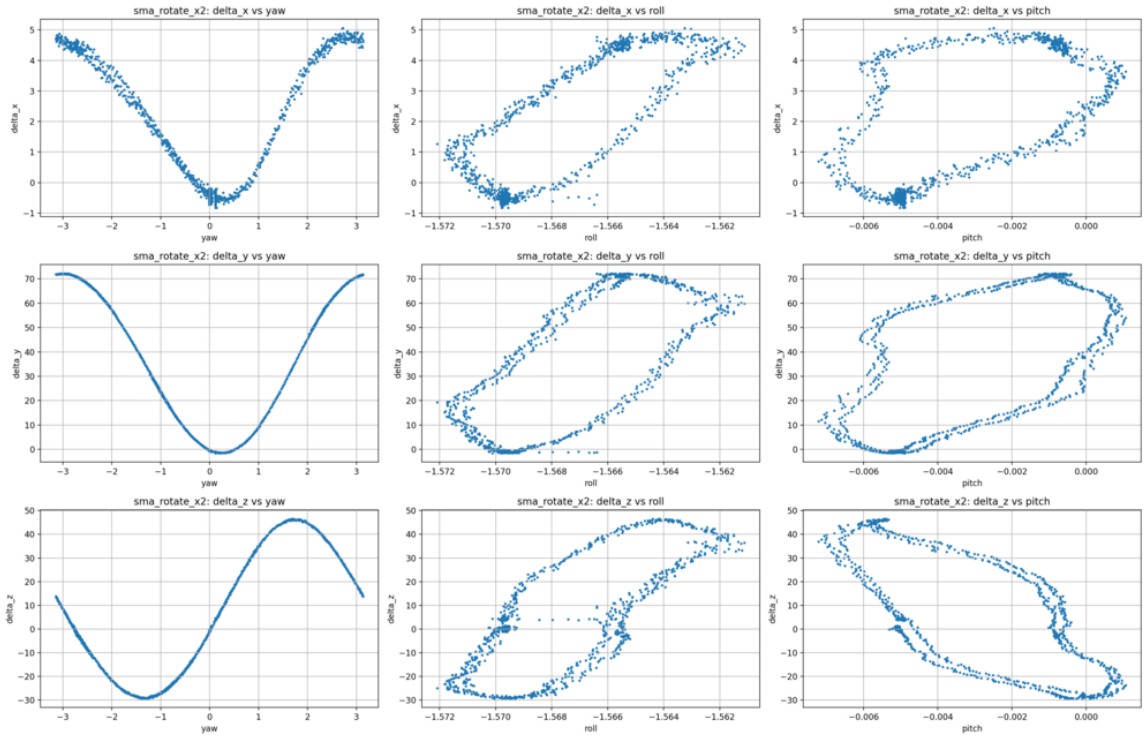


図 5.7: x 軸回転（Pitch）と磁場変化量の関係

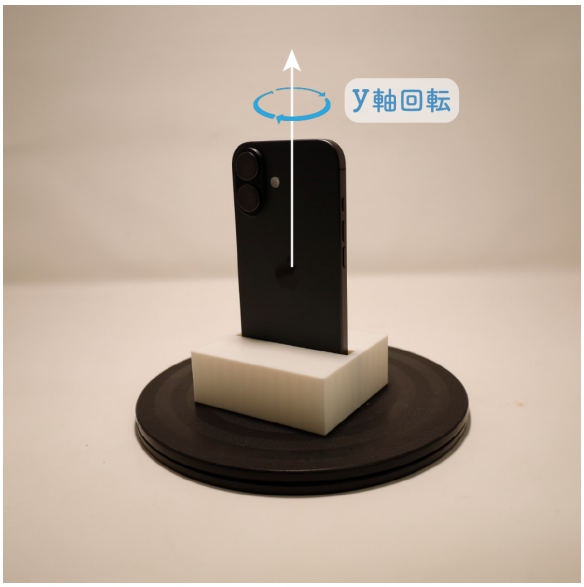


図 5.8: y 軸周りにスマートフォンを回転

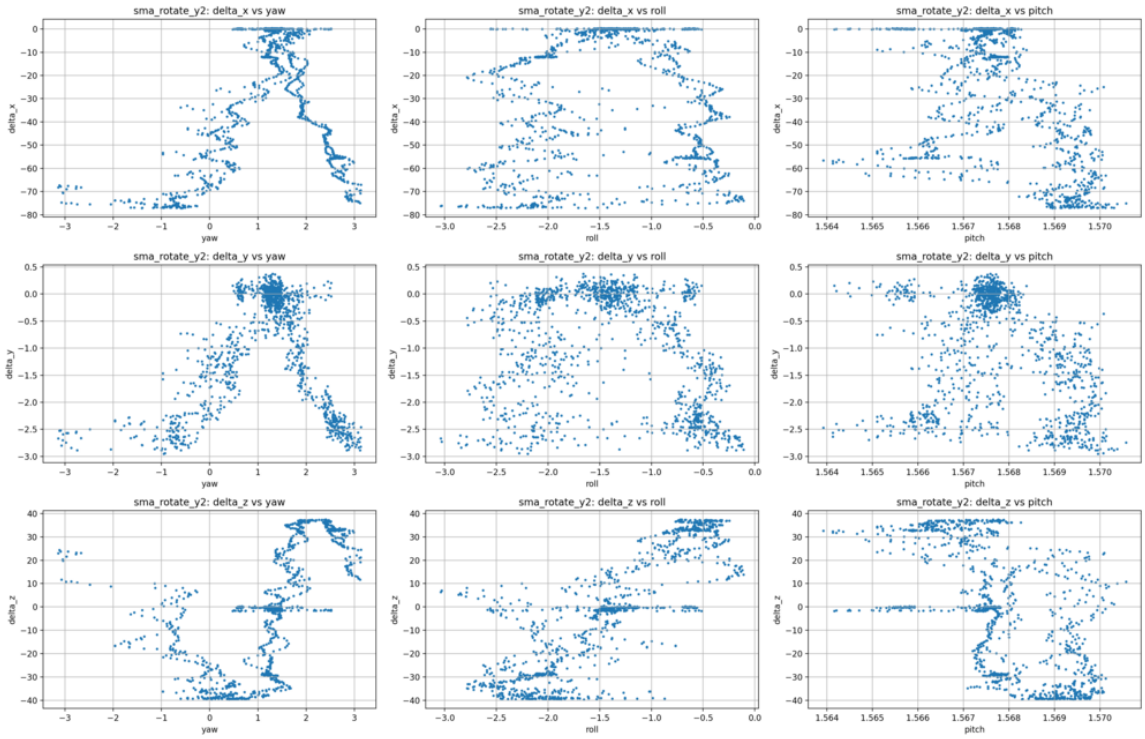


図 5.9: y 軸回転（Roll）と磁場変化量の関係

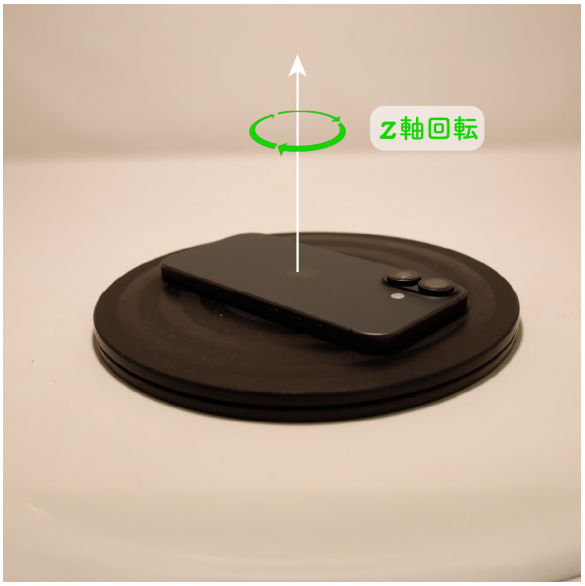


図 5.10: z 軸周りにスマートフォンを回転

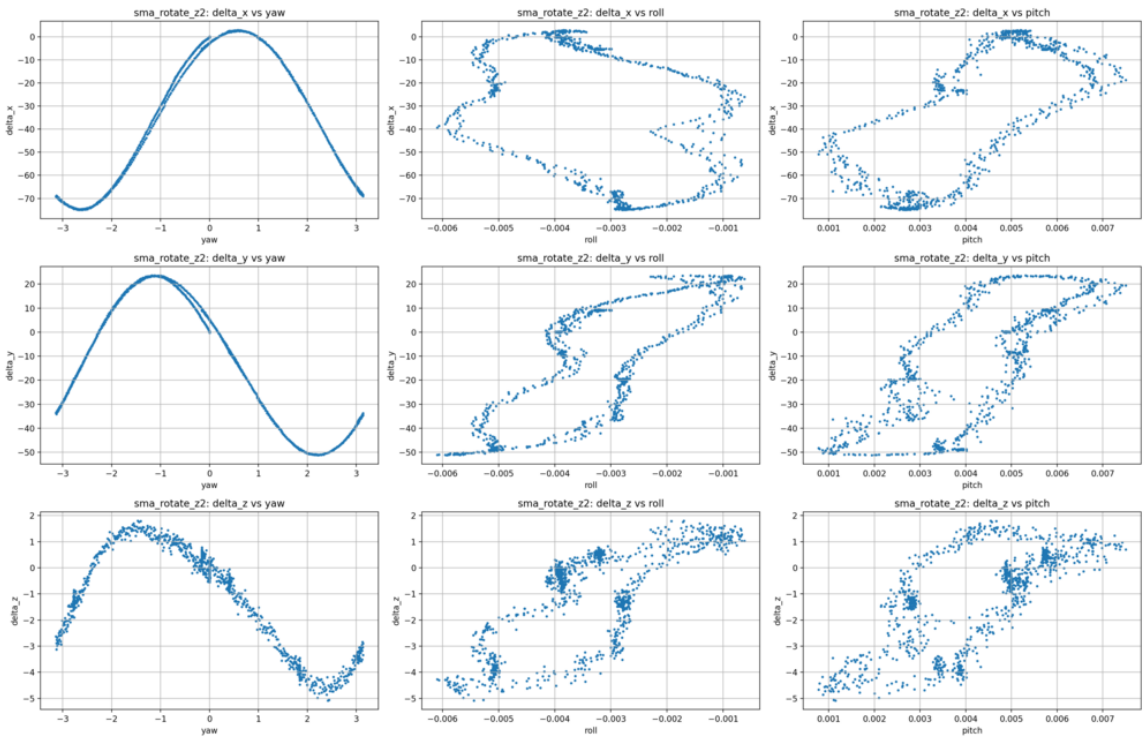


図 5.11: z 軸回転（Yaw）と磁場変化量の関係

ンを把持した状態においてベースラインを取得する．その後，通常の使用時に生じると想定されるランダムな回転動作を各軸に対して加えた．なお，この際，スマートフォンの位置変動は最小限に留めるよう配慮した．ここで取得した姿勢データと磁場変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ のペアを教師データとして，回帰モデルの学習を行った．以下に，構築した回帰モデルにより姿勢データから推定された磁場変化の値と，実際に取得された磁場変化の値を比較した結果を示す．

5.2.5 スマートフォンの回転に起因する磁場変化の影響を考慮したジョイスティック位置推定

本節では，前項までに得られた知見から，本手法の課題であった使用中の姿勢変化（回転）による推定精度の低下を解決するための新たな推定モデルのアプローチを述べる．

6.2.1 節および 6.2.3 節の検証結果より，金属プレートの移動操作に起因する磁場分布は，スマートフォンの姿勢や位置，周囲環境にかかわらず常に一定の形状を保つことが確認された．これは，ジョイスティック入力成分（信号）と，スマートフォンの姿勢変化に伴う環境磁場成分（ノイズ）が，物理的に独立した現象として扱える可能性を示唆している．

また，6.2.4 節の調査結果より，スマートフォンの回転動作とそれに伴う磁場変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ の間には，各軸固有の高い相関関係が存在することが明らかとなった．この知見に基づき構築された回帰モデルは，スマートフォンの姿勢データ（Yaw, Roll, Pitch）から，その姿勢において環境磁場から受けるバイアス成分を高精度に予測可能である．

以上の知見を統合すると，動的な環境下におけるジョイスティックの位置推定は，以下の手順により実現可能であると推測される．まず，リアルタイムに取得される姿勢データを用いて，回転動作に起因する環境磁場の変動成分を予測する．次に，センサにより計測された全体の磁場データから，この予測された環境変動成分を減算する．この処理により，動的なノイズが除去され，金属プレートの操作に由来する磁場変化成分のみを抽出することが可能となる．抽出された成分は，前述の通り姿勢によらず一定の分布を持つため，静止状態において学習した位置推定モデルに入力することにより，スマートフォン把持に伴う手ブレが存在する状況下においても，高精度なジョイスティック操作が可能になると考えられる．

第6章　まとめ

本研究では，MagSafe 機構と金属プレートを用いたスマートフォン背面ジョイスティックアクセサリによる入力手法を示した．精度調査では，スマートフォン固定条件下において，決定係数 (R^2) は 0.95 以上，平均絶対誤差 (MAE) は 0.1 mm 未満という高い精度を確認した．これにより，金属プレートを用いて連続的かつ高精度なジョイスティック操作が可能であることが示唆された．しかし，現状の実装には，スマートフォンを把持した状態，またはスマートフォンを歩きながら操作している状態における入力精度が極端に低下するという課題がある．この課題に対し，環境磁場の補正を行うこと，また予備調査を通して金属プレートの動きによる磁場変化の分布や，スマートフォンの回転による磁場変化のパターンを解析することにより，日常生活でも実用可能な設計にできる可能性を示した．今後は，よりロバストな設計，実装を行うとともに，ユーザ調査を通した性能評価，ユーザビリティの評価を行う．

業績リスト

本研究に関する論文および発表

査読なし国内学会予稿

- 石川 和哉，和田 優斗，池松 香，志築 文太郎．スマートフォン内蔵磁気センサを用いた背面ジョイスティックアクセサリの提案．第 33 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ予稿集，WISS 2025，2025．

謝辞

本研究を進めるにあたって, 志築文太郎先生, 川口一画先生, 高橋伸先生には多大なご意見とご指導を頂きました. 心から感謝申し上げます. 特に, 志築文太郎先生には, 研究の進め方, 論文執筆をはじめとした研究の基礎をご指導いただきました. さらに, 研究の相談および研究生活に関して多くのご助言およびご指南を頂きました. 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，研究生活において大変お世話になりました．WAVE チームの皆様にはチームゼミにおけるご意見および論文の添削に加えて，研究生活に関しても多くのご助言を頂きました．心より感謝いたします．特に，和田 優斗氏には研究方針，論文執筆等，本研究における重要な部分に関する多くのアドバイスを頂きました．多大なご協力に心からお礼申し上げます．COMMUNICATION チームのみなさまにも，研究発表および研究室生活において，多くのご意見とご支援を頂きました．また，本研究は LINE ヤフー株式会社様のご支援により遂行されました．特に，LINE ヤフー株式会社の池松 香様には研究アイデア，研究方針，ならびに論文執筆において多くのアドバイス，ならびにサポートを頂きました．この場を借りて心より感謝申し上げます．最後に，学生生活においてお世話になった全てのみなさま，そして，私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝申し上げます.

参考文献

[ABW11] Daniel Ashbrook, Patrick Baudisch, and Sean White. Nenya: Subtle and eyes-free mobile input with a magnetically-tracked finger ring. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2043–2046, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.

[AKY18] Heba Abdelnasser, Ayman Khalafallah, and Moustafa Yousef. MagController: A system for touchless mobile devices control using the magnetic field. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 300–305, 2018.

[App24] Apple Inc. Accessory Design Guidelines for Apple Devices. `https://developer.apple.com/jp/accessories/`, 2024. (Accessed on 01/18/2026).

[AS21] Takehiro Abe and Daisuke Sakamoto. MagneTrack: Magnetic Field Separation Method for Continuous and Simultaneous 1-DOF Tracking of Two-magnets. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*, MobileHCI '21, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

[BAI17] Lonni Besançon, Mehdi Ammi, and Tobias Isenberg. Pressure-Based Gain Factor Control for Mobile 3D Interaction using Locally-Coupled Devices. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1831–1842, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[BC09] Patrick Baudisch and Gerry Chu. Back-of-device interaction allows creating very small touch devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1923–1932, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.

[CCT20] Liang Chen, Dongyi Chen, and Zhizhong Tan. Fingertip-specific mobile interaction through camera-based fingertip identification. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1673, No. 1, p. 7, nov 2020.

[CG19] Victor Cheung and Audrey Girouard. Tangible around-device interaction using rotatory gestures with a magnetic ring. In *Proceedings of the 21st International Conference on*

Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '19, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[CKK24] Jaemin Choi, Insu Kim, and Hyosu Kim. MagID: Enhancing the functionality of off-the-shelf smartphones through magnetic accessory identification. *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 149903–149915, 2024.

[CLWP13] Ke-Yu Chen, Kent Lyons, Sean White, and Shwetak Patel. uTrack: 3d input using two magnetic sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 237–244, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[CST+23] Stefano Chioccarello, Arthur Sluÿters, Alberto Testolin, Jean Vanderdonckt, and Sébastien Lambot. FORTE: Few samples for recognizing hand gestures with a smartphone-attached radar. *Proceedings of the ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 7, No. EICS, pp. 1–25, June 2023.

[ELH08] Jane Elith, John R. Leathwick, and Trevor Hastie. A Working Guide to Boosted Regression Trees. *Journal of Animal Ecology*, Vol. 77, No. 4, pp. 802–813, 2008.

[GL17] Emilio Granell and Luis A. Leiva. β Tap: Back-of-device tap input with built-in sensors. In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[HAW13] Sungjae Hwang, Myungwook Ahn, and Kwang-yun Wohn. MagGetz: customizable passive tangible controllers on and around conventional mobile devices. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 411–416, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[HH10] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Minput: Enabling interaction on small mobile devices with high-precision, low-cost, multipoint optical tracking. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 1661–1664, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.

[HLG+21] Eiji Hayashi, Jaime Lien, Nicholas Gillian, Leonardo Giusti, Dave Weber, Jin Yamanaka, Lauren Bedal, and Ivan Poupyrev. RadarNet: Efficient gesture recognition technique utilizing a miniature radar sensor. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

[KHT16] Kleomenis Katevas, Hamed Haddadi, and Laurissa Tokarchuk. Sensingkit: Evaluating the sensor power consumption in ios devices. In *2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, pp. 222–225, 2016.

[KLHL20] Bogyeong Kim, Chaeeun Lee, Jung Huh, and Woohun Lee. Puppet Book: Digital storybook with back-of-device puppeteering interface for parent and child. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–4, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

[KRL12] Hwan Kim, Yea-kyung Row, and Geehyuk Lee. Back Keyboard: A physical keyboard on backside of mobile phone using qwerty. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1583–1588, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

[KRY10] Hamed Ketabdar, Mehran Roshandel, and Kamer Ali Yüksel. Towards using embedded magnetic field sensor for around mobile device 3D interaction. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '10, pp. 153–156, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.

[KS15] Azusa Kadomura and Itiro Siio. MagNail: User interaction with smart device through magnet attached to fingernail. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, UbiComp/ISWC'15 Adjunct, pp. 309–312, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

[KSC+25] Insu Kim, Suhyeon Shin, Jaemin Choi, Junseob Kim, Junhyub Lee, Sangeun Oh, Eunji Park, and Hyosu Kim. MagPie: Extending a smartphone ' s interaction space via a customizable magnetic back-of-device input accessory. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, pp. 1–16, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.

[Mat] MathWorks. 磁力計キャリブレーション. `https://jp.mathworks.com/help/nav/ug/magnetometer-calibration.html`. (Accessed on 01/18/2026).

[MSK+19] Jess McIntosh, Paul Strohmeier, Jarrod Knibbe, Sebastian Boring, and Kasper Hornbæk. Magnetips: Combining fingertip tracking and haptic feedback for around-device interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[Ozy15] Talat Ozyagcilar. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard- and Soft-Iron Interference, November 2015. Rev. 4.0.

[SH06] Masanori Sugimoto and Keiichi Hiroki. HybridTouch: an intuitive manipulation technique for pdas using their front and rear surfaces. In *Proceedings of the 8th Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '06, pp. 137–140, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.

[SIR+10] James Scott, Shahram Izadi, Leila Sadat Rezai, Dominika Ruszkowski, Xiaojun Bi, and Ravin Balakrishnan. RearType: text entry using keys on the back of a device. In *22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, Mobile HCI '10, 2010.

[SZWX18] Ke Sun, Ting Zhao, Wei Wang, and Lei Xie. VSkin: Sensing touch gestures on surfaces of mobile devices using acoustic signals. In *Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '18, pp. 591–605, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[TFI+22] Taichi Tsuchida, Kazuyuki Fujita, Kaori Ikematsu, Sayan Sarcar, Kazuki Takashima, and Yoshifumi Kitamura. TetraForce: A magnetic-based interface enabling pressure force and shear force input applied to front and back of a smartphone. *Proceedings of the ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 6, No. ISS, pp. 185–206, November 2022.

[WFB+07] Daniel Wigdor, Clifton Forlines, Patrick Baudisch, John Barnwell, and Chia Shen. Lucid touch: a see-through mobile device. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, pp. 269–278, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.

[WFZ16] Pui Chung Wong, Hongbo Fu, and Kening Zhu. Back-Mirror: Back-of-device one-handed interaction on smartphones. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Mobile Graphics and Interactive Applications*, SA '16, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

[Wir24] Wireless Power Consortium. Wireless Power Consortium Website. `https://www.wirelesspowerconsortium.com/`, 2024. (Accessed on 01/01/2025).

[WZJ+21] Lei Wang, Xiang Zhang, Yuanshuang Jiang, Yong Zhang, Chenren Xu, Ruiyang Gao, and Daqing Zhang. Watching Your Phone's Back: Gesture recognition by sensing acoustical structure-borne propagation. *Proceedings of the ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 5, No. 2, pp. 1–26, June 2021.

[XHW13] Xiang Xiao, Teng Han, and Jingtao Wang. LensGesture: augmenting mobile interactions with back-of-device finger gestures. In *Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '13, pp. 287–294, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[YENG19] Amit Yadav, Alexander Keith Eady, Sara Nabil, and Audrey Girouard. JoyHolder: Tangible back-of-device mobile interactions. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '19, pp. 343–346, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[YMI18] Wataru Yamada, Hiroyuki Manabe, and Daizo Ikeda. CamTrackPoint: Camera-based pointing stick using transmitted light through finger. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 313–320, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[ZGZ+15] Cheng Zhang, Anhong Guo, Dingtian Zhang, Caleb Southern, Rosa Arriaga, and Gregory Abowd. BeyondTouch: Extending the input language with built-in sensors on commodity smartphones. In *Proceedings of the 20th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '15, pp. 67–77, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

[ZPS+13] Cheng Zhang, Aman Parnami, Caleb Southern, Edison Thomaz, Gabriel Reyes, Rosa Arriaga, and Gregory D. Abowd. BackTap: Robust four-point tapping on the back of an off-the-shelf smartphone. In *Adjunct Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13 Adjunct, pp. 111–112, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[ZSP+20] Chi Zhang, Deepak Ranjan Sahoo, Jennifer Pearson, Simon Robinson, Mark D Holton, Philip Hopkins, and Matt Jones. Active PinScreen: Exploring spatio-temporal tactile feedbackfor multi-finger interaction. In *22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '20, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.