

博士論文

回転磁石マーカによる動的磁場を用いた
スマートデバイスの位置推定手法

281667208 渡邊 康祐

名古屋大学大学院 工学研究科
情報・通信工学専攻

2021年4月

目次

| | | |
|------------|---|-----------|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | ユビキタスコンピューティングにおける位置情報の役割 | 1 |
| 1.1.1 | ユビキタスコンピューティングとスマートデバイスの登場 | 1 |
| 1.1.2 | スマートデバイスの普及による位置情報活用の広がり | 2 |
| 1.1.3 | センサデータを用いた屋内位置推定手法 | 2 |
| 1.2 | 本研究の目的 | 3 |
| 1.2.1 | 本研究が目指すサービス | 3 |
| 1.2.2 | スマートデバイスでの高精度位置推定の課題 | 4 |
| 1.2.3 | スマートデバイスでの高精度位置推定に対する本研究の貢献 | 5 |
| 1.2.4 | 本論文の構成 | 6 |
| 第2章 | 位置推定手法の研究動向 | 8 |
| 2.1 | 電波を用いた位置推定 | 8 |
| 2.1.1 | Wi-Fi アクセスポイントを用いた位置推定 | 8 |
| 2.1.2 | BLE を用いた位置推定 | 9 |
| 2.1.3 | UWB 無線システムを用いた位置推定 | 10 |
| 2.2 | 超音波を用いた位置推定 | 11 |
| 2.3 | PDR を用いた推定 | 11 |
| 2.4 | 可視光を用いた位置推定 | 12 |
| 2.5 | 磁場を用いた位置推定 | 13 |
| 2.5.1 | 静的磁場を用いた位置推定 | 13 |
| 2.5.2 | 動的磁場を用いた位置推定 | 14 |
| 2.5.3 | 回転磁石マーカを用いた位置推定 | 15 |
| 2.6 | スマートデバイスでの高精度位置推定の課題 | 16 |
| 2.7 | 本章のまとめ | 17 |
| 第3章 | スマートデバイスでの高精度位置推定を実現するための回転磁石マーカの 開発 | 19 |
| 3.1 | 既存の回転磁石マーカを用いたスマートデバイス位置推定の課題 | 19 |
| 3.2 | 回転磁石マーカの設計 | 20 |
| 3.2.1 | 磁石の回転機構に用いるモータの選定 | 20 |
| 3.2.2 | 磁場の発生に用いる磁石の選定 | 21 |
| 3.3 | 回転磁石マーカの実装 | 22 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.3.1 | 磁石の回転モジュール | 22 |
| 3.3.2 | モータの制御モジュール | 23 |
| 3.3.3 | コイルを用いた手法との比較 | 24 |
| 3.4 | 実用に向けての取り組み | 24 |
| 3.5 | 本章のまとめ | 25 |
| 第4章 | 回転磁石マーカによる動的磁場を用いたスマートデバイス静止時の3次元位置推定手法 | 27 |
| 4.1 | 提案手法の概要 | 27 |
| 4.2 | 回転磁石マーカによる磁場 | 28 |
| 4.2.1 | 回転磁石マーカによる磁場の定式化 | 28 |
| 4.2.2 | シミュレータによる磁場の可視化 | 30 |
| 4.3 | 各座標の推定手法 | 33 |
| 4.3.1 | 方位角推定 | 33 |
| 4.3.2 | 仰角推定 | 34 |
| 4.3.3 | 距離推定 | 35 |
| 4.3.4 | 姿勢推定 | 36 |
| 4.3.5 | 磁気データのノイズ軽減処理 | 37 |
| 4.4 | 3次元位置推定の事前実験 | 41 |
| 4.4.1 | 事前実験の設定 | 41 |
| 4.4.2 | 方位角推定の結果 | 42 |
| 4.4.3 | 仰角推定の結果 | 43 |
| 4.4.4 | 距離推定の結果 | 44 |
| 4.4.5 | 姿勢推定の結果 | 46 |
| 4.4.6 | 回転磁石マーカによる磁気の影響範囲 | 48 |
| 4.4.7 | 非対称磁石を用いた方位角推定の検討 | 50 |
| 4.5 | 3次元位置推定の評価実験 | 54 |
| 4.5.1 | 3次元位置推定の実験設定 | 54 |
| 4.5.2 | 3次元位置推定の評価 | 56 |
| 4.6 | 本章のまとめ | 57 |
| 第5章 | 回転磁石マーカによる動的磁場を用いたスマートデバイスの移動経路推定 | 69 |
| 5.1 | 移動するスマートデバイスに対する磁場を用いた位置推定の課題 | 69 |
| 5.2 | 移動経路上の回転磁石マーカによる磁場 | 70 |
| 5.2.1 | 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁場の定式化 | 70 |
| 5.2.2 | 移動経路の定式化 | 71 |
| 5.2.3 | シミュレータによる磁場との比較 | 72 |
| 5.2.4 | 環境磁気軽減手法 | 73 |
| 5.3 | 移動経路推定の評価実験 | 74 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|-----------|
| 5.3.1 | 移動経路推定の実験設定 | 74 |
| 5.3.2 | 環境磁気軽減手法の評価 | 75 |
| 5.3.3 | 移動経路推定の結果 | 76 |
| 5.3.4 | デバイスの違いによる移動経路推定の精度評価 | 78 |
| 5.3.5 | 磁石の回転数の違いによる移動経路推定の精度評価 | 79 |
| 5.4 | 本章のまとめ | 81 |
| 第 6 章 | おわりに | 83 |
| 6.1 | まとめ | 83 |
| 6.2 | 今後の展開 | 84 |
| 付 録 A | 式 (4.4)~ 式 (4.9) のグラフ | 93 |
| 付 録 B | 4.5 節の推定結果データ | 94 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | 武島らが開発した回転磁石マーカ | 16 |
| 3.1 | 磁石の装着台の平面図と正面図 | 21 |
| 3.2 | 回転磁石マーカのシステム図 | 22 |
| 3.3 | 本研究で開発した回転磁石マーカ | 24 |
| 3.4 | (左) デモで使用した回転磁石マーカ, (右) 情報処理学会でのデモの様子 | 25 |
| 3.5 | 位置測位アプリの画面 | 26 |
| 4.1 | 静止したスマートデバイスの3次元位置推定の外観 | 28 |
| 4.2 | 静止したスマートデバイスの3次元位置推定の流れ | 29 |
| 4.3 | 回転磁石マーカが生み出す磁場の極座標表示 | 30 |
| 4.4 | 回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0秒, (右上) 12/72秒, (左中) 24/72秒, (右中) 36/72秒, (左下) 48/72秒, (右下) 60/72秒 | 32 |
| 4.5 | シミュレーションによる回転磁石マーカの磁場 | 33 |
| 4.6 | 4.2.2節でのシミュレーション結果と本節で導出した理論式による磁場の比較, (半透明線) シミュレーションによる磁場, (実線) 導出した理論式による磁場 | 34 |
| 4.7 | デバイスの姿勢を表す角度の定義 | 37 |
| 4.8 | 10周期分の磁気データの平均化前と平均化後の比較, (左) x軸成分, (中) y軸成分, (右) z軸成分 | 38 |
| 4.9 | 窓幅ごとの移動平均の結果比較 | 39 |
| 4.10 | 回数ごとの移動平均の結果比較 | 39 |
| 4.11 | 移動平均前と後の磁気データの比較, (左) x軸成分, (中) y軸成分, (右) z軸成分 | 40 |
| 4.12 | 元の磁気データと近似曲線の比較, (左) x軸成分, (中) y軸成分, (右) z軸成分 | 40 |
| 4.13 | 実験システムの構成 | 42 |
| 4.14 | 座標系の設定, (左) スマートフォン, (右) 回転磁石マーカ | 42 |
| 4.15 | 仰角 ψ 推定の実験の様子, (左) 仰角 $\psi = 30^\circ$ 時の推定, (右) 仰角 $\psi = 0^\circ$ 時の推定 | 43 |
| 4.16 | 方位角 θ の推定精度 | 44 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.17 | 計測された磁気成分 (距離 $r = 1\text{ m}$, ノイズ軽減なし) | 45 |
| 4.18 | 距離と磁場のノルムの振幅の関係 | 46 |
| 4.19 | 距離推定の推定精度 | 47 |
| 4.20 | 推定した姿勢, (左上) 姿勢 1: x 軸中心に 45° , (右上) 姿勢 2: y 軸中心に 45° , (左下) 姿勢 3: z 軸中心に 45° , (右下) 姿勢 4: z 軸中心に 45° のち x 軸中心に 45° | 48 |
| 4.21 | 姿勢 3 で計測された磁気データ | 49 |
| 4.22 | 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ での磁場の x 軸成分, (左上) 距離 $r = 1\text{ m}$, (右上) 距離 $r = 2\text{ m}$, (左下) 距離 $r = 3\text{ m}$, (右下) 距離 $r = 4\text{ m}$ | 50 |
| 4.23 | 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0$ での磁場の x 軸成分のパワースペクトル, (左上) 距離 $r = 1\text{ m}$, (右上) 距離 $r = 2\text{ m}$, (左下) 距離 $r = 3\text{ m}$, (右下) 距離 $r = 4\text{ m}$ | 51 |
| 4.24 | 基底関数に用いたメキシカンハット, (左) 幅 1, (右) 幅 31 | 52 |
| 4.25 | 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ での磁場の x 軸成分のウェーブレット変換, (下) 凡例, (左上) 距離 $r = 1\text{ m}$, (右上) 距離 $r = 2\text{ m}$, (左下) 距離 $r = 3\text{ m}$, (右下) 距離 $r = 4\text{ m}$ | 53 |
| 4.26 | 大きさの異なる磁石を配置した回転磁石マーカ | 54 |
| 4.27 | 回転磁石マーカの磁石の配置 | 55 |
| 4.28 | 強さの異なる磁石を配置した回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0 秒, (右上) 12/72 秒, (左中) 24/72 秒, (右中) 36/72 秒, (左下) 48/72 秒, (右下) 60/72 秒 | 59 |
| 4.29 | 計測値とシミュレーションの比較: (左) 距離 $r = 20\text{ cm}$ での磁気成分, (右) 距離 $r = 1\text{ m}$ での磁気成分 | 60 |
| 4.30 | L 字型に磁石を配置した回転磁石マーカ | 60 |
| 4.31 | 回転磁石マーカの磁石の配置 | 61 |
| 4.32 | L 字型に磁石を配置した回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0 秒, (右上) 12/72 秒, (左中) 24/72 秒, (右中) 36/72 秒, (左下) 48/72 秒, (右下) 60/72 秒 | 62 |
| 4.33 | 計測値とシミュレーションの比較: (左) 距離 $r = 25\text{ cm}$ での磁気成分, (右) 距離 $r = 1\text{ m}$ での磁気成分 | 63 |
| 4.34 | 同時推定の計測場所 | 63 |
| 4.35 | ノイズ軽減処理の様子 (方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 0\text{ m}$), (左上) 平均化, (右上) 平滑化, (左下) カーブフィッティングによる近似曲線 | 64 |
| 4.36 | 方位角 θ_1 の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰: 正解方位角 点: 平均バー: 標準偏差 | 65 |
| 4.37 | 方位角 θ_2 の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰: 正解方位角 点: 平均バー: 標準偏差 | 66 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.38 | 仰角 ψ の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰:正解仰角 点:平均 バー: 標準偏差 | 67 |
| 4.39 | 距離 r の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰:正解距離 点:平均 バー: 標準偏差 | 68 |
| 5.1 | 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁気 | 72 |
| 5.2 | 直線移動するデバイスの経路 | 72 |
| 5.3 | シミュレーション結果と提案した理論式との比較 | 73 |
| 5.4 | 等速直線運動する経路の実験 | 75 |
| 5.5 | 進行方向を変える経路の実験 | 75 |
| 5.6 | 計測磁気と環境磁気 | 76 |
| 5.7 | 環境磁気軽減手法後の磁気と環境磁気を引いた磁気との比較 | 77 |
| 5.8 | 移動経路 1, 2, 3 で計測された磁気ノルムの比較 | 78 |
| 5.9 | 正解経路と推定経路の比較 | 78 |
| 5.10 | 直線経路での移動経路推定の結果 | 79 |
| 5.11 | 折れ曲がる経路での経路推定結果 | 79 |
| 5.12 | 磁石の回転数と推定精度 | 81 |
| A.1 | 式 (4.4)~ 式 (4.6) のグラフ | 93 |
| A.2 | 式 (4.7)~ 式 (4.9) のグラフ | 93 |

表目次

| | | |
|------|--|-----|
| 1.1 | 既存の屋内位置推定手法の比較 | 5 |
| 4.1 | シミュレーション結果と提案した理論式との決定係数による評価 | 33 |
| 4.2 | 方位角 θ の推定結果 | 43 |
| 4.3 | 仰角 ψ の推定結果 (距離 $r = 1\text{ m}$, ノイズ軽減なし) | 44 |
| 4.4 | 姿勢推定の結果 (距離 $r = 1\text{ m}$) | 47 |
| 4.5 | 姿勢推定の結果 (距離 $r = 1.5\text{ m}$) | 48 |
| 5.1 | スマートフォンごとの磁気定数 | 80 |
| 5.2 | スマートフォンごとの推定精度 (経路 1) | 80 |
| 5.3 | スマートフォンごとの推定精度 (経路 2) | 81 |
| B.1 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{ m}$ の推定結果 | 95 |
| B.2 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 1\text{ m}$ の推定結果 | 95 |
| B.3 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{ m}$ の推定結果 | 95 |
| B.4 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 2\text{ m}$ の推定結果 | 96 |
| B.5 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{ m}$ の推定結果 | 96 |
| B.6 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 3\text{ m}$ の推定結果 | 96 |
| B.7 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{ m}$ の推定結果 | 97 |
| B.8 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 1\text{ m}$ の推定結果 | 97 |
| B.9 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{ m}$ の推定結果 | 97 |
| B.10 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 2\text{ m}$ の推定結果 | 98 |
| B.11 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{ m}$ の推定結果 | 98 |
| B.12 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 3\text{ m}$ の推定結果 | 98 |
| B.13 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{ m}$ の推定結果 | 99 |
| B.14 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 1\text{ m}$ の推定結果 | 99 |
| B.15 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{ m}$ の推定結果 | 99 |
| B.16 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 2\text{ m}$ の推定結果 | 100 |
| B.17 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{ m}$ の推定結果 | 100 |
| B.18 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 3\text{ m}$ の推定結果 | 100 |
| B.19 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{ m}$ の推定結果 | 101 |
| B.20 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 1\text{ m}$ の推定結果 | 101 |
| B.21 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{ m}$ の推定結果 | 101 |

| | | |
|------|---|-----|
| B.22 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果 | 102 |
| B.23 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果 | 102 |
| B.24 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果 | 102 |
| B.25 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果 | 103 |
| B.26 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果 | 103 |
| B.27 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果 | 103 |
| B.28 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果 | 104 |
| B.29 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果 | 104 |
| B.30 | 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果 | 104 |

第1章 序論

本章の前半では、本研究の背景となるユビキタスコンピューティングと位置情報との関連性について述べる。まず、コンピュータの発明からユビキタスコンピューティングの概念の登場について述べる。次に、近年のスマートデバイスの登場による位置情報活用の広がり、さらにユビキタスコンピューティング実現における高精度屋内位置情報の重要性を示す。後半部分では、まず既存の高精度屋内位置推定手法をスマートデバイスに対して利用する活用の課題について説明する。次に、その課題に対しての本研究の提案手法による貢献を示し、最後に本論文の構成について示す。

1.1 ユビキタスコンピューティングにおける位置情報の役割

1.1.1 ユビキタスコンピューティングとスマートデバイスの登場

20世紀におけるコンピュータの発明は人類の情報処理能力を飛躍的に向上させた。コンピュータの初期の活用事例は軍事的なものが多く、一般的な利用は限定的であったが、その後、コンピュータ間のネットワークが構築され、ティム・バーナーズ＝リーによる World Wide Web の開発や、各種プロトコルの策定によってコンピュータ間の情報共有が爆発的に加速した。これらコンピュータやそのネットワークの発明は自然科学や工業技術の発展に大きな貢献をもたらし、コンピュータを用いた自然科学の研究や、数値計算といった新たな学問領域が登場した。

1989年にパロアルト研究所のマーク・ワイザーはコンピュータが環境に溶け込み、意識することなく利用できるユビキタスコンピューティングの概念を提唱し、それが実現したユビキタス社会の到来を予想した [1]。彼はユビキタスコンピューティングをインターフェースの理想的な姿として描き、ディスプレイ端末の試作品を開発してユビキタスコンピューティングの例として提示した。

その後コンピュータは高性能・小型化の一途をたどり、様々な場面でコンピュータが活用されるようになった。かつての大型ワークフレーム以上の性能のコンピュータが小型のノートパソコンとして持ち運び可能になり、それに伴うコンピュータの普及によって活用場所を広げていった。また21世紀に突入してから登場したスマートフォンやスマートウォッチなどのスマートデバイスにより、現代ではコンピュータは手に所持、もしくは身に着けるサイズにまで小型化され、いつでも膨大な情報にアクセス可能になり、我々の生活様式は大きな変革を遂げた。

今日ではノート PC やスマートフォンをはじめとしたデバイスの普及によって様々な場所にコンピュータが存在し、いつでもコンピュータが提供する情報やサービスにアクセスできるようになったが、マーク・ワイザーが提唱したユビキタス社会は未だに実現していない。一方で現代社会では、PC やデバイスの普及とともにユーザーに要求される知識や技能が増大し、コンピュータの操作に不慣れな世代や個々人のコンピュータに対する知識量によって、その恩恵を享受できる人達の間で格差が生じている。誰もがコンピュータの恩恵を等しく受けられる社会にするために、コンピュータの存在を意識せずにその利便性を享受できるユビキタス社会の実現が不可欠である。

1.1.2 スマートデバイスの普及による位置情報活用の広がり

スマートフォンやスマートウォッチに代表されるスマートデバイスの登場によって個人が各種センサを持ち歩く時代が到来し、デバイス所持者一人一人の周辺環境のデータ取得が可能になった。例えば、スマートフォンには加速度センサや地磁気センサ、気圧センサなどを始めとした各種センサが搭載されており、デバイス所持者のコンテキスト推定や行動認識などに利用されている。これらのデバイスに搭載されたセンサによって生み出された膨大なデータは、様々な機械学習や信号処理手法によって分析され、デバイス所持者の要求に応じた様々なサービスを生み出した。

スマートデバイスによるセンサデータの代表的な活用例として、位置情報を利用したサービスがある。屋外における位置情報の多くは GPS (Global Positioning System) をはじめとする GNSS (global navigation satellite system) によって取得され、屋外での誤差 50cm~5m のデバイスの位置推定を可能にした。また日本では 2018 年から準天頂衛星システムの運用が開始され、屋外環境で誤差数 cm の高精度位置推定を可能にする手法として注目を浴びている。準天頂衛星システムを利用した高精度位置情報サービスとして、自律走行可能なロボットトラクタを用いた農業の自動化 [2] [3] や、自動運転を実現するためのシステム [4]、視覚障がい者のナビゲーションシステム [5] などが研究されている。

1.1.3 センサデータを用いた屋内位置推定手法

人工衛星からの電波を利用した屋外での位置推定は、人工衛星からの電波が著しく減衰する屋内や地下などの空間では位置推定の精度が低下、もしくは利用そのものが困難になるため、屋内環境におけるデバイスの位置情報を取得するための様々な手法が提案されている。屋内環境でのデバイスの位置情報の取得にはデバイスに搭載されている様々なセンサをデータを利用する必要がある。近年におけるセンサの小型化によって、前述のスマートデバイスにも磁気センサや加速度センサなどが搭載されるようになり、それに伴ってセンサデータを利用した多様な屋内位置推定手法が提案されるようになった。

今日では様々な屋内位置推定手法が存在し、その推定精度や利用可能な環境、コストなどの面でそれぞれ長所短所があるため、利用者が目的に応じて手法を選択する必要がある [6] [7]. 屋内位置推定手法の例として、Wi-Fi アクセスポイントによる建物内の電波強度の分布を用いるクウジット社の PlaceEngine [8] や WiFiSLAM [9], BLE (Bluetooth Low Energy) の電波強度を利用した Quuppa [10], ABFinder [11] や BLEGNIO [12], 建物内の地磁気を利用した手法である IndoorAtlas [13] や、歩行によって生じる加速度と地磁気を利用した GiPStech [14] などがある. これらの屋内位置推定手法はデバイスの位置を誤差 1 m 以上の精度で推定し、取得された屋内位置情報は店や空港などでのナビゲーション [15] [16] やマーケティング [17], 倉庫や工場での作業効率化 [18] などに利用されている.

上で述べた誤差 1 m 以上の位置情報を取得する手法に対し、誤差数 cm の高精度位置情報を取得する手法が存在する. 例として、数 kHz の動的磁場を発生させ、専用デバイスの高精度 3 次元位置を推定する POLHEMUS [19], Q-track [20] や、スピーカーが発する超音波のデバイスへの到達時刻を利用した手法 [21], UWB (Ultra Wide Band) 無線システムを利用したリアルタイム位置推定システム [22] などが存在する. これらの手法の活用例として、工場内で使われる搬送ロボット [23] の制御や、ホテルや医療機関で使われているロボット [24] のナビゲート、倉庫やオフィスなどでの物品位置管理システム [25] などがある.

1.2 本研究の目的

1.2.1 本研究が目指すサービス

スマートデバイスの高精度位置推定が可能になれば、他の技術と組み合わせて新たなサービスを創出できる. 中でも 2017 年の総務省の情報通信白書 [26] によると、2016 年時点でスマートフォンの個人保有率は 56.8% であり、特に 10 代~40 代の年代では 79.9% 以上の高い普及率を得ている. そのため、スマートフォンのように普及率の高いデバイスの位置を高精度で推定できれば、屋内での人々の移動経路だけでなく興味や関心の対象を推定でき、より詳細な場所や時間、興味の対象などに合わせたサービスの提供が可能になると考えられる.

デバイスの高精度位置推定によって可能になるサービスの例として、ワイヤレス給電伝送が考えられる. 現在研究されているワイヤレス給電伝送には非放射型と放射型の 2 種類が存在し、給電可能な電力が放射型より多いことから、現在は非放射型の方が多く用いられている [27]. しかし、非放射型の手法は給電側と受信側のコイルの位置ずれに弱く、結城らは非放射型の一つである磁界結合方式について位置ずれと給電効率について研究した結果、給電伝送に用いるコイルの中心軸が 10 cm ずれると伝送効率が 60% に低下することを示した [28]. 高精度屋内位置推定によってワイヤレス給電伝送が効率化すれば、デバイスに搭載するバッテリーのサイズの小型化や、屋内に設置した小型センサの定期的なバッテリー交換が不要になると期待される.

またデバイスの位置を高精度で推定できれば、指向性のあるパラメトリックスピーカーを利用して、特定の人物や特定の領域に滞在している人へのピンポイントな音声情報の伝達が可能になる。例えば、大きな音を発生すべきでない深夜での音楽鑑賞や、病院での音声による情報伝達に利用できると考えられる。また騒音と逆位相の音波を発生させるノイズキャンセル技術、いわゆるアクティブノイズキャンセルが研究されており、空調ダクトや排気ダクトの消音や、防音壁などに用いられている [29] [30]。一方で局所空間での消音は未だ研究段階のものが多く [31]、もしデバイスの高精度位置情報が利用できれば、デバイスの周辺領域でのピンポイントなノイズキャンセルがパラメトリックスピーカーを用いて可能になると考えられる。

また高精度屋内位置情報と単焦点プロジェクタを組み合わせ、歩行者の移動経路に合わせた情報の表示が可能になる。単焦点プロジェクタは一般的なプロジェクタよりも狭い領域内で大きな映像の表示が可能で、プロジェクションマッピングやインタラクティブなタッチスクリーンなどに利用されている [32]。単焦点プロジェクタと高精度位置情報を利用すれば、駅構内での歩行者の位置や向きに合わせて駅構内の地図情報や目的地への経路を表示して利便性を向上したり、ショッピングモールで歩行者に合わせて内容や表示位置を変更可能な広告を掲載する応用などが考えられる。

1.2.2 スマートデバイスでの高精度位置推定の課題

現在様々な位置推定手法が提案されているが、スマートフォンのように既に普及したスマートデバイスでの高精度位置推定を実現する手法は存在していない。表 1.1 に代表的な既存の屋内位置推定手法の比較を示す。この表では既存手法を推定精度や遮蔽物に対する影響などの面で評価した。例えば、Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法や、BLE を用いた手法はそれぞれのモジュールが搭載されているスマートデバイスで利用できるが、推定精度を 1 m 以下に抑えるのは難しく、誤差 10 cm 以下の高精度位置推定には不向きである。UWB 無線システムを用いた手法では誤差 50 cm 以下の位置推定が可能だが、専用のタグを利用する必要があり、スマートフォンやタブレット端末のようなスマートデバイスでは利用できない。また超音波を用いた手法では、発信機から数 m 以内の範囲であれば誤差 10 cm 以下でデバイスの 3 次元位置を推定し、スマートフォンのようにマイクを搭載しているデバイスであれば利用可能である。しかし、この手法では超音波の発信機と端末との間に遮蔽物が存在する場合や、超音波の反射によって生じるマルチパスの影響によって推定精度が低下する短所がある。スマートフォンのようなデバイスは手に所持していたり、衣服内に収納している状況が想定されるため、遮蔽物の影響で大きく推定精度が低下するこの手法は望ましくない。

スマートデバイスでの高精度位置推定を実現するため、本研究では遮蔽物の影響を受けにくい動的磁場を用いた手法を採用する。磁場は金属以外の遮蔽物の影響を受けにくいいため、人が密集した場所やデバイスが衣服内にある場合でも大きく推定精度が低下しない利点がある。特に動的磁場を用いた手法は、地磁気や電化製品が発する磁場の影響下においても信号処理によって特定の周波数の磁場の影響のみを抽出でき、磁

表 1.1: 既存の屋内位置推定手法の比較

| | 精度 | 遮蔽物の影響 | 利用する信号 | スマートデバイスでの利用 |
|--------------------------|--------|--------|----------|--------------|
| Wi-Fi アクセスポイント [33] [34] | <5 m | 大 | 電波 | ○ |
| BLE ビーコン [35] [10] | <1 m | 大 | 電波 | ○ |
| UWB 無線システム [36] [22] | <50 cm | 大 | 電波 | × |
| 超音波 [21] [37] | <10 cm | 大 | 音波 | ○ |
| PDR [38] [14] | <1 m | 小 | 加速度, 角速度 | ○ |
| 可視光 [39] [40] | <10 cm | 大 | 可視光 | ○ |
| 静的磁場 [41] [13] | <5 m | 小 | 磁場 | ○ |
| 動的磁場 [42] [43] [19] [20] | <10 cm | 小 | 磁場 | × |

場の発生装置から数 m の範囲で誤差 10 cm 以下の高精度な 3 次元位置推定が可能である。動的磁場を用いた既存の位置推定手法として、1.1.3 節で述べた POLHEMUS や Q-track などが存在する。これらの手法は専用の磁場発生装置を屋内に設置し、ユーザが装着した専用機器に搭載されている磁気センサによって高精度な 3 次元位置推定を実現する。高精度が維持可能な範囲は磁場の発生装置から 5 m 以内の距離だが、発生装置を複数台環境に設置すれば推定可能範囲を拡大できるため、モーションキャプチャや工場での勤怠管理などに利用されている。

既存の動的磁場を用いた高精度位置推定手法はスマートフォンやタブレット端末などに搭載されている磁気センサでは利用できない。なぜならコイルを用いて磁場を発生させる場合、磁場の強さはコイルの半径と巻き数、コイルの鉄心の透磁率、電流の強さに比例するが、一般的な屋内環境でスマートデバイスに搭載されている磁気センサが計測可能な磁場の生成が困難であるためである。例えば、スマートフォンの磁気センサは μT オーダーの磁場を計測可能だが、コイルを用いた場合、1 m 離れた場所に $1\mu\text{T}$ の磁場を生じさせるために必要な電力は 100 kW 以上におよび、一般的な屋内で供給可能な電力を上回る。また、コイルには電力に比例した熱が発生し、その熱によってコイル自身が溶け出す恐れがあるため、長時間の利用には冷却材が必要になる。また消費電力を抑えるためには、コイルの大きさを直径 1 m にする必要があるため、一般的な屋内での設置が困難になる。これらの理由から、既存の動的磁場を用いた手法をスマートフォンやタブレット端末などで利用するのは難しく、スマートデバイスの磁気センサでも利用可能な動的磁場による高精度位置推定手法の提案が必要である。

1.2.3 スマートデバイスの高精度位置推定に対する本研究の貢献

前節で示したように、動的磁場を用いたスマートデバイスの高精度屋内位置推定のためにはいくつかの課題がある。本節ではそれらの課題を解決するための本研究での提案とその貢献について述べる。本研究の貢献をまとめると以下の三つである。

- スマートデバイスに搭載されている磁気センサで計測可能な動的磁場を発生させる装置の開発
- 単一周波数の動的磁場を用いたデバイス静止時の3次元位置推定手法の提案
- 低周波の動的磁場を用いたデバイス移動時の経路推定手法の提案

以下、課題に対するそれぞれの解決手法について述べる。

本研究の一つ目の貢献は、スマートフォンのような既に普及したデバイスに搭載されている安価な磁気センサでの高精度位置推定を可能にする回転磁石マーカの開発である。コイルによる動的磁場の発生には、1.2.2節で説明したように、消費電力や発生する熱、コイルの大きさの問題から、一般的な屋内環境での利用が困難であった。そのため本研究では強力な磁石を回転させて動的磁場を発生させる回転磁石マーカを開発し、一般的な屋内環境でもスマートフォンが計測可能な動的磁場の発生を可能にした。

本研究の二つ目の貢献は、単一周波数の動的磁場のみから静止しているデバイスの3次元位置を推定する手法の提案である。既存の動的磁場を用いる手法では3軸コイルによって異なる三つの周波数を発生させて推定に利用するが、回転磁石マーカでは単一周波数の動的磁場しか発生できないため、既存のコイルによる手法を利用できない。本研究ではこの課題を解決するため、回転する磁石が空間中に発生させる動的磁場を電磁気学を用いて定式化し、任意の空間座標と磁場ベクトルの関係式を導出した。これによって、回転磁石マーカが発生させる磁場を用いたデバイスの3次元位置推定が可能になった。

本研究の三つ目の貢献は、単一周波数の動的磁場のみから移動しているデバイスの経路を推定する手法の提案である。既存手法では1kHz以上の動的磁場を用いているため、動的磁場の周期ごとに計測する磁場はデバイス静止時と同じであるとみなせる。しかし、スマートフォンのサンプリング周波数で計測可能な磁場は最大で数10Hzであるため、動的磁場の周期に対してデバイス所持者の移動速度の影響を無視できない。デバイスが移動中に計測する磁場は静止時とは異なり非周期的になるため、デバイス静止時とは異なる推定手法が必要になる。本研究では、回転磁石マーカの磁場の影響下にあるデバイスが移動中に計測する磁場を定式化し、移動中に計測した磁場からデバイスの初期位置と移動速度の推定が可能になった。

1.2.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず本章では、ユビキタス社会の実現のための高精度屋内位置情報の役割について述べ、次に本研究が目指す高精度屋内位置情報に基づくサービスや、そのためにはスマートフォンのように普及したデバイスの高精度屋内位置推定が必要なこと、そしてそれを実現するための既存手法が存在しないことを述べた。2章では本研究の目的とするスマートデバイスの高精度屋内位置推定の実現に適した手法を選択するために、既存の屋内位置推定に関する研究動向や既存製品について

て述べる．次に3章で本研究で新たに開発した回転磁石マーカについて述べ，利用する磁石の形状や強さ，磁石を回転させるための機構や制御モジュールについて説明する．4章では本研究で提案する回転磁石マーカを用いたデバイス静止時の3次元位置推定手法について述べ，回転磁石が空間中に生み出す磁場の定式化と，磁場と3次元位置との関係の導出について説明する．さらに5章では本研究で提案するデバイス移動時の経路推定手法について述べ，移動しているデバイスが計測する磁場の定式化と，それを用いたデバイスの移動経路を推定する手法を導出する．最後に6章では本研究の動機と提案手法についてまとめ，目的とするスマートデバイスの高精度位置推定の実現に向けての今後の展開について述べる．

第2章 位置推定手法の研究動向

本論文の目的であるスマートデバイスの誤差 10 cm 以下での位置推定を実現するためには、既存の屋内位置推定手法の長所と短所を理解しておく必要がある。本章では既存手法を電波を用いる手法、超音波を用いる手法、PDR (Pedestrian Dead Reckoning) による手法、可視光を用いる手法、磁場を用いる手法の 5 つに分類し、それぞれの研究や応用例から近年における屋内位置推定手法の動向を示す。

2.1 電波を用いた位置推定

2.1.1 Wi-Fi アクセスポイントを用いた位置推定

この手法では主に Wi-Fi アクセスポイントが発する電波の強度をデバイスの位置推定に利用する。電波の強度は送信元からの伝搬距離に応じて減少する性質を持つため、デバイス側が受信した電波の強度からデバイスと Wi-Fi アクセスポイント間の距離を推定できる。この場合、最低でも 3 つの異なる Wi-Fi アクセスポイントから発信された電波を受信し、三点測量を用いてデバイスの位置を推定する。また Wi-Fi アクセスポイントによって建物やフロアごとに異なる電波強度の分布が生成されるため、あらかじめ計測した電波強度からそのフィンガープリントを作成し、位置推定時にデバイスが受信している電波強度と照らし合わせて位置推定する手法がある。これらの手法は既に Wi-Fi アクセスポイントが設置されている環境であれば新たに機器を設置する必要がなく、導入コストを抑えられる利点がある。

Zou らはフィンガープリント作成時のコスト削減と電波強度の時間的能な手な変化にも対応可法 [33] を提案し、誤差 3 m 以下でのデバイスの位置推定を達成している。また Zhuang らは効率的な電波強度のフィンガープリント作成のため、クラウドソーシングを利用した手法を提案している [34]。この手法ではフィンガープリントの更新が即座に反映されるために推定精度が向上し、平均誤差 6 m 以下でのデバイスの位置推定に成功したと述べている。また Cheng ら [44] や Alam ら [45] は Wi-Fi アクセスポイントによる電波強度のフィンガープリントを用いたデバイスの 3 次元位置推定手法を提案し、平均誤差 4~5 m での 3 次元位置推定を達成したと述べている。

これらの手法の課題として、床や壁などで反射した電波によって推定精度が影響を受けずく、また Wi-Fi アクセスポイントの設置状況が変化すればフィンガープリントを再び作成する必要が生じる点が挙げられる。本研究で想定しているスマートフォンのようなデバイスは手に所持したり、衣服に収納している場合も多く、遮蔽物の影響

によって推定精度が減少する手法は好ましくない。また上記で示したように、これらの手法ではデバイスの位置を誤差 1 m 以下で推定するのは難しく、目的とする誤差 10 cm 以下での位置推定が困難である。以上の理由から、Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法は今回の本論文での目的に適さないと考えられる。

2.1.2 BLE を用いた位置推定

この手法では Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法と同様に、BLE ビーコンが発する電波の強度を用いてデバイスと BLE ビーコン間の距離を推定する。推定時には最低三つの BLE ビーコンから発せられた電波の強度から受信機とそれぞれのビーコン間の距離を算出し、そこから三点測量で位置を推定する手法や、受信機への電波の入射角度を計測して BLE 発信側のデバイスの位置を推定する手法などがある。長所としては BLE ビーコンは比較的安価で低消費電力なため、他の手法と比べて低コストで運用可能な点が挙げられる。

Park らは BLE ビーコンを用いたデバイスの 3 次元位置推定手法 [35] を提案している。この手法では 4 つの BLE ビーコンを同一球面上に配置し、それぞれの BLE ビーコンが発する電波強度から球面内の BLE デバイスの 3 次元位置を推定する。また、Rida らは天井に BLE ビーコンを等間隔で配置してスマートフォンの 2 次元位置を推定する手法 [46] を提案している。この手法では天井に配置されたビーコンが 500 ms 間隔で信号を発信し、スマートフォンに電波強度が最も強く検知された BLE ビーコンを 3 つ選択して推定に利用する。実験の結果、精度 0.5~1 m でのスマートフォンの 2 次元位置推定を実現している。一方で、Ji らは BLE ビーコンの設置数と位置推定精度についての関係を研究し、100 m 四方の部屋に 5 m 間隔で BLE ビーコンを設置した場合、その推定誤差は 5 m 程度になると述べている [47]。

さらに、BLE ビーコンを用いた商用製品として Quuppa [10] が存在する。Quuppa ではスマートフォンのような BLE デバイスや、専用のタグから発せられた BLE 信号を部屋に設置された専用 Locator が検知し、その入射角度から BLE デバイスの位置を精度 0.1~1 m で推定する。1 つの Locator で BLE デバイスの 2 次元位置推定が可能で、2 つの Locator を使用すれば 3 次元位置推定が可能になる。

BLE を用いた手法の課題として、Wi-Fi アクセスポイントを用いた手法と同様に、床や壁などで反射した電波によって推定精度が影響を受けやすく、送信機と受信機のデバイスの間に遮蔽物が存在する場合は推定精度が著しく低下する点がある。また上記の既存研究が示すように、BLE ビーコンを用いる手法ではデバイスの位置を誤差 10 cm 以下で推定するのは難しく、本論文で目的とするスマートデバイスの高精度位置推定には適していないと考えられる。

2.1.3 UWB 無線システムを用いた位置推定

この手法では 500 MHz~ 数 GHz の周波数領域の電波を重ね合わせた短いパルス波を利用し、UWB の発信機から受信機への到達時刻や UWB 信号の入射角度から物体の 3 次元位置を推定する [36]. Wi-Fi アクセスポイントや BLE ビーコンによる手法とは異なり、パルス波を利用するため床や壁などで反射した他の電波の影響を受けにくく、また空間的な解像度が高いため推定精度が高くなる特徴がある。

Zhang らはタグが発する UWB 信号を周囲に設置した 4 個の受信機で受信し、UWB 信号の到達時刻の差を利用してタグの 3 次元位置を推定する手法 [48] を研究している。この研究では、タグからの距離 50 cm 以内で誤差 8 mm 以下の 3 次元位置推定を実現している。また商用製品として、Ubisense Real Time Location System [22] がある。この製品では工場や倉庫などの天井に 30~40 m の間隔でセンサを設置し、タグが発する UWB 信号を受信して誤差 10~50 cm のリアルタイム 3 次元位置推定を実現している。

これらの手法は誤差 10 cm 程度の高精度な屋内位置推定が可能である一方、建物内の天井に一定間隔でセンサを設置したり、位置を推定したい物体に専用のタグを取り付ける必要があるため、本論文の目的であるスマートフォンのような一般消費者向けのデバイスの高精度位置推定には不向きである。また UWB を用いた手法では、Wi-Fi アクセスポイントや BLE ビーコンを用いた手法と同様に、受信機と発信機との間に遮蔽物が存在する際の推定精度が大きく低下する問題がある。そのため、UWB を用いた位置推定の導入事例は車の組み立て工場や倉庫管理などが多く、スマートフォンのようなデバイスへの導入事例は限定的である [49]。一方で、2019 年 9 月に Apple 社が iPhone 11 への UWB 無線システムの搭載を発表し、さらに 2020 年 9 月には Apple Watch Series 6 にも同様に UWB 無線システムの搭載を発表したため、今後 UWB を利用したスマートデバイスの高精度位置推定が普及すると予想される。しかし、デバイス間の UWB 通信では互いの相対的な位置推定のみであるため、建物内での絶対位置の推定には別の機材を設置する必要が生じると考えられる。

これまで見てきたように、電波を用いた位置推定手法には Wi-Fi アクセスポイントや BLE ビーコン、UWB 無線システムを用いるものがある。Wi-Fi アクセスポイントや BLE ビーコンを用いた位置推定手法では、送信機から数 10 m 以内にあるデバイスの位置推定が可能だが、その推定精度を誤差 1 m 以下に抑えるのが難しいため、本論文の目的とする推定精度を満たすのは困難である。一方、UWB 無線システムを利用する手法では誤差 10~50 cm の位置推定が可能だが、UWB 信号の送受信には専用のデバイスの所持が必要であるため、一般消費者向けのデバイスに搭載されているセンサは利用できない。またこれらの手法に共通する課題として、推定に用いる電波は遮蔽物の影響を受けやすく、また床や壁で反射した他の電波の影響を受けるために精度が低下しやすい点がある。以上の理由から、電波を用いた位置推定手法は一般消費者向けのスマートデバイスの位置を誤差 10 cm 以下で推定するという本論文での目的に適していないと考えられる。

2.2 超音波を用いた位置推定

この手法では最低三台のスピーカーを環境内に設置し、スピーカーが発した超音波がデバイスに到達するまでの時刻を利用して三点測量によって位置を推定する手法や、二台のスピーカーからの超音波の到達時刻の差を利用する手法が多い [21]. 超音波を用いた手法は前述の電波を用いた手法と比較して推定精度が高い傾向があり、誤差 10 cm 以下の精度でデバイスの位置推定が可能である. この手法では超音波を利用するため、受信側のデバイスにはスマートフォンのようにマイクが搭載されている必要がある.

中村らは4台のスピーカーを用いてスマートフォンの3次元位置を誤差 2.8 cm 以内で推定 [37] している. また Angelis らは遮蔽物や超音波の反射による推定精度の低下を避けるため、移動可能な超音波ビーコンを利用した位置推定システム [50] を提案し、超音波ビーコンから 4 m までの距離でデバイスの位置を精度 1 cm 以下で推定している. また Medina らは超音波ビーコンを4つ用いた3次元位置推定手法 [51] を提案している. この研究では専用の受信機を開発し、部屋の天井の4隅に設置した超音波ビーコンを用いて受信機の3次元位置を平均誤差 18 mm 以下の精度で推定している.

以上の既存研究から分かるように、超音波は指向性を持つために電波を用いた手法と比べて推定精度が高い傾向があり、スピーカーと受信側のデバイスとの距離が 5 m 以内の場合、誤差 1 cm でのデバイスの3次元位置推定を実現する. その一方で、電波を用いた手法と同様に遮蔽物や壁などで反射した超音波によって推定精度が低下しやすく、その推定精度を維持するにはスピーカーとデバイス間に見通し線を確保する必要がある. そのためデバイス所持者が衣服にデバイスを収納している場合や、混雑している状況では推定精度の維持が難しく、利用可能な環境が限定される.

2.3 PDR を用いた推定

PDR とはデバイスに搭載されている加速度センサや角速度センサが取得したデータから、デバイス所持者の歩行や向きの変化を検出して移動経路を推定する手法である. この手法では環境に他の機材を設置する必要がなく、デバイスの所持のみで移動経路が推定可能な利点がある. また、加速度や角速度センサは既に多くのスマートフォンやスマートウォッチなどのデバイスに搭載されているため、利用者が専用デバイスを所持する必要がない.

H.Zhao らは人間の歩行を6段階に分割して力学的にモデル化し、磁気、加速度と角速度のデータからスマートフォンの姿勢と移動経路を推定する手法を提案している [52]. この研究では評価実験で 92 m の長さの閉経路を歩いた際、最終位置を誤差 1 m 以下の精度で推定している. また Gu らは加速度と角速度データに深層学習を用いて、歩き方やスマートフォンの持ち方が異なるそれぞれ異なるユーザに対しても対応可能な歩幅推定手法を提案した [38]. また GiPStech 社 [14] は加速度と角速度の他に建物内の磁場のフィンガープリントを用いて移動経路を推定するアプリを提供して

おり、2019年2月には国土交通省の指導の元で行われた実験で、新宿駅構内を誤差1m以下での推定に成功したと発表した。

これらの手法の課題として、一步ごとの距離推定の誤差や角速度センサのドリフト誤差の蓄積によって、デバイス所持者の移動距離が長いほど推定誤差が大きくなりやすい点がある。またデバイスの向きから進行方向を推定するため、体の向きと進行方向が異なる移動、例えばカニ歩きのような移動は正しく推定できない。さらに、推定する移動経路は初期位置からの相対的な移動経路であるため、絶対的な移動経路を推定するには他の手法と組み合わせて初期位置を知る必要がある。

PDRはスマートフォンで利用可能な手法が多く提案されており、他のスマートデバイスに搭載されている安価なセンサでも利用可能だが、いくつかの点で本研究の目的には適していない。まず屋内をデバイスが移動する際、PDR単独では推定誤差を10cm以下に抑えるのが難しい。また、1.2.1節で述べたようなワイヤレス給電に利用するには、一定時間屋内にデバイスが滞在している状況が想定されるが、移動に伴う相対位置の変化を取得するPDRでは、数日以上にわたって屋内に存在するデバイスの位置推定には向いていない。

2.4 可視光を用いた位置推定

可視光を用いたVLP (Visual Light Positioning) と呼ばれる位置推定手法では、カメラに写ったLEDライトとの位置関係からカメラの3次元位置を推定するもので、カメラが搭載されているデバイスで利用可能な手法である。室内に設置されているLEDライトの位置を既知とすれば、室内でのデバイスの3次元位置や姿勢を高精度で推定可能である。この手法のメリットとして、電波や超音波を用いた手法と異なり、床や壁で反射された他の信号による推定精度への影響が少なく、誤差10cm以下の高精度位置推定が実現可能な点がある。

Kumakiらは4つのLEDライトを用いたスマートフォンの3次元位置と姿勢を推定する手法[39]を提案し、平均誤差43mm以下、標準偏差3.11mm以下での3次元位置推定と、平均誤差2°以下、標準偏差1°以下での姿勢推定を実現している。また、Zhangらはカメラに写された丸形のLEDライト1個からスマートフォンの3次元位置を推定する手法[40]を提案し、3×3mの室内で誤差数cmの3次元位置推定を実現している。

これらの手法ではカメラが搭載されているデバイスで誤差10cm以下の3次元位置推定を実現するが、スマートフォンのようなデバイスは衣服内に収納している状態が多いため、本研究の目的には不向きであると考えられる。また、スマートウォッチのようにカメラが搭載されていないデバイスでは利用できない点や、LEDライトとカメラとの間に遮蔽物が存在する場合は利用できない点から、利用可能な状況は限定的である。

2.5 磁場を用いた位置推定

磁場を用いた手法には時間に対して強さが一定の静的磁場を用いる手法と、時間に対して強さが周期的に変化する動的磁場を用いる手法に分けられる。磁場を用いた手法のメリットとして次の2点が挙げられる。1つ目は金属以外の遮蔽物からの影響が少ないことである。磁場は人間や衣服などの遮蔽物の影響をほとんど受けずに伝播する。そのため電波や超音波を用いた手法と異なり、送信機とデバイスとの間に見通し線を確保する必要がなく、例えば人が密集した環境でも利用可能である。2つ目はマルチパスの影響を受けないことである。磁場は電波や超音波のように遮蔽物によって反射や回折が発生しないため、建物の構造から生じるマルチパスの影響を考慮する必要がない。これらの性質から、磁場を用いた手法は電波や超音波を用いた手法と比較してロバストな手法であると言える。

2.5.1 静的磁場を用いた位置推定

これらの手法では磁場のフィンガープリントを作成して推定に利用する手法と、屋内の特定の場所に設置した磁石が生み出す磁場を利用する手法がある。前者の手法では、あらかじめ屋内での磁場のフィンガープリントを作成し、推定時にデバイスが計測している磁場とパターンマッチングして位置を推定する。後者の手法では、磁石が発する磁場は磁石からの距離に反比例して減少するため、計測した磁場の強さから特定の場所に設置した磁石からの距離を推定する。

Murataらは建造物を構成する鉄骨に含まれる磁場からフィンガープリントを作成して推定に利用する手法 [41] を提案している。この手法ではスマートフォン所持者が歩行しながら磁場のデータを収集し、フィンガープリントを作成して推定に利用できる。被験者44名のデータを元に推定した結果、平均誤差13.7mの精度で推定可能であったと述べている。またSchlageterらはホールセンサを用いて磁石の3次元位置を推定する手法 [53] を提案している。この手法では16個のホールセンサを2次元的に配置し、直径6×7mmの円柱磁石の3次元位置の推定を可能にする。評価実験では、被験者の体内に入れた磁石の3次元位置を腹部から20cmの距離で推定したことを報告している。商用製品として、IndoorAtlas [13] が存在する。この製品は位置推定に地磁気を利用しており、誤差1~2mでスマートフォンの2次元位置推定が可能である。またスマートフォンを利用したクラウドソーシングによってフィンガープリントを作成するコストを軽減し、環境の変化にも対応できるようにしている。

これらの関連研究が示すように、静的磁場を用いた手法は遮蔽物の影響を受けにくい衣服内のデバイスでも位置推定が可能だが、一方で推定精度を誤差10cm以下に抑えるのは難しく、本論文の目的とする推定精度を満たせない。さらに磁場のフィンガープリントを作成して推定に用いる場合、屋内環境が変化した際に新たに磁場のフィンガープリントを作成する必要が生じる。また磁石を用いる手法では、地磁気や他の電子機器が発する磁場の影響下では磁石が発生させた磁場との判別が難しく、利用可能な環境が外部からの磁場を遮断した特殊な場合に限定される。

2.5.2 動的磁場を用いた位置推定

動的磁場を用いた手法では環境内に特定の周波数を持った磁場を発生させ、デバイスがその磁場を計測し、その計測した動的磁場の振幅からデバイスの位置を推定する。動的磁場を用いた手法では静的磁場を用いた手法と同様に遮蔽物の影響を受けにくく、また他の手法と比較して高い精度の推定が可能である。さらに、計測した磁場からフーリエ変換によって、発生させた周波数の動的磁場のみを抽出できるため、静的磁場を用いた手法とは異なり、地磁気や電化製品、建物などの環境磁場の影響を受けにくい利点がある。

Paperno らは動的磁場を利用した位置推定手法 [54] の基礎的な検討をしている。この研究では、回転するコイルに電流を流して発生する動的磁場と3次元位置との関係を理論的に明らかにした。Hu らは発生する動的磁場を利用した位置推定手法 [55] を提案している。この手法では、3つのコイルを直交するように配置し、それぞれ異なる周波数の動的磁場を発生させ、磁気センサがその異なる周波数の動的磁場を検知し、磁気センサの3次元位置と姿勢を推定している。磁場を発信するコイルと受信するコイルには長さ3 cmのコイルに1600回銅線を巻き付けたものを使用し、縦500 mm、横400 mm、高さ400 mmの3次元空間内で平均誤差1 mm以下、姿勢推定に関しては平均誤差1°以下の推定精度を達成したと述べている。Pirkl らは動的磁気を用いた3次元位置推定手法 [42] を提案している。この研究では、1辺が16 cmの立方体にコイルを巻きつけて交流電流を流して動的磁場を発生させ、1辺が2 cmの受信機の3次元位置を推定している。4つの送信機を使用して4 mまでの距離でランダムに3次元位置を推定した結果、送信機を1つ使用時は平均誤差44 cm、4つ使用時は平均誤差4 cmの精度を実現している。

また、Pirkl らは動的磁場を用いたスマートフォン、スマートウォッチの接近検知手法 [43] を提案している。この研究では、40×30 cmの20巻きのコイルをドアや本棚など、部屋の様々な場所に配置し、スマートフォンなどのデバイスが30~50 cmの距離に接近した時に検知する手法を検討している。この手法ではスマートフォンなどの端末が検知可能な磁場を利用するため、150 msごとに磁気パルスを発生させている。実験の結果、90%以上の確率での接近検知に成功している。Blankenbach [56] らは建物内に3個のコイルを配置し、それぞれのコイルが発する磁場の強度からスマートフォンの2次元、および3次元位置を推定する研究をしている。この研究では、コイルに流す電流は直流電流であるが、数秒おきに電流の向きを反転させて環境磁場による影響を抑えている。iPhone4での実験の結果、2次元推定は縦7 m、横7 mの範囲でx座標52 cm以下、y座標76 cm以下の誤差であった。また、3次元推定の精度は縦7 m、横7 m、高さ3 mの範囲でx,y座標の誤差20 cm以下、z座標の誤差150 cm以下であった。

Moschitta らは空間にコイルを配置し、1個のコイルの3次元位置と姿勢を推定する研究 [57] をしている。この研究では、1辺が1.5 mのxy平面に縦に7個、横に4個のコイルを配置した場合と、1辺が1.2 mのxy, yz, xz平面に縦に3個、横に3個のコイルを配置した場合に関して、コイルが2 m以内の距離にある場合の推定精度をNelder-Mead法を用いてシミュレーションしている。その結果、距離推定の誤差1 cm

以内、姿勢推定の誤差 1° になる確率が、前者の場合は0.6、後者の場合は0.7以上であることを示した。Linらは1軸コイルが生み出す磁場と、3軸直交コイルが生み出す磁場を理論的に検討し、3軸直交コイル1個を用いた3軸磁気センサの3次元位置と姿勢推定手法、3軸直交コイル2個を用いた1軸磁気センサの3次元位置とz軸回りの姿勢推定手法を提案している [58]。発信側コイルの半径17.5 cm、受信側コイルの直径2.5 cmでの実験の結果、距離700 mm以下で、3軸磁気センサでは誤差12 mm以下の3次元位置推定、誤差 14° の姿勢推定、1軸磁気センサでは誤差13 cmの3次元位置推定、誤差 15° の姿勢推定を実現している。

また動的磁場を用いた位置推定の商用製品として、POLHEMUS [19]が存在する。この製品では使用者が専用器具を装着して専用の磁場発生装置による磁場を計測して、モーションキャプチャーのようなリアルタイム3次元トラッキングを可能にし、磁場発生装置から3 m以内の距離で1 cm以下の精度を実現している。その他の商用製品として、Q-TRACK [20]が存在する。この製品では専用のタグが使用者が装着し、環境内に設置した受信機でタグが発する磁場を受信して使用者のリアルタイム位置推定を可能にする。主に倉庫や工場での作業効率化などに利用され、受信機から最大25 mの範囲で平均二乗誤差40 cmの精度を実現している。

以上の関連研究から分かるように、既存の動的磁場を用いた手法では誤差10 cm以下の3次元位置推定が可能で、さらに電波や超音波を用いる手法と比較して遮蔽物の影響を受けにくい利点がある。一方で、これらの既存手法をスマートデバイスに搭載されている安価な磁気センサでは利用できない。なぜならコイルから数 m離れた距離で、安価な磁気センサでも計測可能な動的磁場を発生させるには、100 kW以上の消費電力が必要になり、一般的な屋内環境での電力供給ができない。また長時間の利用では、発熱によってコイルが溶け出す恐れがあり、冷却材を用意する必要がある。消費電力を抑えるためにコイルを大型化する方法もあるが、その場合コイルの直径が1 m以上になってしまうため、一般的な屋内への設置が難しくなる。そのため、動的磁場を用いた位置推定手法の利用は工場や倉庫、病院などに限定されている。

2.5.3 回転磁石マーカを用いた位置推定

動的磁場を用いた位置推定をスマートフォンで実現するために回転磁石マーカによる手法が提案されている。回転磁石マーカとは磁石を一定の速度で回転させ、最大10 Hz程度の周波数の動的磁場を発生させる装置である。この装置のメリットは磁場の発生に磁石を用いているため、コイルに電流を流す手法と比較して磁場の発生コストを抑えられ、数時間の使用が想定される場面での動的磁場の発生に利用できる。

武島らは回転磁石マーカを用いたスマートフォン所有者の通過検出 [59]を研究している。この研究では、2つの回転磁石マーカを用いてスマートフォン所有者の通過検出と通過方向の検出手法を提案し、磁石の回転速度をそれぞれ6 Hzと4 Hzに設定した2つの回転磁石マーカを60 cm離して設置し、歩行者との距離を75 cm、歩行速度1.2 m/sの条件で通過方向検出率83%を達成したと述べている。また武島らはこの

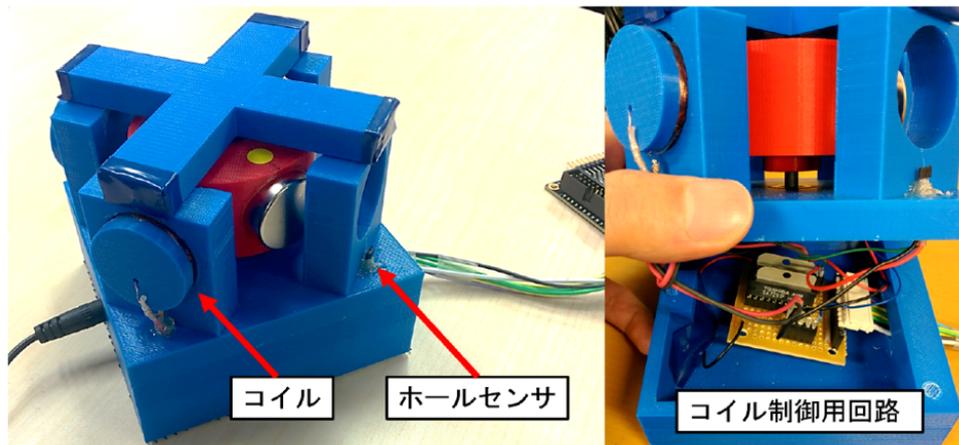


図 2.1: 武島らが開発した回転磁石マーカ

研究の中で、回転磁石マーカに使用する磁石の適切な強さについて議論している、歩行者が回転磁石マーカに近づく最大距離を 15 cm と想定し、磁気カードに影響を与えない動的磁場の強さが 16~30 mT であることから、15 cm 離れた距離での磁場の強さが 16 mT を超えないような磁石を選定している。

また、武島らは回転磁石マーカを用いた位置推定手法 [60] を研究している。図 2.1 は武島らが開発した回転磁石マーカである。この回転磁石マーカでは磁石の周囲に 2 つのホールセンサを設置し、回転に伴う磁場の変化を計測可能である。それぞれのホールセンサが計測した磁場に対して閾値を設定し、その閾値をもとに磁石の回転角度を 8 方向で区別している。また、磁石の周りにコイルを設置し、コイルに流す電流の向きを制御して磁石を回転させる。この回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 2 次元位置推定の結果、磁石の回転速度 6 Hz、スマートフォンと回転磁石マーカ間の距離 2 m で、距離は平均誤差 13 cm 以下、方位角は平均誤差 24° での推定を達成したと述べている。

2.6 スマートデバイスでの高精度位置推定の課題

本章では屋内位置推定の既存手法や研究例をいくつか述べてきたが、それぞれの手法ごとに長所と短所があり、どの手法を利用するかは目的に応じて判断する必要がある。Wi-Fi アクセスポイントや BLE ビーコンを用いた手法は、他の手法と比べてコストを抑えられる利点があり、周りに遮蔽物がない環境で誤差 1 m 程度の位置情報で十分な場面では有効である。しかし本研究の目的である誤差 1 m 以下の精度の位置情報が必要な場合には適していない。

2.1 節~2.5 節で示した手法の中で誤差 10 cm 以下の位置推定が可能な手法は UWB 無線システムを用いた手法、超音波を用いた手法と動的磁場を用いた手法であった。超音波を用いた手法は誤差 10 cm 程度の位置推定が可能だが、遮蔽物の影響で推定精度が低下する傾向があり、手に所持していたり衣服内に収納している場合が多いス

スマートデバイスの位置推定には適さない。また UWB 無線システムを用いた手法では推定したいデバイスが専用のタグを搭載している必要があるため、工場や倉庫などでは利用可能だが、スマートフォンのような一般的なデバイスでの利用はできない。UWB 無線システムを搭載した iPhone 11 の普及によって、スマートフォンでも UWB を利用した位置推定手法の普及が期待されるが、この場合の位置推定はスマートフォン間の相対的な位置推定である点、また超音波を用いた手法と同様に遮蔽物の影響を受けやすい点から、本論文での目的には適していないと考えられる。

動的磁場を用いた手法は他の手法と比較して遮蔽物の影響を受けにくい利点を持ち、精度 1 mm 程度の位置推定が可能のため、モーションキャプチャや医療分野など、特定の領域で高精度な位置情報が必要な場面では有効な手法である。しかし、既存の動的磁場を用いた位置推定手法をスマートデバイスに対しては利用できない。なぜなら、コイルから 1 m 以上離れた場所にスマートデバイスが計測可能な磁場を発生させるには 100 kW 以上の電力が必要になり、一般的な屋内環境で供給可能な電力量を上回るためである。また、磁場の発生に伴って生じる熱によってコイルが溶解する恐れがあり、長時間の利用には冷却材が必要になるため、一般的な屋内環境での長時間の利用が難しい。

既存の回転磁石マーカを用いた位置推定手法では、動的磁場の発生に伴う消費電力と熱の課題を解決したが、一方でスマートデバイスの高精度位置推定を実現するにはいくつかの課題があった。一つ目はデバイスが回転磁石マーカと同一平面上にある時に限定される 2 次元位置推定手法である点、二つ目は回転磁石マーカが 8 方向の方位角しか区別できず、また磁気的なノイズの影響によって推定精度が不十分な点である。

これらの課題を解決するために本研究では新たに回転磁石マーカを開発し、スマートフォンのようなデバイスに搭載された安価な磁気センサでも利用可能な動的磁場による位置推定手法を提案する。次の 3 章では、スマートデバイスの高精度位置推定を実現するために回転磁石マーカに要求される機能とその開発について説明する。その次の 4 章では、スマートデバイスの 3 次元位置推定を実現するための手法の提案と、その評価実験について説明する。さらに次の 5 章では、スマートデバイスが移動している際の課題と、その課題解決のための移動経路推定手法、その評価実験について説明する。最後に 6 章では、本研究の動機と提案手法についてまとめ、本論文での提案手法の今後の展開について述べる。

2.7 本章のまとめ

本章で述べたように、デバイスの位置推定手法には電波を利用する手法や超音波を利用する手法、磁場を利用する手法などがあり、それぞれコストや推定精度、遮蔽物に対する影響などの点でメリットとデメリットがある。電波を用いる手法や超音波を用いる手法のデメリットとして、遮蔽物の影響によって推定精度が低下する点がある。スマートフォンのようなデバイスは衣服やカバンに収納している場合が多いため、これらの手法は本研究で想定している高精度位置推定に対しては不向きである。

一方で2.5.2節で述べたように、既存手法で最も遮蔽物の影響を受けにくく、高い位置推定精度を実現可能な手法として動的磁場を用いた手法がある。これらの手法では動的磁場の発生装置を環境内に設置し、発生させた動的磁場を利用してユーザーが装着した専用デバイスの位置を誤差10cm以下の精度で推定する。

しかし、既存手法では動的磁場の発生にコイルを用いるため、スマートデバイスの磁気センサで規則還付な動的磁場の発生に大きな電力を必要とする。電力を抑えるにはコイルのサイズを大きくするか、巻き数を増やす必要があるが、その場合一般的な屋内への設置が困難になる。そこで本研究では強力な磁石を回転させて動的磁場を発生させる回転磁石マーカを開発し、スマートデバイスに搭載されている磁気センサでも利用可能な高精度位置推定手法を提案する。

第3章 スマートデバイスの高精度位置推定を実現するための回転磁石マーカの開発

本章では、本研究で提案する位置推定手法のために開発した回転磁石マーカについて説明する。これまでの研究で既にいくつかの回転磁石マーカが開発されているが、本研究での提案手法を実現するには、磁石の回転角の制御や取得、角度データを他の端末に送信する機能などを搭載した回転磁石マーカを新たに開発する必要がある。ここでは、最初に新たな回転磁石マーカを開発するための設計を示し、次にその実装、最後に実用に向けての検討について説明する。

3.1 既存の回転磁石マーカを用いたスマートデバイス位置推定の課題

2章で述べたように、既存の動的磁場を用いた位置推定手法では磁場の強さを維持するために1kHz以上の動的磁場を用いているため、スマートデバイスに搭載されている磁気センサのサンプリング周波数では利用できない課題があった。動的磁場の周波数を下げるには磁場を発生させるコイルの直径を大きくする、もしくは巻き数を増やす必要があるが、その場合コイルの直径が10cm以上になるため、屋内への設置には不向きであった。

武島らはこの問題を解決するために回転磁石マーカを開発した。この装置ではネオジム磁石を回転させて動的磁場を発生させるため、動的磁場の周波数を10Hz以下に抑えつつ、既存手法とほぼ同じ強さの磁場の発生が可能である。また2章で見たように、武島らはさらに回転磁石マーカを用いた通過検出と2次元位置推定手法を提案した。

武島らが開発した回転磁石マーカはスマートフォンの2次元位置を1m離れた距離で誤差10cm程度で推定したが、一方でスマートデバイスの誤差10cm程度の高精度な位置推定には不向きである。なぜなら、既存の回転磁石マーカでは磁石の回転角を8方向しか区別できないため、次節で述べるように1m以上離れた距離にあるデバイスの方位角を推定する際に誤差10cm以上の誤差が発生するからである。また高精度な位置推定の実現には、磁石の回転角の情報とスマートフォンのセンサデータを利用

するため、それらのデータを共有する仕組みが必要である。

本論文では回転磁石マーカを用いたスマートデバイスの高精度位置推定を実現するため、取得可能な磁石の回転角の粒度を向上し、さらに磁石の回転角データを他のデバイスと共有可能にする仕組みを実装する。磁石の回転角の粒度が向上すれば、回転磁石マーカからの距離が離れた際に生じる推定精度の低下を抑えられる。また磁石の回転角データとスマートフォンのセンサデータが共有可能になれば、スマートフォンがある時刻で計測した磁気とその時刻での回転磁石の角度の関係を推定に利用できる。

3.2 回転磁石マーカの設計

3.2.1 磁石の回転機構に用いるモータの選定

本論文の目的とする距離 3 m での誤差 10 cm 以下の 3 次元位置推定を実現するために必要な方位角の粒度を決定する。例えば、回転磁石マーカからの距離が 3 m 離れたデバイスの位置を推定する際、取得可能な磁石の方位角の粒度が 10° であれば、 $1 \text{ m} * \tan(5^\circ) \approx 53 \text{ cm}$ の誤差が生じる。そこで今回は以下のように方位角の粒度を決定した。まず、満たすべき方位角の粒度を θ_{gran} とすると以下の不等式が成り立つ、

$$3 \text{ m} * \tan(\theta_{gran}/2) \leq 10 \text{ cm} \quad (3.1)$$

次に、この不等式を整理すると、

$$\theta_{gran} \leq 2 * \arctan(1/30) \quad (3.2)$$

すると満たすべき θ_{gran} は、

$$\theta_{gran} \leq 3.8^\circ \quad (3.3)$$

となる。

上記で示した粒度の方位角を取得するには、以前に開発された回転磁石マーカでは不十分である。なぜなら以前の研究で開発した回転磁石マーカでは、回転する磁石の周囲に 8 個のホールセンサを設置し、ホールセンサで計測した磁場の強さがピークに到達した時刻に磁石がそのホールセンサを設置した角度に到達したと判定していた。この手法では 8 方向の方位角を取得していたため、方位角の粒度が 45° であった。配置するホールセンサの数を増やせば取得可能な磁石の回転角の粒度は向上するが、上記で示した粒度の方位角を取得するためには、磁石の周囲に最低 100 個のホールセンサを設置する必要があるため現実的ではない。また、ホールセンサを磁石の周囲に 1 cm 間隔で配置すると、円周 100 cm、つまり直径がおよそ 30 cm の回転磁石マーカになってしまうため、屋内環境で設置するには大型になってしまう。

上記で示した粒度の方位角を取得できるモータとして、本論文ではモータ自身が角度情報を取得可能なステッピングモータを採用する。現在様々な種類のモータが存在しているが、回転磁石マーカに用いるモータとして適しているのは、取得可能な回転

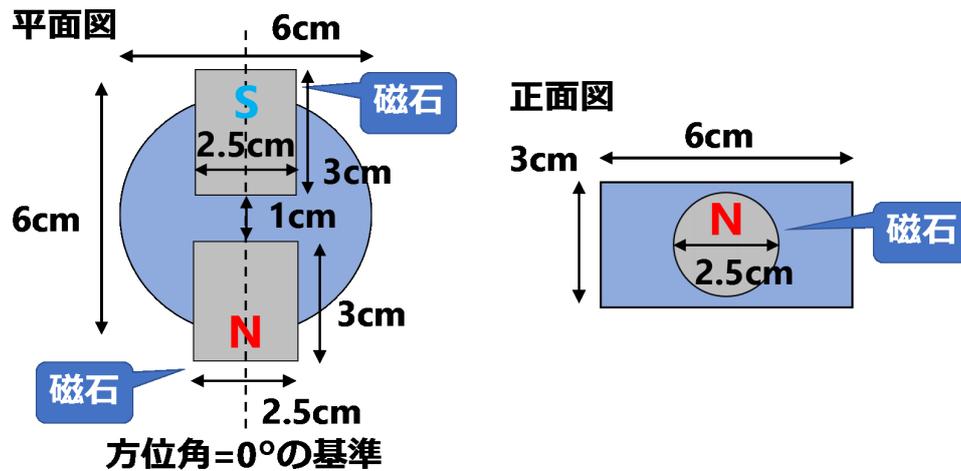


図 3.1: 磁石の装着台の平面図と正面図

角の粒度が細かいこと、回転数の制御が容易であること、機械的な摩耗が少ないことなどが挙げられる。ステッピングモータは回転軸の周りに設置されているコイルにパルス信号を流してモータを回転させるため、他のモータと比較して回転角の位置決めが容易で、取得できる角度の粒度も他のモータよりも細かい特徴がある。またブラシレスであるため、機械的な摩耗が DC ブラシモータと比較して少なく、他のモータと比較して長期間の使用に適していると考えられる。

3.2.2 磁場の発生に用いる磁石の選定

想定するサービスの実現に必要な推定可能範囲から、回転磁石マーカに使用する磁石の強さを決定する。例えば、1.2.1 節で述べたワイヤレス給電伝送には数 cm 離れたデバイスの給電に利用される磁場や電場を用いた非放射型手法と、数 m 離れたデバイスへの給電を可能にするマイクロ波や超音波を用いた放射型手法がある。今回は放射型のワイヤレス電力伝送に要求される距離数 m の範囲で誤差 10 cm のワイヤレス給電伝送を想定する。この時、磁石からの距離 5 m で $100\ \mu\text{T}$ 、もしくは距離 1 m で $100\ \mu\text{T}$ 以下の磁場の強さを満たすように磁石を選定する。以上の強さを満たす磁石としてネオジム磁石を選択し、保磁力 10000~10500 Oe、残留磁束密度 14300~14800 G のもの [61] を用いた。この磁石の中心軸上の表面磁束密度は 6400 G である。

モータの回転軸に磁石を直接装着するのは設置面積や安定性の観点から困難であるため、モータの軸に磁石を固定するための台を作成する。前述したように、今回は直径 2.5 cm、高さ 3 cm の円柱型磁石を使用するため、磁石の大きさに合わせて装着台の形状を決定する。図 3.1 に磁石の装着台の平面図と正面図を示す。装着台は直径 6 cm、高さ 3 cm の円柱型で、2 個の磁石を中心軸を挟んで 1 cm 離れた位置で N 極と S 極が外を向くように配置する。

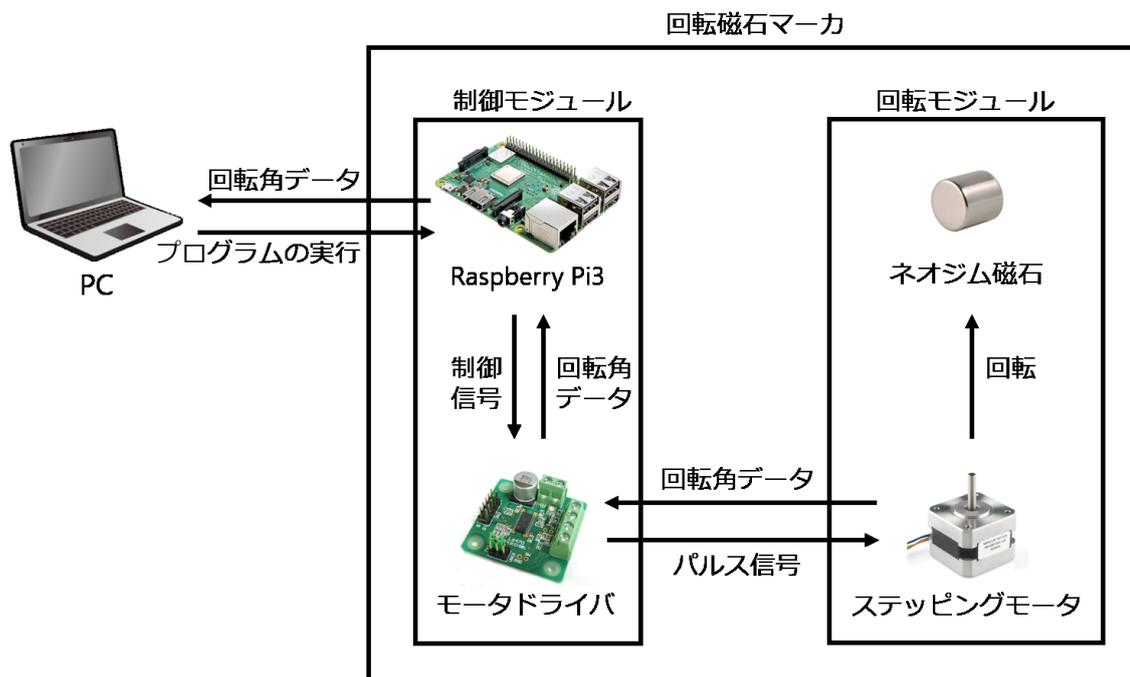


図 3.2: 回転磁石マーカのシステム図

3.3 回転磁石マーカの実装

図 3.2 に本章で開発した回転磁石マーカのシステム図を示す。前述のように，回転磁石マーカは制御モジュールと磁石の回転モジュールから構成され，制御モジュールはさらに Raspberri Pi3 とモータドライバ，回転モジュールは磁石と磁石を回転させるモータから構成される。制御モジュールでは PC から ssh によって Raspberri Pi3 に信号を送り，Raspberri Pi3 からモータドライバを通してモータの回転を制御する。モータの回転角データはモータドライバから Raspberri Pi3 を通して ssh によって PC に送信される。

3.3.1 磁石の回転モジュール

回転磁石マーカの回転モジュールに使用するモータとしてステッピングモータである MERCURY MOTOR SM-42BYG011-25 を採用した。このモータのステッピング角は 3.6° であるため 100 方向の方位角の取得が可能で，3 m 離れた距離で想定される最大の誤差は $3 \text{ m} * \tan(1.8^\circ) \approx 9 \text{ cm}$ となり，式 (3.3) で示した条件を満たす。さらにステッピング角が細かいモータも存在するが，今回は条件 3.3 を満たすモータの中で最もコストが安いモータを選択した。

ステッピングモータには実際の回転角とデータ上の回転角がずれる脱調と呼ばれる現象が発生し，磁石の回転数が早ければ早いほど脱調が大きくなる。後で述べるように，方位角推定にはモータの回転角を利用するため，脱調が起きると方位角の推定精

度に影響を及ぼす。今回使用するステッピングモータについて調べた結果、磁石の回転数が1Hzであれば、1分程度回転させても脱調はほとんど見られなかったため、磁石の回転数を1Hzとすれば、方位角の推定精度に影響はないものとした。

ステッピングモータに3.2.2節で選定したネオジム磁石を装着するため、同じく3.2.2節で設計した装着台を作成してモータの回転軸に取り付ける。磁石の装着台の形状データを3Dモデリングソフトblenderで作成し、そのモデリングデータを3Dプリンタで出力して作成した。次に装着台のくぼみに前節で述べたネオジム磁石をはめ込み、ボルトとネジを用いてモータの回転軸に装着台を固定した。

3.3.2 モータの制御モジュール

回転磁石マーカのモータを制御するためのデバイスとして、Raspberry Pi3 [62] をモータドライバに接続する。モータの制御デバイスとしてArduinoやM5Stackなどが他の候補として挙げられるが、Raspberry Pi3を選んだ理由は、microSDをカードスロットに挿入すれば磁石の回転角を保存するためのストレージとして利用可能な点、外部デバイスと通信するためのWi-Fiモジュールが内蔵されている点、linux上でのプログラムを実行によってモータドライバを通してステッピングモータの回転の制御が可能である点が採用の理由である。

他のデバイスから回転磁石マーカを制御可能にするため、モータドライバと接続したRaspberry Pi3を外部デバイスに遠隔接続する。Raspberry Pi3にはWi-Fiモジュールが内蔵されているため、外部デバイスとのssh接続が可能である。外部デバイスと接続したRaspberry Pi3を介して磁石の回転角速度の制御や、磁石の回転角データを外部デバイスに送信可能になる。まず、磁石の回転角データをステッピングモータに接続したモータドライバからRaspberry Pi3のストレージに送信する。次に磁石を指定した回転数で回転させるため、プログラムを作成してRaspberry Pi3上で実行する。すると、モータドライバからステッピングモータを回転させるためのパルス信号が伝達する。それから、磁石が回転を始めてから停止した時刻までの回転角データをcsv形式の時系列データとして出力してRaspberry Pi3に記録する。そして、Wi-Fiに接続したRaspberry Pi3から磁石の回転角データをssh通信によって他のデバイスに送信する。また本提案手法では、磁石の回転角とスマートフォンのセンサデータの時刻同期の精度が位置推定の精度に影響を与える。そのため、他のデバイスと時刻同期するためにRaspberry Pi3の設定からNTP (Network Time Protocol) と時刻同期する。

図3.3に本章で開発した回転磁石マーカの外観を示す。3.3.1節で説明した磁石の装着台によってモータの回転軸に磁石が固定されている様子が分かる。また画像中央のモジュールがモータドライバで、画像左の透明なプラスチックケースに収納されているモジュールがRaspberry Pi3である。ここで3.3.2節で説明したように、モータがモータドライバとRaspberry Pi3に接続されており、Raspberry Pi3からモータドライバを通して磁石が固定されたステッピングモータを制御する。

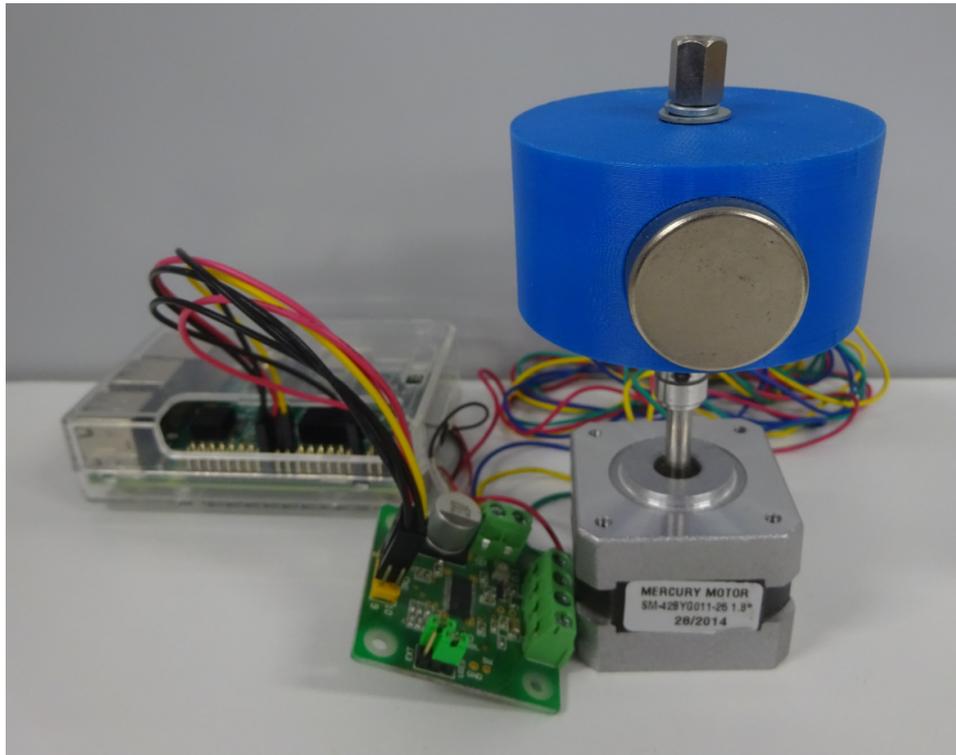


図 3.3: 本研究で開発した回転磁石マーカ

3.3.3 コイルを用いた手法との比較

コイルを用いて磁場を発生させる場合、発生する磁場はコイルの大きさや巻き数、鉄心の透磁率、コイルに印加する電圧に依存する。例えば 2.5.2 節で紹介した Pirkl らの研究では、40 cm×30 cm の 20 巻きコイルに 15 V の電圧を印加して約 4 A の電流を生じさせ、距離 45 cm 離れた距離に地磁気とほぼ同じ 40~50 μT の磁場を発生させており、この時の消費電力は約 60 W である。

一方で回転磁石マーカで動的磁場を発生させる場合、磁場の発生に必要な電力は磁石を回転させるモータの電力のみとなる。磁石を回転させるために 3.3.1 節で導入したステッピングモータ MERCURY MOTOR SM-42BYG011-25 は入力定格電圧 12 V、定格電流 0.33 A でその消費電力は約 4 W であり、コイルを用いて動的磁場を発生させる手法と比べて低消費電力である。さらに磁場の発生に磁石を利用するため、より強力な磁場の発生にさらなる電圧を印加する必要がない。

3.4 実用に向けての取り組み

回転磁石マーカを用いたスマートフォンの 3 次元位置推定手法の実用に向けて、株式会社 NTT ドコモと共同で回転磁石マーカをのプロトタイプを開発した。図 3.4 (左) にその回転磁石マーカを示す。この回転磁石マーカは Bluetooth を用いてスマートフォンと通信可能で、一定間隔でスマートフォンとの時刻同期や、磁石の回転角データの

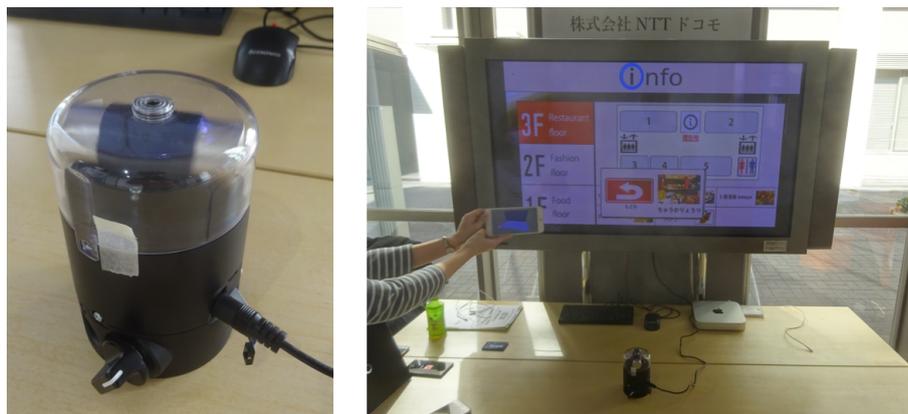


図 3.4: (左) デモで使用した回転磁石マーカ, (右) 情報処理学会でのデモの様子

送信が可能である。また時間経過とともに回転角データと実際のモータ回転がずれる脱調を防ぐため、モータが一回転する度にモータの回転角情報をリセットする機能が搭載されている。さらに、スマートフォンに専用アプリをインストールして回転磁石マーカの操作や設定ができ、アドバタイジングパケットの送信間隔や、磁石の回転速度を 1~15 Hz で設定できる

回転磁石マーカと位置推定結果の可視化アプリを用いたデモが名古屋大学で開催された情報処理学会第 79 回全国大会において展示された。図 3.4 (右) はそのデモの様子である。このデモでは、回転磁石マーカによって推定されたスマートフォンの 3 次元位置に応じて、ディスプレイに表示されている広告の位置や内容が変化の様子が展示された。

図 3.5 は今回検討した手法を基にして開発されたリアルタイム 3 次元位置推定アプリである。回転磁石マーカを作動させている状態でこのアプリを起動するとリアルタイムでスマートフォンの 3 次元位置が推定され、推定結果がアプリ内のスマートフォンの 3D モデルの位置として表示される。またこのアプリでは、背景のポスターをタッチすると方位角の基準点をリセットできる機能が搭載されており、任意の方位角を推定の基準点にできる。

3.5 本章のまとめ

2.5.2 節で述べたように、スマートフォンのように広く普及したデバイスに対して利用可能な動的磁場を用いた位置推定手法は存在していない。既存手法ではコイルを用いて動的磁場を発生させる手法が多いが、長時間の利用は大きな電力が必要となり、また電力を抑えるためにコイルのサイズを大きくすれば屋内環境への設置が困難になる課題があった。

そこで本章では、スマートデバイスの高精度屋内位置推定のため、強力な磁石を回転させて 1~15 Hz 程度の動的磁場を発生させる回転磁石マーカを開発した。磁石を回転させるモータにステッピング角 3.6° のステッピングモータを用い、100 方向の方位

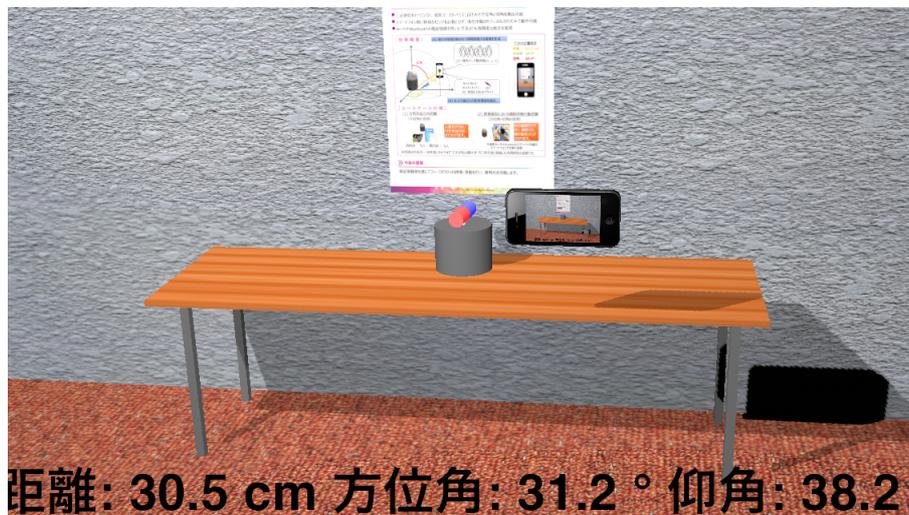


図 3.5: 位置測位アプリの画面

角を推定可能にした。またモータドライバを Raspberry Pi に接続して外部デバイスとの通信を可能にし、外部デバイスから磁石の回転速度の制御や、磁石の回転角データの外部デバイスへの送信を可能にした。

第4章 回転磁石マーカによる動的磁場を用いたスマートデバイス静止時の3次元位置推定手法

本章では本論文が提案するスマートデバイスの3次元位置推定手法について示す。まず磁石を磁気モーメントとして近似し、回転磁石マーカが3次元空間に生成する磁場を定式化した。次にシミュレータを用いて回転する磁石による磁場を可視化し、シミュレーション結果を定式化した磁場と比較した。さらに導出した式から磁場と3次元位置との関係を導出し、磁場から3次元位置を推定する手法を提案した。加えて、推定精度の向上と推定可能範囲拡大のためのノイズ軽減処理について説明する。その後、スマートフォンを用いて本章での提案手法の推定精度を評価する。

4.1 提案手法の概要

2章で述べた通り、既に回転磁石マーカを用いた通過検出とスマートデバイスの2次元位置推定が提案されているが、回転磁石を用いたスマートデバイスの3次元位置推定手法は存在しない。スマートデバイスの3次元位置推定を実現するためには、回転磁石マーカを起点としたデバイスの仰角を推定する必要がある。また距離推定に利用する磁気ノルムの振幅の減衰率は仰角に依存するため、3次元位置推定のためには磁気ノルムの仰角依存性を調べる必要がある。

回転磁石マーカを用いた3次元位置推定手法として、既存のコイルを用いた手法は利用できない。なぜならコイルを用いた手法では、3つの直交するコイルを用いて3種類の異なる周波数の動的磁場を発生させて推定に利用するが、磁石を回転させる手法では発生する動的磁場の周波数は1種類のみだからである。そのため、単一の周波数の動的磁場からデバイスの3次元位置推定手法を提案しなければならない。

本章では回転する磁石が3次元空間に発生させる磁場を定式化し、それらの式を利用してデバイスの3次元位置を推定する手法を提案する。デバイスが静止している時、回転磁石マーカによってデバイスが計測する磁場は周期的になり、それらの磁場の振幅は3次元位置に依存する。デバイスが計測した磁気ノルムが極大値をとっている時の磁石の回転角を取得できれば、回転磁石マーカを起点としたデバイスの方位角を推定できる。また磁場の定式化によって、磁気ノルムの振幅からデバイスの回転磁

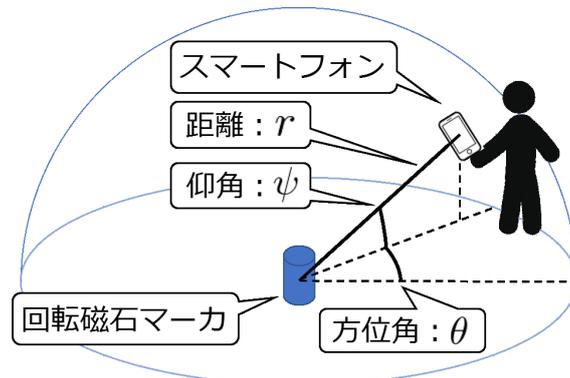


図 4.1: 静止したスマートデバイスの3次元位置推定の外観

石マーカからの距離が推定可能になり、さらに計測した磁場の振幅と3次元位置との依存関係が分かれば、磁場の振幅からデバイスの仰角が推定できる。

図 4.1 は本章で提案する回転磁石マーカを用いた位置推定のイメージである。この図では例として、歩行者がスマートフォンを所持している場合について示す。環境内に回転磁石マーカが設置されている時、その場所を原点としてスマートフォンの3次元位置を3次元極座標で表し、スマートフォンが計測した動的磁場から距離 r 、方位角 θ 、仰角 ψ の3つの座標を推定する。

図 4.2 に本章で提案する位置推定手法の流れを示す。まずスマートフォンに搭載されている磁気センサが回転磁石マーカが生み出した磁場を計測する。次にその計測した磁気データに対してノイズ軽減処理を施し、磁気データと回転磁石マーカの磁石の回転角データを照らし合わせて方位角 θ を推定する。さらに計測した磁気データの直交座標成分の振幅から仰角 ψ を推定し、その推定した仰角 ψ に対応した磁気ノルムの振幅から距離 r を推定する。

4.2 回転磁石マーカによる磁場

4.2.1 回転磁石マーカによる磁場の定式化

各磁気成分と3次元位置との関係を定式化するためには、まず円柱磁石が生み出す磁場を求める必要がある。しかし、回転磁石マーカに使用する円柱磁石が発生させる磁場を定式化するのは困難である。そこで次のように考えた。3.2.2で議論したように、回転磁石マーカはスマートフォンの所有者から15 cm以上離れた場所に設置することを想定している。そこで、想定している距離では円柱磁石を磁気双極子として近似できると仮定した。

次に回転磁石マーカが生み出す磁場を定式化するため、図 4.3 に示すように3次元極座標における磁場ベクトルを定義する。まず磁石の回転角速度を ω 、時間を t で表し、磁石の回転角を ωt とする。議論を簡単にするため、方位角 $\theta = 0^\circ$ の場合を考える。磁場の対称性から $\theta = 0^\circ$ の場合で考えても一般性を失わないと考えられる。方

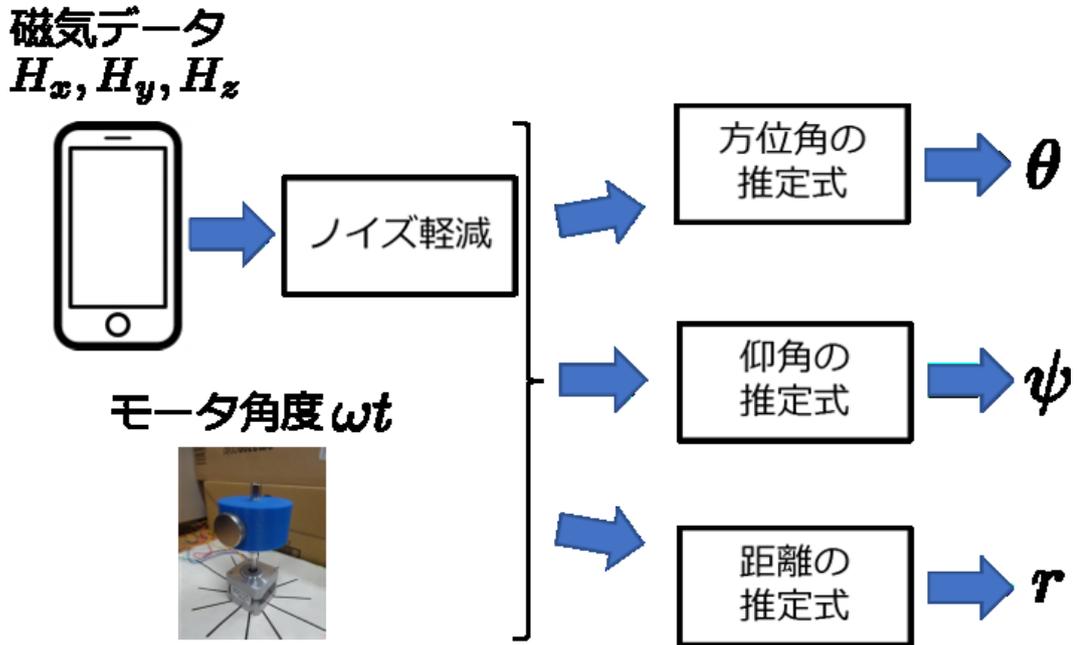


図 4.2: 静止したスマートデバイスの 3 次元位置推定の流れ

方位角 $\theta \neq 0^\circ$ としたい時は、以下の式の ωt を $\omega t - \theta$ と置き換えれば良い。以上の定義を用いると、回転磁石マーカによる磁場の各成分は次の式で書くことができる。

$$H_x = H_r \cos \varphi \cos \psi + H_\varphi \sin \varphi \cos \psi_\varphi \cos \theta_\varphi \quad (4.1)$$

$$H_y = H_\varphi \sin \varphi \cos \psi_\varphi \sin \theta_\varphi \quad (4.2)$$

$$H_z = H_r \cos \varphi \sin \psi + H_\varphi \sin \varphi \sin \psi_\varphi \quad (4.3)$$

次に、これらの式の φ , θ_φ を仰角 ψ と磁石の回転角 ωt を使って表したい。図 4.3 から、それらの関係は次の式になる。

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \sin \theta_\varphi &= \cos \omega t \frac{\cos^2 \psi \sin \omega t \cos \omega t}{\sqrt{1 - (1 - \sin^4 \psi) \cos^2 \omega t}} \\ &+ \sin \omega t \sqrt{1 - \frac{\cos^4 \psi \sin^2 \omega t \cos^2 \omega t}{1 - (1 - \sin^4 \psi) \cos^2 \omega t}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\sin \psi_\varphi = \frac{\sin \psi \cos \psi \cos \omega t}{\sqrt{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t}} \quad (4.6)$$

$$\cos \varphi = \cos \psi \cos \omega t \quad (4.7)$$

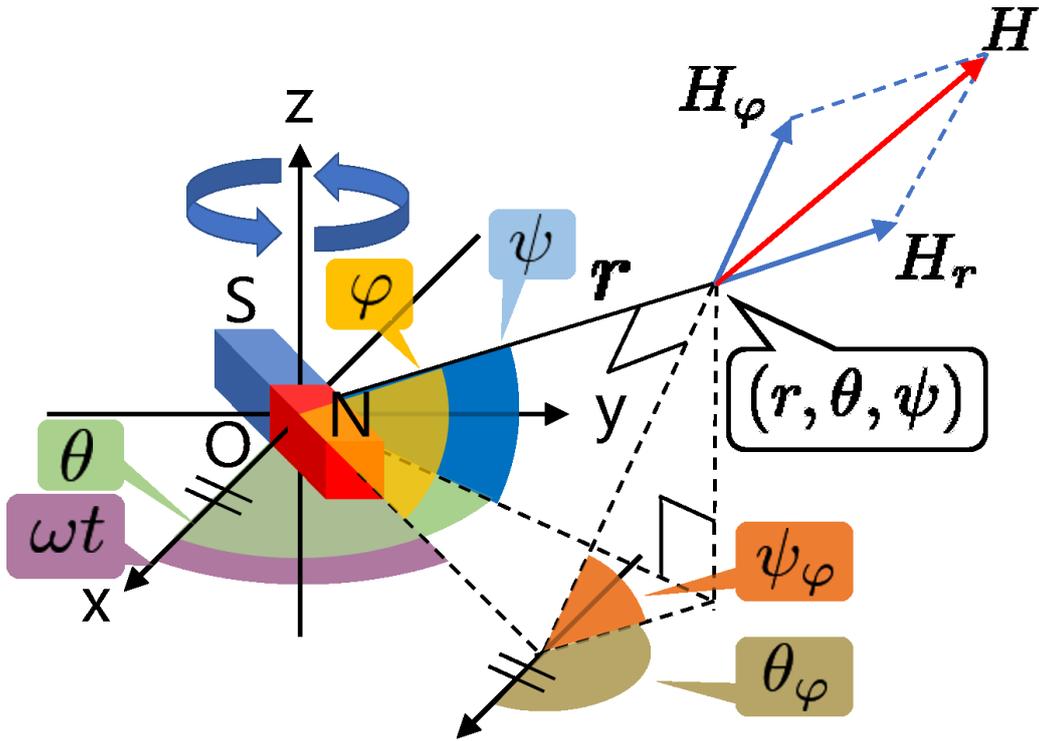


図 4.3: 回転磁石マーカが生み出す磁場の極座標表示

$$\begin{aligned} \cos \theta_r &= \sin \omega t \frac{\cos^2 \psi \sin \omega t \cos \omega t}{\sqrt{1 - (1 - \sin^4 \psi) \cos^2 \omega t}} \\ &\quad - \cos \omega t \sqrt{1 - \frac{\cos^4 \psi \sin^2 \omega t \cos^2 \omega t}{1 - (1 - \sin^4 \psi) \cos^2 \omega t}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\cos \psi_\phi = \sqrt{\frac{1 - (1 - \sin^4 \psi) \cos^2 \omega t}{1 - \cos^2 \psi \cos^2 \omega t}} \quad (4.9)$$

これらの式によって、回転磁石が生み出す磁場を3次元極座標で定式化できたと考えられる。次の節では、回転する磁石が生み出す磁場をシミュレートし、その結果を本節で導出した理論式と比較する。

4.2.2 シミュレータによる磁場の可視化

回転磁石マーカが生み出す磁場の特徴を調べるため、シミュレータを用いて回転磁石マーカによる磁場を可視化した。シミュレーションには磁場解析ソルバ Qm [63] を用いた。このシミュレータでは磁気モーメント法を用いて3次元空間中に発生する磁場をシミュレートする。また、磁石の形状やBH曲線などの物性、磁石の運動などを設定でき、任意の3次元座標での磁場ベクトルを可視化できる。前章3で実装した回転磁石マーカの環境に近づけるため、シミュレータを次のように設定した。まず、磁石

の形状を幅 2.5 cm, 高さ 2.5 cm, 奥行 3 cm の直方体とし, 2 個の磁石を原点を挟んで 1 cm 離れた位置に設置した. BH 曲線は残留磁束密度を 14 300 G, 保磁力を 10 000 Oe とした. 次に, 磁石を z 軸を中心に反時計回りに 5°/s で回転させ, シミュレートする磁場のタイムステップを 72 秒に設定した.

図 4.4 にシミュレーションの結果を示す. 青い矢印は各点における磁場ベクトルを表している. 図を見やすくするため, 磁場ベクトルの大きさを磁場の強さに依らず一定に設定した. 図 4.4.3 はシミュレーション結果の中から, 方位角 $\theta = 0^\circ$, 距離 $r = 1$ m, 仰角 $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の点での磁気成分をプロットしたものである. 図が示すように, 磁石が 1 回転すると磁場の成分が楕円に近い軌跡を描く. 仰角 ψ が増加していくとこの楕円の傾きが変化していき, 仰角 $\psi = 60^\circ$ でほぼ垂直になり, 仰角 $\psi = 90^\circ$ で再び xy 平面に対して水平になる. また, 同じ距離 $r = 1$ m であっても仰角が増加すると円の長軸が減少していき, 仰角 $\psi = 90^\circ$ では円の形状になる様子が分かる.

図 4.6 は本節でのシミュレーション結果と, 4.2.1 節で導出した磁場の理論式との比較である. 図はそれぞれ距離 $r = 1$ m, 方位角 $\theta = 0^\circ$ における仰角 $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ での比較で, 実線が本節で導出した理論式による磁場の値, 半透明線が 4.2.2 節のシミュレーションによる磁場の値を示している. 導出した理論式による磁場の強さは, シミュレーション結果と比較して全体的に小さい傾向にあるが, 極大値, 極小値を取るタイミングや仰角 ψ ごとの磁気成分の変化に同様のパターンが見られる. また共通の特徴として, 磁場の y 軸成分は仰角 ψ の変化に対してほとんど影響を受けないことが分かる. また, 同じ距離 $r = 1$ m であっても仰角 ψ が増加すると磁気ノルムの最大値が減少していく様子が分かる.

次に, 4.2.1 節で導出した理論式による磁場と本節でのシミュレーションによる磁場を決定係数を用いて比較した. ここでの決定係数は以下の式で定義されるものとする.

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^n H_i^2} \quad (4.10)$$

ここで, n はデータの数, H はシミュレーションによる磁場の値, \hat{H} は導出した式による磁場の値である. 表 4.6 は距離 $r = 1$ m, 方位角 $\theta = 0^\circ$ における仰角 $\psi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ での比較結果を示す. ほとんどの磁気成分で決定係数の値が 0.95 を超えており, 導出した理論式による磁場はシミュレーションによる磁場の結果をよく一致している. ここで, 仰角 $\psi = 0^\circ, 90^\circ$ の時は磁場の z 軸成分が常に 0 になるため比較しなかった. 以上から, 4.2.1 節で導出した式 (4.1)~式 (4.9) は回転磁石マーカが生み出す磁場を十分に近似できていると考えられる.

これらの結果が示すように, 回転磁石マーカが生み出す磁場のパターンは 3 次元位置に依存するため, 各磁気成分の振幅と 3 次元位置との関係がわかれば, 計測した磁場の値からデバイスの 3 次元位置推定が可能だと考えられる. 次の節では 3 次元位置推定手法を提案するため, 4.2.1 節で導出した式を用いて方位角 θ , 仰角 ψ , 距離 r を推定する手法を説明する.

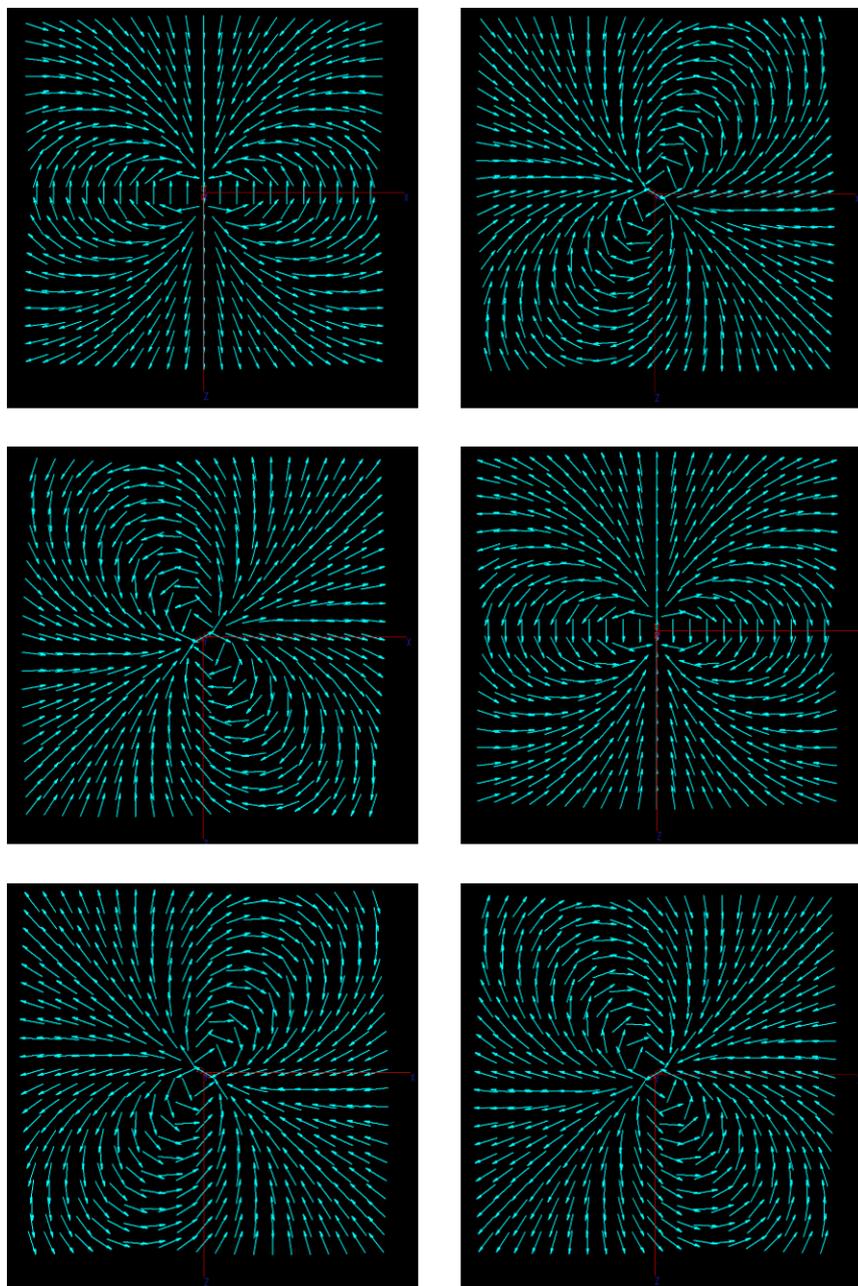


図 4.4: 回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0 秒, (右上) 12/72 秒, (左中) 24/72 秒, (右中) 36/72 秒, (左下) 48/72 秒, (右下) 60/72 秒

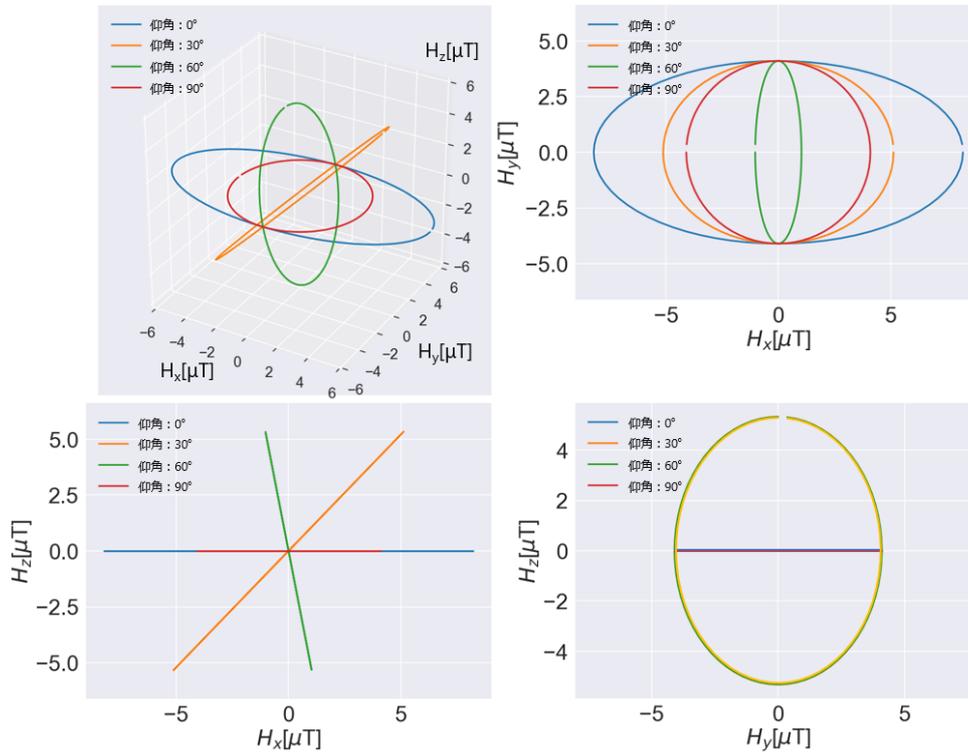


図 4.5: シミュレーションによる回転磁石マーカの磁場

表 4.1: シミュレーション結果と提案した理論式との決定係数による評価

| | 仰角 $\psi = 0^\circ$ | 仰角 $\psi = 30^\circ$ | 仰角 $\psi = 60^\circ$ | 仰角 $\psi = 90^\circ$ |
|-------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| H_x | 0.9736 | 0.9750 | 0.8184 | 0.9344 |
| H_y | 0.9983 | 0.9984 | 0.9986 | 0.9985 |
| H_z | - | 0.9591 | 0.9596 | - |

4.3 各座標の推定手法

4.3.1 方位角推定

回転磁石マーカに対するスマートフォンの方位角 θ は磁気ノルムと磁石の回転角 ωt から推定できる。式 (4.1)~式 (4.6) から、スマートフォンの位置 (r, θ, ψ) での磁気ノルムは次の式 (4.11) のように書ける。

$$H = \sqrt{H_\varphi^2 + (H_r^2 - H_\varphi^2) \cos^2 \psi \cos^2 \omega t} \quad (4.11)$$

この式から、スマートフォンが計測する磁気ノルムはモータ角度 $\omega t = \theta, \theta + \pi$ の時最大になることが分かる。つまり、磁気ノルムが最大の時の磁石の回転角 ωt を回転磁石マーカを原点としたデバイスの方位角 θ として推定できる。

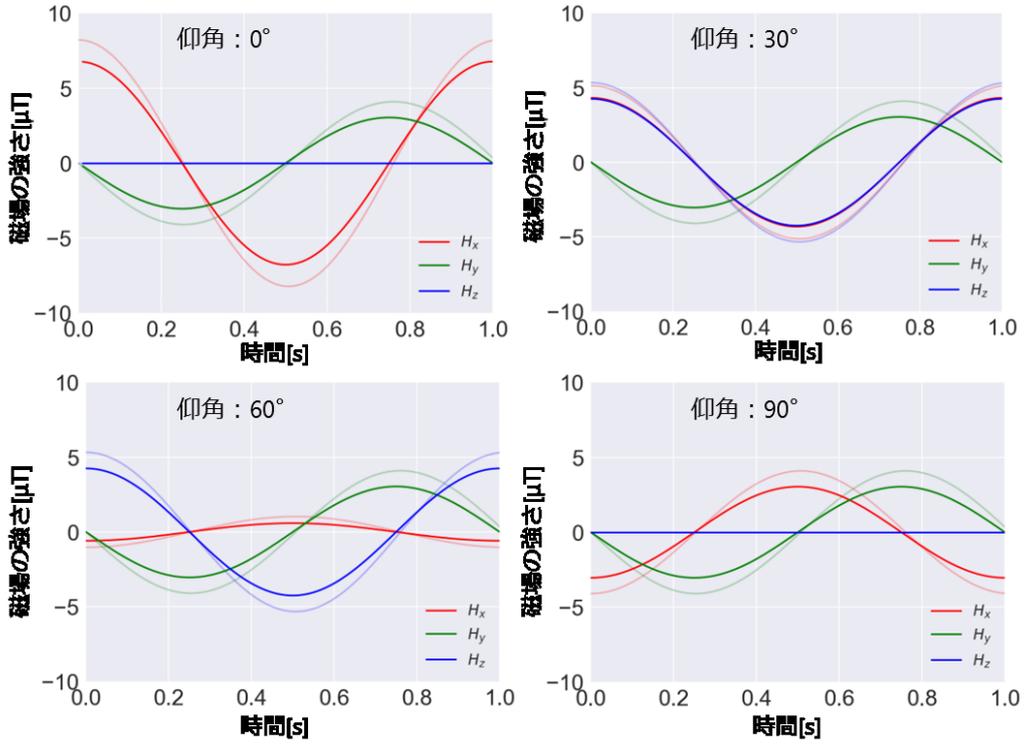


図 4.6: 4.2.2 節でのシミュレーション結果と本節で導出した理論式による磁場の比較, (半透明線) シミュレーションによる磁場, (実線) 導出した理論式による磁場

しかし、この手法では推定される方位角が正解方位角 θ の他に角度 $\theta + \pi$ が方位角として推定されてしまう問題がある。これは式 (4.11) に示されるように、磁気ノルムの周期が磁石の回転周期の半分になるためである。本研究では、非対称な形状の磁石を用いてこの問題の解決を試みた。この非対称磁石を用いた方位角推定に関する検討は 4.4.7 節で説明する。

4.3.2 仰角推定

回転磁石マーカに対するスマートフォンの仰角 ψ は磁場の直交座標成分 H_x, H_y, H_z から推定できる。式 (4.12), (4.14) は式 (4.4), (4.5), (4.6) に $\omega t = 0$ を代入し、それらの式を式 (4.1), (4.3) に代入して得られる。式 (4.13) は $\omega t = \pi/2$ を式 (4.4), (4.5), (4.6) に代入し、それらの式を式 (4.2) に代入して得られる。

$$H_x = -H_\varphi + (H_r + H_\varphi) \cos^2 \psi \quad (4.12)$$

$$H_y = H_\varphi \quad (4.13)$$

$$H_z = (H_r + H_\varphi) \cos \psi \sqrt{1 - \cos^2 \psi} \quad (4.14)$$

式 (4.12), (4.13), (4.14) を仰角 ψ について解くと, 仰角 ψ と磁場の直交座標成分 H_x, H_y, H_z の関係式 (4.15) を導ける.

$$\psi = \arccos \left(\frac{H_x + H_y}{\sqrt{(H_x + H_y)^2 + H_z^2}} \right) \quad (4.15)$$

これらの式から, 磁場の直交座標成分 H_x と H_z は $\omega t = \theta$ の時に最大となり, H_y は $\omega = \theta + \pi/2$ の時に最大となる. つまり, それぞれの磁気成分の振幅を式 (4.15) に代入して仰角 ψ を推定できる.

注意点として, 磁気ノルムに基づいた方位角 θ の推定と異なり, 磁場の直交座標成分 H_x, H_y, H_z はスマートフォンの姿勢に依存する. 従って, 仰角 ψ を推定するためにはスマートフォンの姿勢を前もって推定する必要があるが, 今回はこの問題については取り扱わない. また他の注意点として, 式 (4.15) は $H_z = 0$ の時, $\psi = \arccos(1)$ となるため発散する. 図 4.4.3 が示しているように, 仰角 $\psi = 90^\circ$ の時 $H_z = 0$ となるため, 上式は仰角 $\psi = 90^\circ$ の時は使用できない.

4.3.3 距離推定

回転磁石マーカに対するスマートフォンの距離 r は磁気ノルムの距離依存性を利用して推定する. 以前の研究 [60] では回転磁石マーカを用いた距離推定手法を提案されている. この研究では, 回転磁石マーカとスマートフォン間の距離 r を変化させて磁気ノルムの振幅を計測し, その計測値から距離 r と磁気ノルムの振幅の関係式を導出して推定している. そこで, 本節ではまず同様の手法を用いて距離 r の推定を検討した. 本節では式 (4.18), (4.19) で示される二つの式に対して近似曲線を求め, その推定精度を比較した. ここで H は磁気ノルム, A, B, C はフィッティングパラメータである.

$$H = Ar^{-B} + C \quad (4.16)$$

$$H = Ar^{-B} \quad (4.17)$$

しかし, この手法には課題がある. 4.2.2 節で述べたように, 磁気ノルムの距離依存性は仰角 ψ によって異なる. 例えば距離 r が増加する時, 磁気ノルムは仰角 $\psi = 0^\circ$ の時よりも仰角 $\psi = 30^\circ$ の時の方が早く減少する. そのため, 今回求めた近似曲線では仰角 $\psi = 0^\circ$ 以外の時の距離推定には利用できない. 全ての仰角 ψ についての磁気ノルムの距離依存性を調べればこの問題は解決可能できるが, 調べなければならないデータの数が膨大なものとなるため現実的ではない. そのため, 任意の仰角 ψ でも推定可能な新たな手法を考える必要がある.

任意の仰角 ψ で距離 r を推定する式を求めるため, 4.3.1 節で導出した式 (4.11) をさらに検討する. 今回, 円柱磁石を磁気双極子だと近似しているが, 磁気双極子が生み出す磁場の動径方向とそれに直交する成分は距離の 3 乗に反比例することが知られて

いる。そのため、式(4.11)における H_r, H_φ は次のように表すことができる。

$$H_r = \frac{A}{r^3} \quad (4.18)$$

$$H_\varphi = \frac{B}{r^3} \quad (4.19)$$

これらの関係から、式(4.11)は次のように書ける。

$$H = \sqrt{\left(\frac{B}{r^3}\right)^2 + \left(\left(\frac{A}{r^3}\right)^2 - \left(\frac{B}{r^3}\right)^2\right) \cos^2 \psi \cos^2 \omega t} \quad (4.20)$$

この式を変形すると、次の式が求まる。

$$r = \frac{\left(B^2 + (A^2 - B^2) \cos^2 \psi \cos^2 \omega t\right)^{\frac{1}{6}}}{H^{\frac{1}{3}}} \quad (4.21)$$

この式における定数 A, B が分かれば、計測した磁気ノルム H と推定した仰角 ψ から距離 r を推定できる。そこで、次に定数 A, B を求めることを考える。ここで、仰角 $\psi = 0^\circ$ の時、式(4.21)は次のようになる。

$$r = \frac{\left((B^2 + (A^2 - B^2) \cos^2 \omega t)\right)^{\frac{1}{6}}}{H^{\frac{1}{3}}} \quad (4.22)$$

さらに、磁石の回転角 $\omega t = 0$ の時、上式は次の式になる。

$$A = r^3 H \quad (4.23)$$

つまり、仰角 $\psi = 0^\circ$ 、距離 $r = 1$ m、磁石の回転角 $\omega t = 0$ の時の磁気ノルムの値を計測すれば、その値を式(4.23)に代入して定数 A を求めることができる。定数 B についても同様に考える。仰角 $\psi = 0^\circ$ の時、磁石の回転角 $\omega t = \pi/2$ の時、式(4.21)は次のようになる。

$$B = r^3 H \quad (4.24)$$

これらの方法で求めた定数 A, B を式(4.21)に代入し、距離 r を推定する。

4.3.4 姿勢推定

4.3.2節で述べたように、仰角 ψ の推定には回転磁石マーカに対するデバイスの姿勢を推定し、デバイスの座標系と回転磁石マーカの座標系を一致させる必要がある。今想定するスマートフォンには加速度センサが搭載されており、計測した加速度から姿勢を推定できる。スマートフォンが静止していると仮定すると、スマートフォンが計測する加速度は重力の影響のみと考えられるため、加速度センサが計測した値からデバイスに対する重力方向が推定可能である。さらに4.3.1節で述べたように、デ

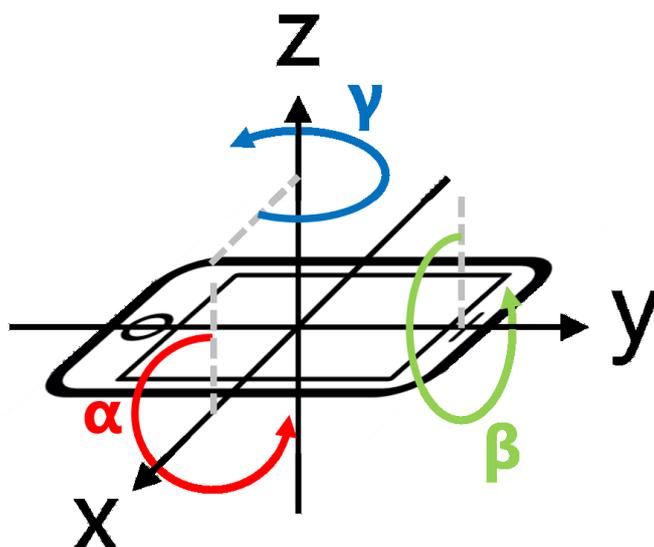


図 4.7: デバイスの姿勢を表す角度の定義

デバイスが計測した磁気ノルムが極大値をとる時刻での磁石の回転角からデバイスの方角角 θ を推定できるため、その時の方位角 θ を利用してデバイスの姿勢を推定可能である。

ここで、デバイスの姿勢を表すための変数を定義する。図 4.7 はデバイスの姿勢とそれぞれの角度の対応を示している。基本姿勢の座標系を x 軸中心に α 、 y 軸中心に β 、 z 軸中心に γ 回転させてデバイスの姿勢を表すものとする。この時、基本姿勢での各値は $\alpha = 90^\circ$ 、 $\beta = 90^\circ$ 、 $\gamma = 0^\circ$ となる。

スマートフォンの回転磁石マーカに対する姿勢を推定する手法は以下の通りである。まず加速度ベクトルと x 軸との成す角を α とし、その角度だけ y 軸中心に座標系を回転させ、次に加速度ベクトルと y 軸との成す角を β とし、その角度だけ x 軸中心に座標系を回転させる。最後に、変換後の座標系でノルムが極大値を取っている時の磁場ベクトルと x 軸との成す角を γ とする。以上の処理によって α 、 β 、 γ 全ての角度を推定できる。

4.3.5 磁気データのノイズ軽減処理

本節では推定精度を向上させるため、計測した磁気データへのノイズ軽減処理について説明する。回転磁石マーカからの距離が離れるに伴い、回転磁石マーカによる磁場の影響よりもノイズによる影響の方が相対的に強くなるため、磁気データから回転磁石マーカによる磁場の影響の判別が次第に困難になる。そこで、位置推定に複数周期の磁気データを用いたり、移動平均などの処理によって磁気データに含まれるノイズ

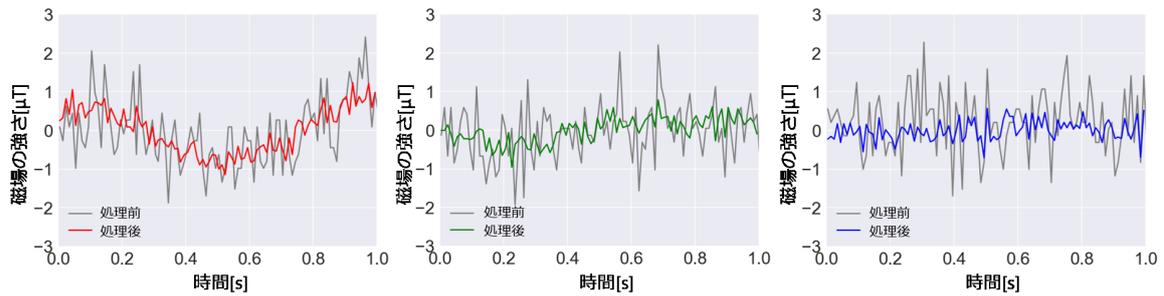


図 4.8: 10 周期分の磁気データの平均化前と平均化後の比較, (左) x 軸成分, (中) y 軸成分, (右) z 軸成分

を軽減する手法を提案する。実際にノイズ軽減を施した例として, 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 2\text{ m}$ で計測した磁場の x 軸成分の場合を示す。

加算平均による平滑化

磁気データに含まれるランダムなノイズの影響は, 複数の磁気データの加算平均を算出すれば軽減できると考えられる。そこで, まず計測した磁気データから磁石の回転 10 周期分の磁気データを取り出し, 次にそれを磁石の回転周期ごとに区切って 10 個の磁気データに分割する。次に, 分割した 10 個の磁気データの加算平均を算出して 1 個の磁気データとする。以上の処理によって, 磁気データに含まれるランダムなノイズの影響を軽減する。

またこの際, 磁気データの各成分に $10\sim 100\mu\text{T}$ 程度の環境磁気の影響が含まれるため, 加算平均を計算する前にこの影響を取り除く必要がある。今回はデバイスが静止しているため地磁気や建物の鉄骨などによる静的磁場の影響は一定である。また, 家電製品が発する磁場や人の通過による磁場の影響は回転磁石マーカの磁場の影響と比べて小さいので, 磁気データに含まれる環境磁気の影響は磁石の回転周期の時間間隔では一定であると考えられる。そこで, それぞれの磁気データに対して平均値を算出し, その平均値をもとの磁気データから引いて環境磁気の影響を取り除く処理を施す。

図 4.8 に元の磁気データと処理を施した後の磁気データの比較を示す。それぞれのグラフは磁場の x, y, z 軸成分を示し, 灰色のグラフはそれぞれ処理を施す前の磁気データで, 赤色のグラフが処理後の x 軸, 同様に緑色が y 軸, 青色が z 軸成分の磁場を示している。今回の例ではモータの回転周期を 1 秒とし, 10 秒分の計測した磁気データを用いて上記の処理を実行した。この図から, 処理を施す前の灰色のグラフと比較して, 処理後の磁気データは動的磁場の振動の特徴がより明確に表れていることが分かる。

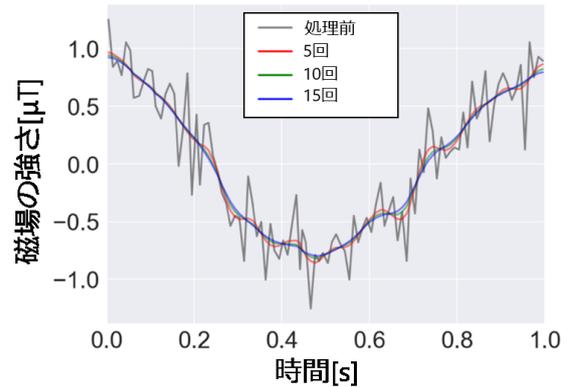
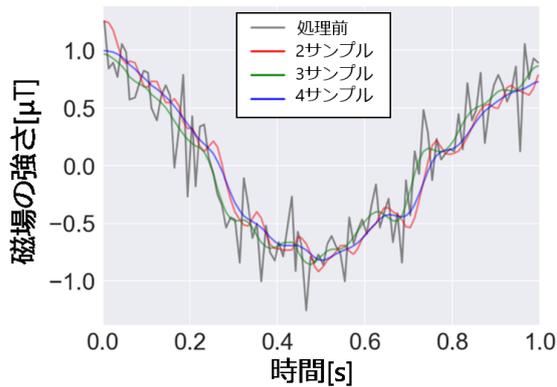


図 4.9: 窓幅ごとの移動平均の結果比較 図 4.10: 回数ごとの移動平均の結果比較

移動平均を用いた平滑化

前節の処理によって磁気データに含まれるランダムなノイズを軽減したが、一方で加算平均だけでは軽減できなかったノイズの影響は残っている。そのため、前節での処理を施した磁気データに対して、さらに移動平均を用いた平滑化処理を施す。この処理によって磁気データから高周波成分を取り除き、回転磁石マーカによる動的磁場の影響を判別しやすくする。

適切な平滑化のため、移動平均に用いるデータの窓幅と処理の回数を幾つか変えてその結果を比較した。図 4.9 に移動平均の回数を 5 回で固定し、窓幅をいくつか変えて計算した結果を示す。ここでは図を見やすくするため、縦軸のスケールを図 4.8 とは変えている。窓幅が 2 サンプルの時、平滑化が十分ではないように見えるが、一方で窓幅 3 サンプル以降では目立った変化は現れなかった。このことから、今回は 3 サンプルの窓幅が適切だと判断した。また図 4.10 に窓幅を 3 サンプルで固定し、移動平均の繰り返し回数をいくつか変えて計算した結果を示す。移動平均の回数が 5 回の時では十分に平滑化されていないように見えるが、一方で 10 回以上の処理では目立った変化が表れなかった。このことから、今回は移動平均処理の回数は 10 回で十分だと判断した。以上の結果から、窓幅 3 サンプル、移動平均の繰り返し回数 10 として磁気データを平滑化した。図 4.11 に各磁気成分に移動平均を施した例を示す。それぞれのグラフにおいて、灰色のグラフは処理を施す前の磁気データ、赤色が処理後の x 軸、緑色が y 軸、青色が z 軸成分の磁場を示している。グラフが示すように各磁気成分とも灰色で示された磁気データに対して、磁気データがより正弦波の形状に近づいている様子が分かる。

カーブフィッティングによる近似曲線の導出

これまでの処理で磁気データに含まれるノイズの影響を軽減したが、これらの処理の後でも計測した磁気データから回転磁石マーカによる磁場の振幅の判別が難しい場合がある。デバイスの位置推定には計測磁気振幅を利用するため、計測した磁気

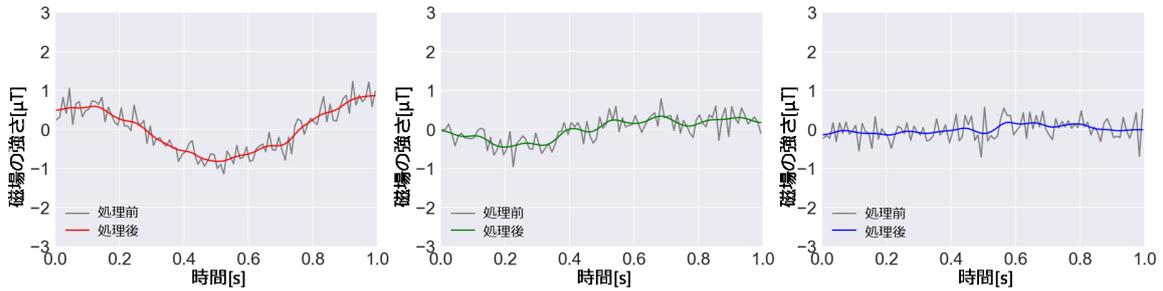


図 4.11: 移動平均前と後の磁気データの比較, (左) x 軸成分, (中) y 軸成分, (右) z 軸成分

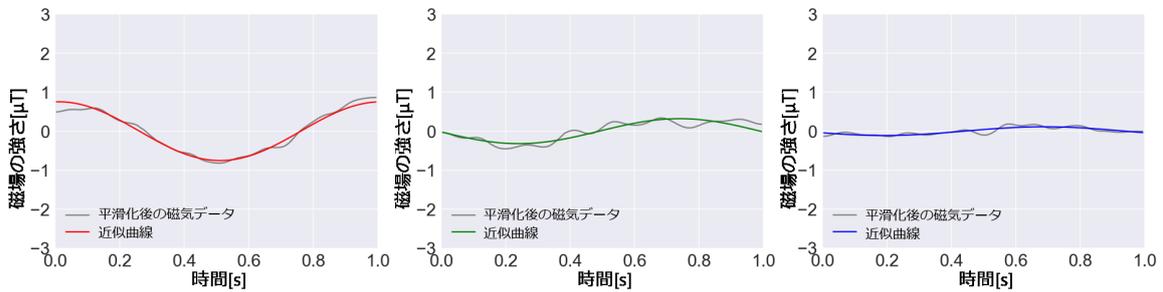


図 4.12: 元の磁気データと近似曲線の比較, (左) x 軸成分, (中) y 軸成分, (右) z 軸成分

データから磁場の振幅を決定する必要がある。そこで磁気データを磁場の理論式でカーブフィッティングして、推定に利用するための磁気データを求める。

磁気データに対してカーブフィッティングする式として、4.2.1 節で導出した磁場の理論式を利用する。4.2.1 節での議論から、磁気センサが検知する磁場の強さは正弦波になると考えられる。そこで、これまでのノイズ軽減処理を施して得られた磁気データを以下の式 (4.25) で定義される正弦波でカーブフィッティングする。

$$H = D \sin(2\pi(\omega t + E)) + F \quad (4.25)$$

この式において、 H は磁場の値、 D, E, F はフィッティングパラメータである。また今回の例では、回転磁石マーカのモータの回転速度は 1 Hz とし、 $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ とした。以上の処理を x, y, z 軸それぞれの磁気データに対して行い、それら 3 つの磁気データの近似曲線を方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r の推定に利用する。図 4.12 に計測した磁気データと本節の手法で求めた近似曲線の比較を示す。それぞれのグラフが磁場の x, y, z 軸成分を示し、灰色のグラフが処理前の磁気データ、赤色が x 軸、緑色が y 軸、青色が z 軸の処理後の磁気データを示す。これらの図から、前節までの処理によって平滑化された磁気データがさらに正弦波にフィッティングされている様子が分かる。

4.4 3次元位置推定の事前実験

3次元位置推定の評価実験をする前に、事前実験として方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r を個別に推定した。本節では事前実験での回転磁石マーカの設定や方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r の推定結果について述べる。

4.4.1 事前実験の設定

最初に、実験システムを図4.13に示す。システムを構成しているのは、3次元位置を推定したいスマートフォン、回転磁石マーカ、そしてPCの3つである。実験前に、スマートフォンと回転磁石マーカのRaspberryPiの時刻をNTP (Network Time Protocol)に同期させ、スマートフォンで磁場を計測するためのアプリを起動させる。今回は磁場を計測するアプリとしてHASC Logger [64]を用いた。実験開始時にPCから信号を送って回転磁石マーカの磁石を回転させ、計測時間が終了したら磁石の回転を停止させる。この時、RaspberryPiには磁石の角度データが記録され、スマートフォンには磁気データが記録される。実験後、これらのデータをPCに送信し、各データを4.2.1節で求めた式に代入してスマートフォンの3次元位置を推定する。

次に、実験での回転磁石マーカやスマートフォンの設定について述べる。実験での回転磁石マーカの磁石の回転速度は1 Hzとした。これは離散フーリエ変換時のパワースペクトルの周波数領域の分解能を1 Hzにするためである。スマートフォンはiPhone 6 Plusを使用し、磁気センサのサンプリング周波数は性能の上限値である100 Hzとした。図4.14に回転磁石マーカとスマートフォンの座標系を示す。右図に示したように、磁石の角度 $\omega t = 0$ の時の磁石のS極からN極への向きをx軸の正の向きとし、右手系の直交座標系とする。左図はスマートフォンの座標系を示し、回転磁石マーカの座標系と一致するように姿勢を固定して実験した。計測時間は、4.3.5節で述べたノイズ軽減処理のため、1回あたり15秒とした。計測回数は、推定結果の平均と標準偏差を算出するため、各計測場所で10回ずつとした。

また、実験で仰角 ψ を推定する際、一定の距離 r を保ったまま仰角 ψ を変化させて計測するのは困難である。例えば、仰角 $\psi = 60^\circ$ 、距離 $r = 3\text{ m}$ で磁場を計測したい場合、回転磁石マーカから1.5 m離れた場所で約2.6 mの高さの台にスマートフォンを乗せて計測しなければならない。そこで、今回の計測では回転磁石マーカとスマートフォンを同じ向きに横向きにして仰角 ψ を推定した。図4.15に実験時の様子を示す。右図は仰角 $\psi = 0^\circ$ 時の実験の様子、左図は仰角 $\psi = 30^\circ$ 時の実験の様子である。仰角 ψ 推定の実験では、回転磁石マーカとスマートフォンを高さ約1 mのプラスチック製の台の上に設置し、それぞれの仰角 ψ を一定に保った上で距離 r を変えて計測する。ここまでは、実験でのスマートフォンや回転磁石マーカの設定、計測時間や回数について説明した。次の節から方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r のそれぞれの推定精度を評価する。

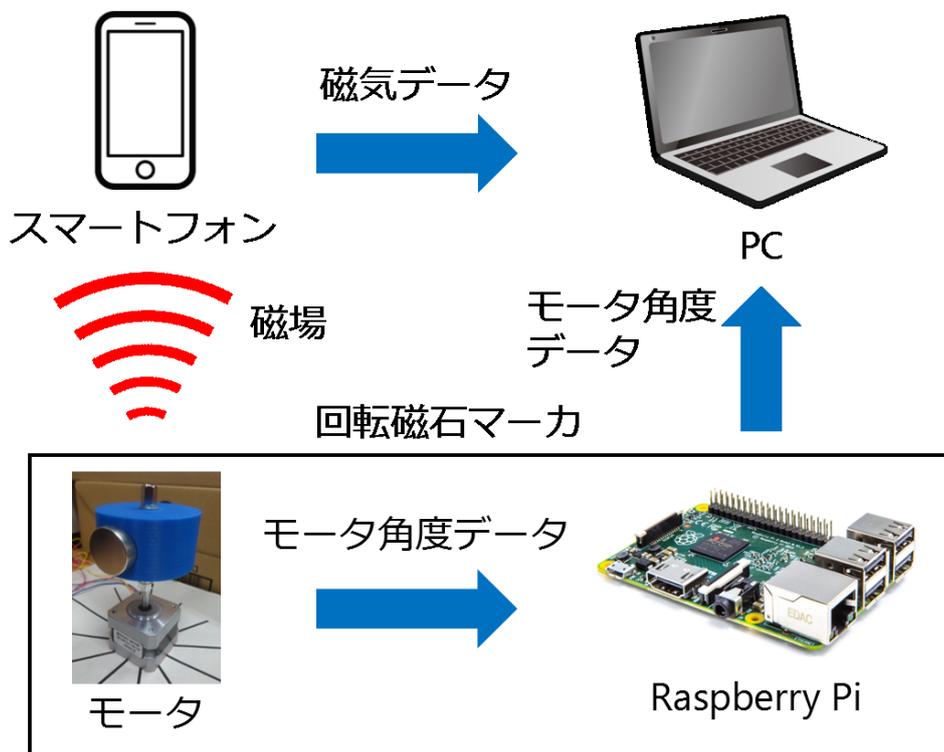


図 4.13: 実験システムの構成

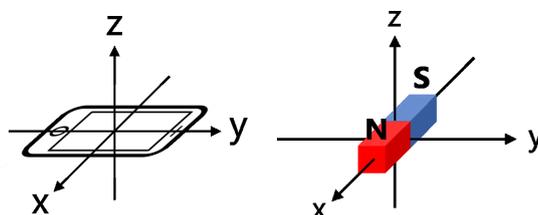


図 4.14: 座標系の設定, (左) スマートフォン, (右) 回転磁石マーカ

4.4.2 方位角推定の結果

本節ではまず, 4.3.5 節で述べた方位角 θ 推定の評価実験をした. 回転磁石マーカとスマートフォンの距離を 1m で固定し, 方位角 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の 5 か所で計測した. 計測時間は各場所で 10 秒, 計測回数は各方位角 θ で 10 回ずつである. 表 4.2 に推定結果を示す. それぞれの推定結果は小数点以下を四捨五入した. 4.3.1 節で触れたように, 本手法では推定される方位角 θ が 2 つ存在するため, 今回の実験ではそれらの推定方位角を θ_1, θ_2 とする. ここで, 平均誤差は 10 回の推定方位角の平均から正解方位角を引いた値の絶対値である. この表から分かるように, 距離 r が一定の時, 方位角 θ の推定精度はその方位角 θ に依存せず平均誤差 $1^\circ \sim 11^\circ$ 程度である. これは式 (4.11) が示すように, 回転磁石が発する磁場を異なる方位角 θ で計測しても, 距離 r が一定なら磁気ノルムの強さは同じになるためである.

次に, 距離 r を変化させた際の方位角 θ の推定精度を調べるため, 計測した磁気デー

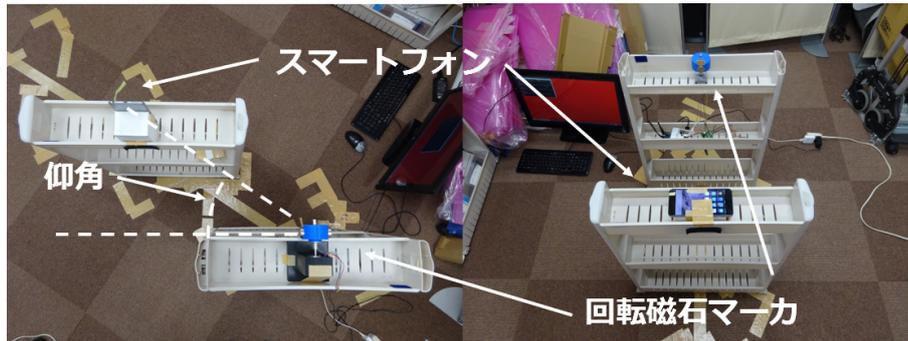


図 4.15: 仰角 ψ 推定の実験の様子, (左) 仰角 $\psi = 30^\circ$ 時の推定, (右) 仰角 $\psi = 0^\circ$ 時の推定

表 4.2: 方位角 θ の推定結果

| 方位角 [°] | 0 | | 45 | | 90 | | 135 | | 180 | |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | θ_1 | θ_2 |
| 平均誤差 [°] | 10 | 9 | 11 | 10 | 1 | 4 | 6 | 3 | 4 | 2 |
| 標準偏差 [°] | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 6 | 3 | 6 | 6 |

タに対して 4.3.5 節で示したノイズ軽減処理を施した上で方位角 θ を推定した。推定場所は方位角を $\theta = 0^\circ$ で固定し、回転磁石マーカからの距離 $r = 0.5 \sim 4 \text{ m}$ を 50 cm 間隔の 8 か所で方位角 θ を推定した。図 4.16 に推定結果を示す。ここで、それぞれの推定結果は小数点以下を四捨五入した。距離 $r = 3.0 \text{ m}$ までの方位角推定では、平均誤差の最大値が 14° 以下、標準偏差が 12° 以下の精度であった。一方、距離 $r = 3.5, 4.0 \text{ m}$ での計測では、平均誤差は 11° 以下ではあるが、標準偏差がいずれも 30° を超えており、距離 r に依存して方位角 θ の標準偏差が増加している様子が分かる。これは、距離が 3 m よりも大きい場所では回転磁石マーカによる動的磁場の影響が現象するため、磁気ノルムが極大値をとる時刻の検出が難しくなるためであると考えられる。

4.4.3 仰角推定の結果

推定精度の仰角依存性を調べるため、スマートフォンは回転磁石マーカからの距離 $r = 1 \text{ m}$ で固定し、仰角 $\psi = -60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の 5 か所で計測した。計測時間は方位角 θ の時と同様、各場所で 10 秒、推定回数は各場所で 10 回ずつである。また方位角 θ が 2 つ推定されてしまうため仰角 ψ も 2 つ推定される。2 つの推定仰角をそれぞれ ψ_1, ψ_2 とする。表 4.3 に推定結果を示す。それぞれの推定結果は小数点以下を四捨五入した。推定仰角 ψ_1, ψ_2 の平均誤差は 10° 以内となっており、方位角 θ の推定と同程度の推定精度である。標準偏差は仰角 -60° の場合を除けば 2° 以下となっており、方位角 θ の推定よりも低い値である。これは 4.3.2 で述べたように仰角 ψ の推定には磁場の振幅のみを用いるため、方位角 θ の推定とは異なり、磁気データが極大値

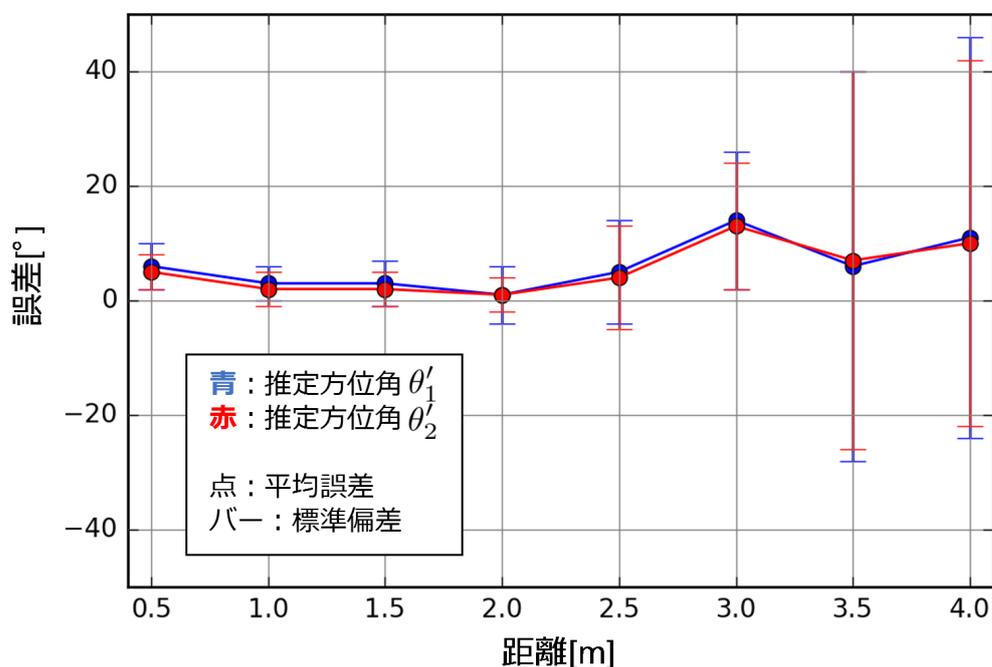


図 4.16: 方位角 θ の推定精度

表 4.3: 仰角 ψ の推定結果 (距離 $r = 1$ m, ノイズ軽減なし)

| 仰角 [°] | -60 | | -30 | | 0 | | 30 | | 60 | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ψ_1 | ψ_2 |
| 平均誤差 [°] | 8 | 10 | 5 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 0 | 4 |
| 標準偏差 [°] | 10 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |

をとる時刻の取得の必要がないためだと考えられる。

図 4.17 は仰角 ψ の推定時に計測された磁気データである。図が示すように、計測された磁気成分は原点を中心に楕円に近い形状を描いており、さらに仰角 ψ の増加に伴って磁気成分が描く楕円が傾いていき、仰角 $\psi = 60^\circ$ では楕円がほぼ垂直になっている様子が分かる。この傾向は図で示したシミュレーション結果と同じ傾向である。

4.4.4 距離推定の結果

4.3.3 節で述べた通り、回転磁石マーカからのスマートフォンの距離 r を推定するには、距離 r とノルムの振幅との関係を調べる必要がある。そのため、回転磁石マーカとスマートフォンとの距離 $r = 30$ cm ~ 4.0 m までの磁気を 10 cm ごとに計測した。計測時は方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = 0^\circ$ とし、計測時間はそれぞれ 15 秒とした。この実験

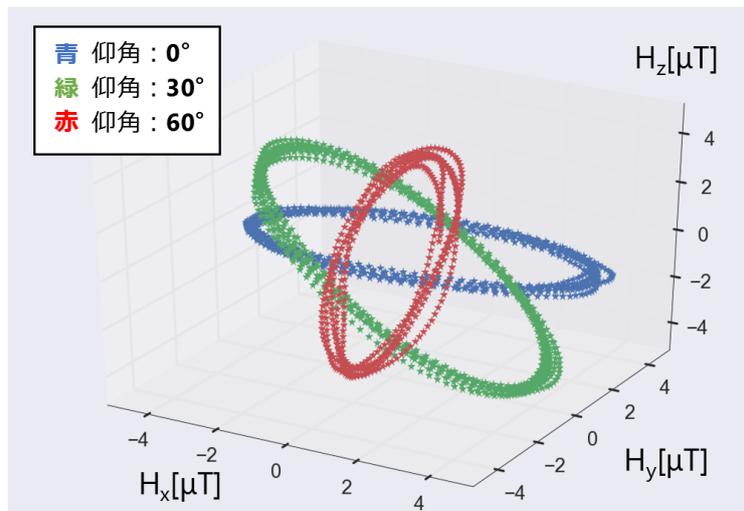


図 4.17: 計測された磁気成分 (距離 $r = 1 \text{ m}$, ノイズ軽減なし)

によって得られた磁気データに対して 4.3.5 節で述べた処理を施し、磁気ノルムの近似曲線を求めた。求めたノルムの近似曲線の極大値から極小値を引き、2 で割った値をノルムの振幅とした。これらの 38 個のデータをカーブフィッティングし、求めたフィッティングパラメータを用いて近似曲線を導出した。近似曲線は (4.3.3) 節で示した式 (4.18), (4.19) の 2 つについて求めた。以後、式 (4.18) を近似曲線 1, 式 (4.19) を近似曲線 2 と呼ぶことにする。カーブフィッティングの結果、近似曲線 1 のフィッティングパラメータは $A = 1.590$, $B = 3.146$, $C = 0.111$, 近似曲線 2 のフィッティングパラメータは $A = 1.636$, $B = 3.124$ となった。図 4.18 は実験で得た磁気データとこれらの近似曲線との様子を示す。決定係数で評価した結果、近似曲線 1 は 0.9997, 近似曲線 2 は 0.9996 であったため、2 式ともよく近似できていると考えられる。

次に、求めた二つの近似曲線を用いて距離 r を推定した。推定した距離は 50 cm ~ 4.0 m を 50 cm 間隔の 8 か所、計測時間は 1 回あたり 15 秒、各計測場所で 10 回計測し、推定結果の平均誤差と標準偏差を導出した。図 4.19 に結果を示す。推定結果は小数第三位以下を四捨五入した。近似曲線 1 による推定結果は 1.5 m までは近似曲線 2 よりも高い精度であるが、2.0 m での推定で大きく誤差が生じ、2.5 m 以降では距離推定できなかった。この理由は、図 4.18 (緑) から分かるように、近似曲線 1 は 1.0 m 以上の距離 r で計測データからの誤差が生じており、さらにノルムの振幅の値がフィッティングパラメータ $C = 0.111$ より小さくなると、それに対応する距離 r が存在しないため推定が不可能になるからである。一方、近似曲線 2 による推定結果は 2.0 m 以上の推定では近似曲線 1 よりも精度が高く、また 2.5 m 以上の距離でも推定が可能であった。推定精度は距離 3.0 m までで平均誤差が 19 cm 以下、標準偏差が 17 cm 以下であった。距離 3.5, 4.0 m の推定では、平均誤差が 22 cm 以下ではあるものの、それぞれ標準偏差が 50 cm 以上、1.0 m 以上となっており、距離 r が増加するに伴って標準偏差も増加している様子が分かる。

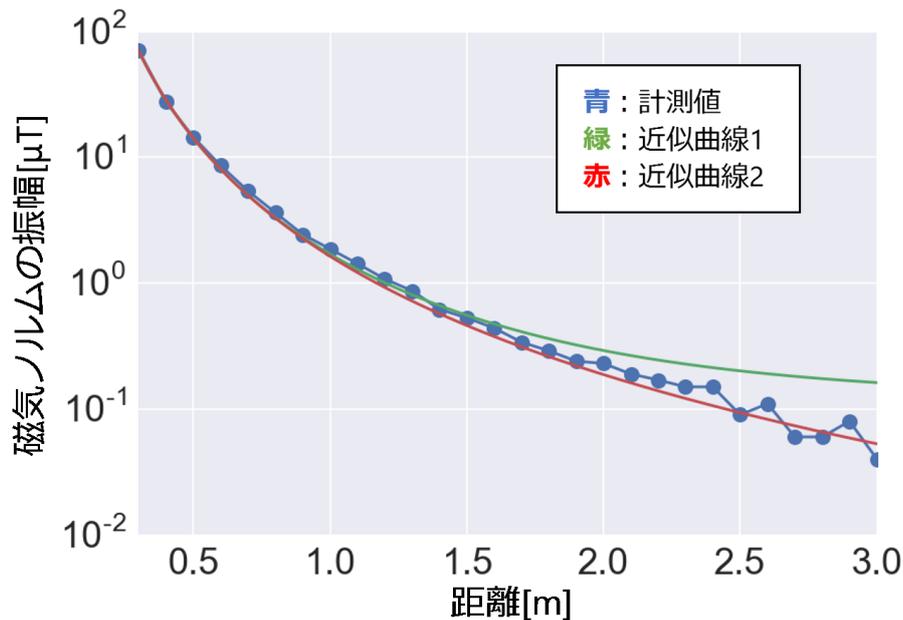


図 4.18: 距離と磁場のノルムの振幅の関係

4.4.5 姿勢推定の結果

4.3.4 節で述べた姿勢推定手法を評価するため、推定する姿勢を以下のようにして決定した。デバイスの姿勢を表すパラメータ α , β , γ はそれぞれ $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を取るため、デバイスが取りうる姿勢は無数に存在する。今回の実験は回転磁石マークによる姿勢推定の基礎検討と位置づけ、限定された条件でスマートフォンの姿勢推定が可能かどうかを評価した。計測される磁場がデバイスの姿勢によって受ける影響を調べるため、計測場所は方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\theta = 0^\circ$ で固定し、回転磁石マークからの距離 r の違いによる推定精度への影響を調べるため、距離 $r = 1, 1.5$ m で計測した。

図 4.20 に今回の実験で推定した姿勢を示す。推定精度の各軸からの影響を調べるため、x, y, z 軸それぞれを中心に 45° 傾けた姿勢 3 つと、複数の軸で回転させた時の推定精度への影響を調べるため、x 軸中心に 45° 傾けたのち y 軸中心に 45° 傾けた姿勢の計 4 つの姿勢で推定した。姿勢推定の評価実験では重力方向を推定する必要があるため、磁気データに加えて加速度データを計測する。今回の実験では加速データの計測時間は 15 秒とし、計測回数は各姿勢で 1 回のみとした。

図 4.21 は距離 $r = 1$ m、姿勢 3 で計測された磁気データを示す。ここで赤い矢印は加速度ベクトルを示し、今回の実験では重力方向に対応する。スマートフォンの姿勢を変化させると、計測した磁気データが描く楕円もその姿勢に応じて影響を受ける。図 4.21 (右下) は図 4.21 (右) の赤線で示した図を xy 平面に投影したものである。この図で磁気データが極大値を取っている時の磁気データと x 軸との成す角が γ である。また図 4.21 (右上) は図 4.21 (右下) を γ で回転させた磁気データである。この図で示されている磁気データの軌跡は基本姿勢で計測した磁気データの軌跡と同じになっ

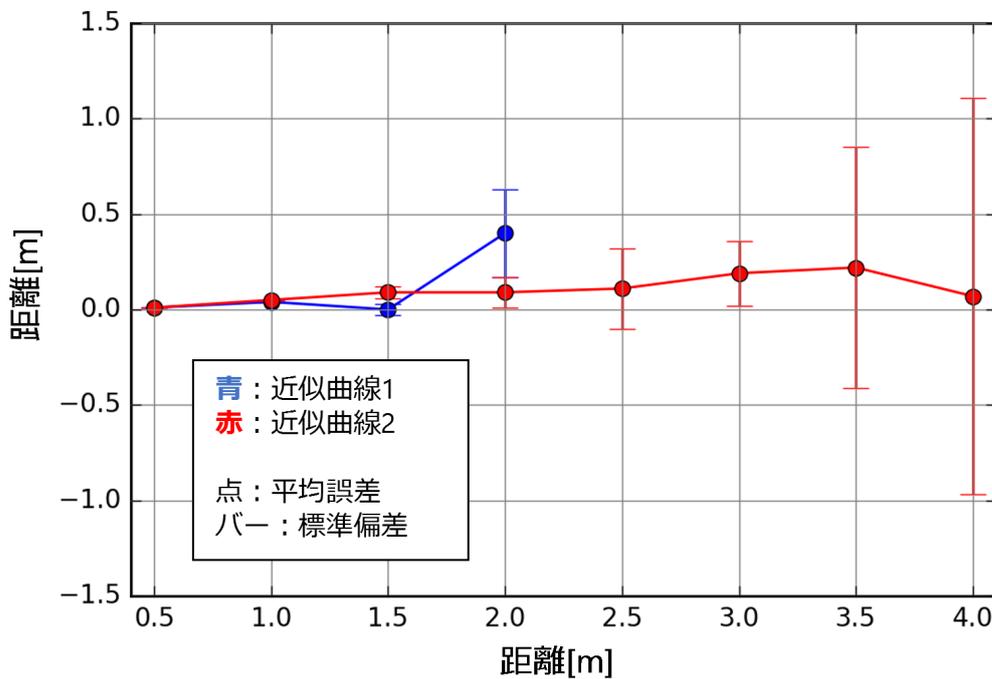


図 4.19: 距離推定の推定精度

表 4.4: 姿勢推定の結果 (距離 $r = 1$ m)

| | 姿勢1 | 姿勢2 | 姿勢3 | 姿勢4 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| α | -5 | -3 | 0 | -2 |
| β | 3 | -3 | 1 | 0 |
| γ | 6 | 2 | 0 | -14 |

ている様子が分かる。

表 4.4, 4.5 に姿勢推定の結果を示す. 表ではデバイスの姿勢を表すそれぞれの角度 α , β , γ の正解値からの誤差を示した. この表が示すように, 姿勢推定の精度は距離 $r = 1, 1.5$ m のどちらの計測でも 4 つの姿勢について誤差 14° 以内であった.

評価実験の結果から, 磁気データと加速度データを用いれば, デバイスの回転磁石マーカに対する姿勢を誤差 14° 以内で推定できた. しかし, 今回は基礎的な検討のため各計測場所の実験は 1 回のみであり, 距離 $r = 1.5$ m より遠い距離では評価実験しなかった. そのため, 姿勢推定の精度の平均, 標準偏差などを求めるにはさらなる実験が必要であると考えられる. また, 任意の姿勢でのスマートフォンの 3 次元位置を推定するためには, 姿勢推定をした後での方位角 θ , 仰角 ψ , 距離 r の推定精度を調べる必要がある.

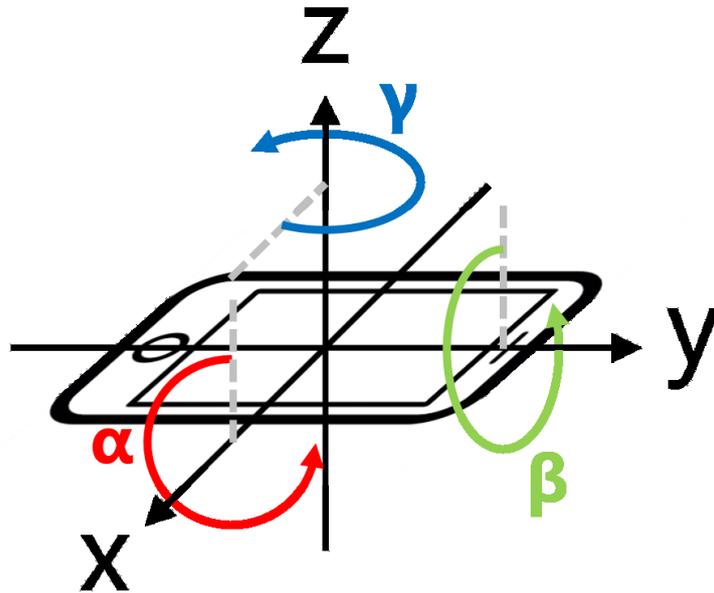


図 4.20: 推定した姿勢, (左上) 姿勢 1: x 軸中心に 45° , (右上) 姿勢 2: y 軸中心に 45° , (左下) 姿勢 3: z 軸中心に 45° , (右下) 姿勢 4: z 軸中心に 45° のち x 軸中心に 45°

表 4.5: 姿勢推定の結果 (距離 $r = 1.5 \text{ m}$)

| | 姿勢 1 | 姿勢 2 | 姿勢 3 | 姿勢 4 |
|----------|------|------|------|------|
| α | 0 | 1 | -5 | -4 |
| β | 4 | -1 | -3 | -1 |
| γ | 7 | 3 | -2 | -9 |

4.4.6 回転磁石マーカによる磁気の影響範囲

回転磁石マーカによる磁気の影響をどの範囲までスマートフォンの磁気センサで検知できるか調べるため、4.4.4 節での実験で得られた磁気データを調べた。調べるデータには方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = 0^\circ$ の磁場の x 成分を用いた。その理由は式 (4.20) から分かるように、磁気ノルムは距離 r が一定の下では仰角 $\psi = 0^\circ$ の時に最大になる。また式 (4.11) から分かるように、磁場の直交座標成分は x 成分が最も大きな値を持つ。つまり、仰角 $\psi = 0^\circ$ での磁場の x 成分は距離 r に対して最も減少しにくい成分であるため、磁場の x 軸成分で周波数成分が検知できなくなった距離 r が回転磁石マーカの磁場の影響範囲だとした。

図 4.22 は 4.3.5 節で示したノイズ軽減処理を施した仰角 $\psi = 0^\circ$ 、距離 $r = 1, 2, 3, 4 \text{ m}$ での磁場の x 軸成分を示したものである。注意点として、視認性を高めるため

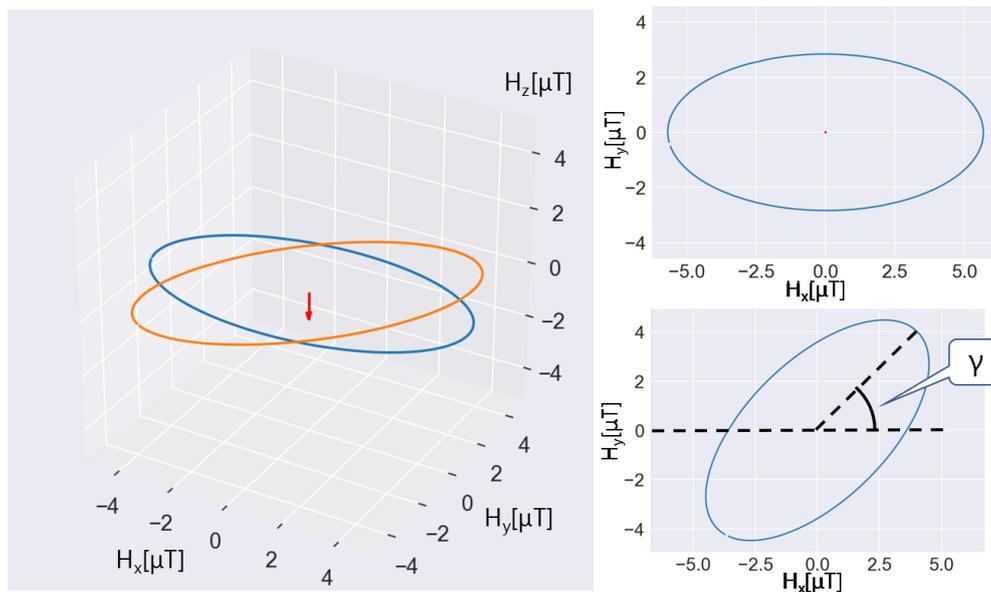


図 4.21: 姿勢 3 で計測された磁気データ

にそれぞれの図で縦軸のスケールを変更した．距離 $r = 1, 2\text{ m}$ では，磁場の x 軸成分には周波数 1 Hz の正弦波の形が表れている．一方で，距離 $r = 3\text{ m}$ では磁場の x 軸成分が正弦波の形から崩れ始め，距離 $r = 4\text{ m}$ では正弦波の形状がほぼ消失している様子が分かる．

図 4.23 は，図 4.22 のそれぞれのデータを離散フーリエ変換し，そのパワースペクトルを示したものである．スマートフォンのサンプリング周波数 100 Hz で 1 秒間計測したデータをフーリエ変換したため，この図の周波数領域は $0\sim 50\text{ Hz}$ ，分解能は 1 Hz である．図を見やすくするため，縦軸を $10^{-2}\sim 10^5\ \mu\text{T}^2$ の対数軸とした．図が示すように，距離 $r = 3\text{ m}$ までのパワースペクトルでは磁石の回転数である 1 Hz にピークが表れている．しかし，距離 $r = 4\text{ m}$ ではパワースペクトルの 1 Hz の周波数成分はノイズと同程度の大きさになっており，距離が遠ざかるにつれて回転磁石マーカによる磁気の判別が困難になっていく様子が分かる．

計測した磁気データから回転磁石マーカによる磁場を検出するため，計測した磁場の x 軸成分をウェーブレット変換した．フーリエ変換では計測した磁場の周波数成分を用いて回転磁石マーカによる磁場の判別を試みたが，図 4.23 が示すように距離が離れるにつれてノイズの影響が強くなり，回転磁石マーカから 4 m 離れた場所ではその磁場の検出は不可能であった．そこでウェーブレット変換で時間に対する磁場の変化を調べれば，回転磁石マーカによる磁場の特徴が残っている可能性があると考えたからである．

図 4.24 にウェーブレット変換に用いた基底関数の例を示す．基底関数には幅 $1\sim 31$ のメキシカンハット関数を用いた．図 4.25 は図 4.22 のそれぞれのデータをウェーブレット変換し，基底関数の強度の分布を示したものである．距離 $r = 1, 2\text{ m}$ の結果では，幅 20 以下の基底関数で余弦波の周期性が明確に表れている．距離 $r = 3\text{ m}$ の結果

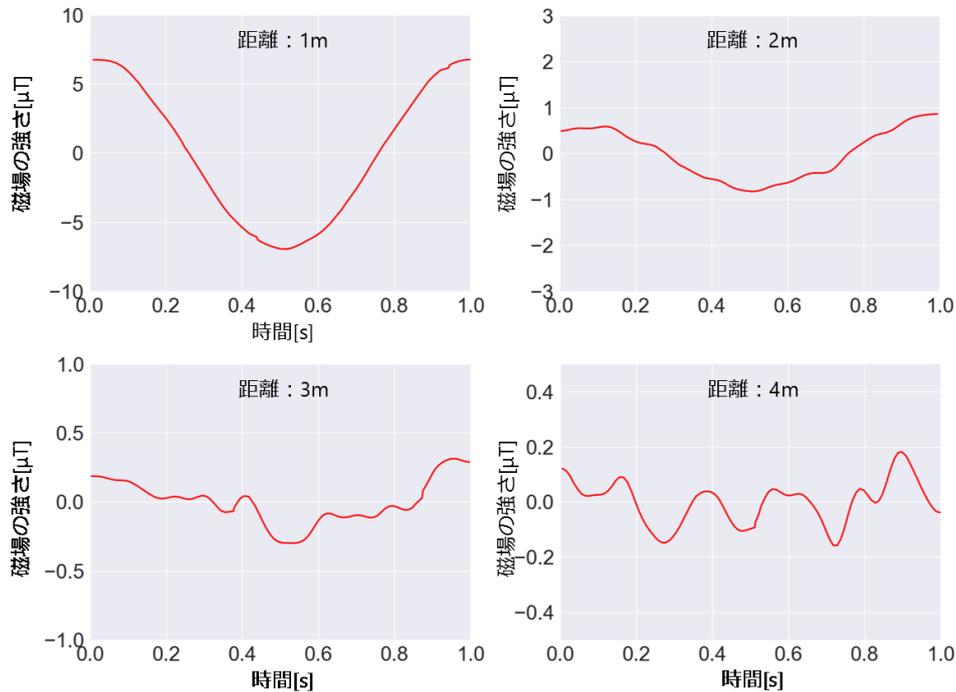


図 4.22: 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ での磁場の x 軸成分, (左上) 距離 $r = 1\text{ m}$, (右上) 距離 $r = 2\text{ m}$, (左下) 距離 $r = 3\text{ m}$, (右下) 距離 $r = 4\text{ m}$

では、幅 15 以上の基底関数ではやや周期性に乱れが生じているものの、幅が小さい基底関数の部分ではまだ余弦波の特徴が表れている。一方で距離 $r = 4\text{ m}$ の結果では、用いた基底関数のすべての幅で余弦波の特徴が減少しているため、このウェーブレット変換の結果から回転磁石マーカによる磁場の影響を判別するのは困難である。以上の検討から、少なくとも今回の手法ではスマートフォンの磁気センサを用いて回転磁石マーカによる磁場の影響を距離 $r = 4\text{ m}$ 以上の距離で検知するのは困難であると考えられる。

4.4.7 非対称磁石を用いた方位角推定の検討

4.3.1 節で触れたように、今回の方位角 θ の推定手法では正解方位角 θ の他に角度 $\theta + \pi$ が方位角 θ として推定される問題がある。これは磁石の形状が 180° の回転に対して対称であるため、磁気ノルムの周期が 180° になることに由来する。そこで本節では、回転磁石マーカが発生させる磁場を空間的に非対称にすることでこの問題の解決を試みた。非対称な磁場を発生するための磁石の形状は様々なものが考えられるが、今回は次の二つの手法を考えた。一つ目は、使用する磁石の片方を弱い磁石にし、非対称磁場を発生する手法である。この場合、磁気ノルムが極大値を取るタイミングは 180° 周期のままだが、極大値の値が異なるため、二つの方位角 θ を区別可能である。

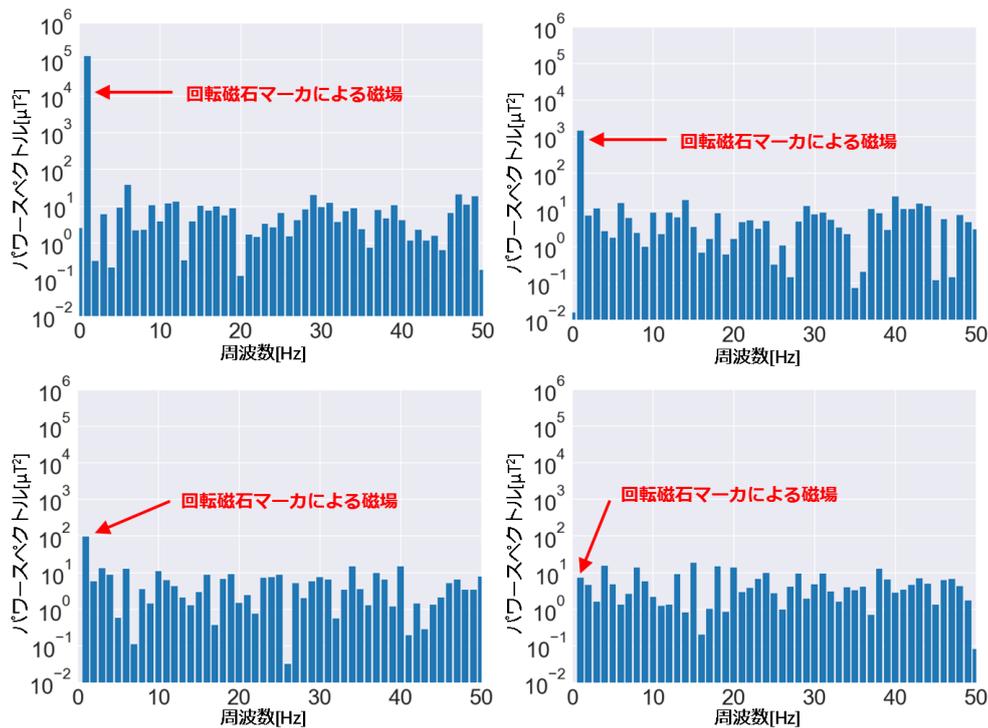


図 4.23: 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0$ での磁場の x 軸成分のパワースペクトル, (左上) 距離 $r = 1$ m, (右上) 距離 $r = 2$ m, (左下) 距離 $r = 3$ m, (右下) 距離 $r = 4$ m

二つ目は、磁石の強さはそのまま、磁石の配置を非対称にして非対称磁場を発生させる手法である。この方法では、計測される磁気ノルムの極大値は同じだが、極大値を取るタイミングが 180° 周期にならないため、二つの方位角 θ を区別可能である。

ここではまず、一つ目の手法で生じる非対称磁場を評価した。図 4.26 はモータ部分に大きさの異なる磁石を配置した回転磁石マーカである。図 4.27 にこの回転磁石マーカの磁石の配置を示す。磁石の配置は基本的に図 3.1 と同じだが、S 極側の磁石の形状が直径 15 mm, 長さ 30 mm になっている。また、この磁石には保磁力 10500~11000 Oe, 残留磁束密度 11400~11700 G のものを用いている

この回転磁石マーカが生み出す磁場の特徴を調べるため、4.2.2 節で用いた磁場解析ソルバ Qm を用いてシミュレーションした。シミュレータの各設定は以下の通りである。磁石の BH 曲線は上で示した値、回転運動などの設定は 4.2.2 節と同じにした。N 極側の磁石の形状を幅 2.5 cm, 高さ 2.5 cm, 奥行 3 cm の直方体、S 極側の磁石の形状を幅 1.5 cm, 高さ 1.5 cm, 奥行 3 cm の直方体とし、2 個の磁石を図 4.27 と同じになるように配置した。図 4.28 は磁場ベクトルのシミュレーション結果を示す。磁石を対称的に配置した図 3.1 の場合と比較して、磁石付近での磁気ベクトルが非対称になっている様子が分かる。図 4.29 はシミュレーションした磁気成分を示す。距離 $r = 25$ cm では、磁気成分が描く図形は楕円の片側をすぼめたような形状をしている。これは磁石の片側の強さを弱めた影響だと考えられる。しかし距離 $r = 1$ m では、磁気成分が描く図形はほぼ楕円のような形状になっており、非対称磁場の影響が減少している様

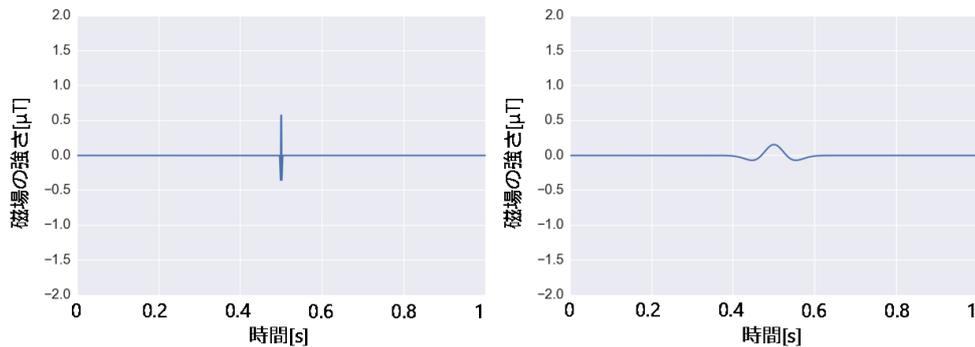


図 4.24: 基底関数に用いたメキシカンハット, (左) 幅 1, (右) 幅 31

子が分かる。これらのシミュレーション結果から、距離 $r = 1 \text{ m}$ 以上では非対称磁場の影響の検知が困難になると考えられる。

次に、スマートフォンでこの回転磁石マーカによる磁場を計測した。計測場所は方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = 0^\circ$ で固定し、距離 $r = 0.25 \sim 1.5 \text{ m}$ の範囲を 0.25 m 刻みの 6 か所で計測した。その他、各場所での計測時間などの設定は 4.5 節の実験と同じである。以下、実験の結果を示す。図 4.29 は実際にスマートフォンが計測した磁気成分とシミュレーションによる磁気成分との比較を示した図である。距離 $r = 0.20 \text{ m}$ では、磁気成分が描く図形がシミュレーションの結果と類似しており、非対称磁場の影響を検知できていると考えられる。一方で距離 $r = 1.0 \text{ m}$ 以上では、磁気成分が描く形状がほぼ楕円形になっており、非対称磁場による影響の判別が困難になっている様子が分かる。また距離 $r = 20 \text{ cm}$ での計測結果がシミュレーションと比較して、図形が z 軸に対して少し回転している様子が分かる。この理由は、計測時はスマートフォンの中心部を基準に計測場所に設置したが、実際には磁気センサはスマートフォンの中央部に搭載されているわけではないため、近い距離 r では方位角 θ 方向にずれが生じたのだと考えられる。実際に距離 $r = 1 \text{ m}$ での計測ではシミュレーション結果と比較して z 軸方法に回転していないことから分かる。

次に、二つ目の手法で生じる非対称磁場を評価した。実際に非対称な磁石を作成する代わりに 3 章で用いた円柱型磁石を L 字型に配置したものを使用した。図 4.30 は実際に開発した L 字型に円柱磁石を配置した回転磁石マーカである。図 4.31 にこの回転磁石マーカの磁石の配置を示す。磁石は同様に、保磁力 $10500 \sim 11000 \text{ Oe}$ 、残留磁束密度 $11400 \sim 11700 \text{ G}$ のものを用いている。

この回転磁石マーカが生み出す磁場の特徴を調べるため、4.2.2 節で用いた磁場解析ソルバ Qm を用いてシミュレーションした。シミュレータの各設定は以下の通りである。磁石の BH 曲線、回転運動などの設定は 4.2.2 節と同じである。磁石の形状は幅 2.5 cm 、高さ 2.5 cm 、奥行 3 cm の直方体とし、2 個の磁石を図 4.31 と同じになるように配置した。図 4.32 は磁場ベクトルのシミュレーション結果を示す。磁石を対称的に配置した 4.4 節の場合と比較して、磁石付近での磁気ベクトルが非対称になっている様子が分かる。図 4.33 はシミュレーションした磁気成分を示す。距離 $r = 20 \text{ cm}$

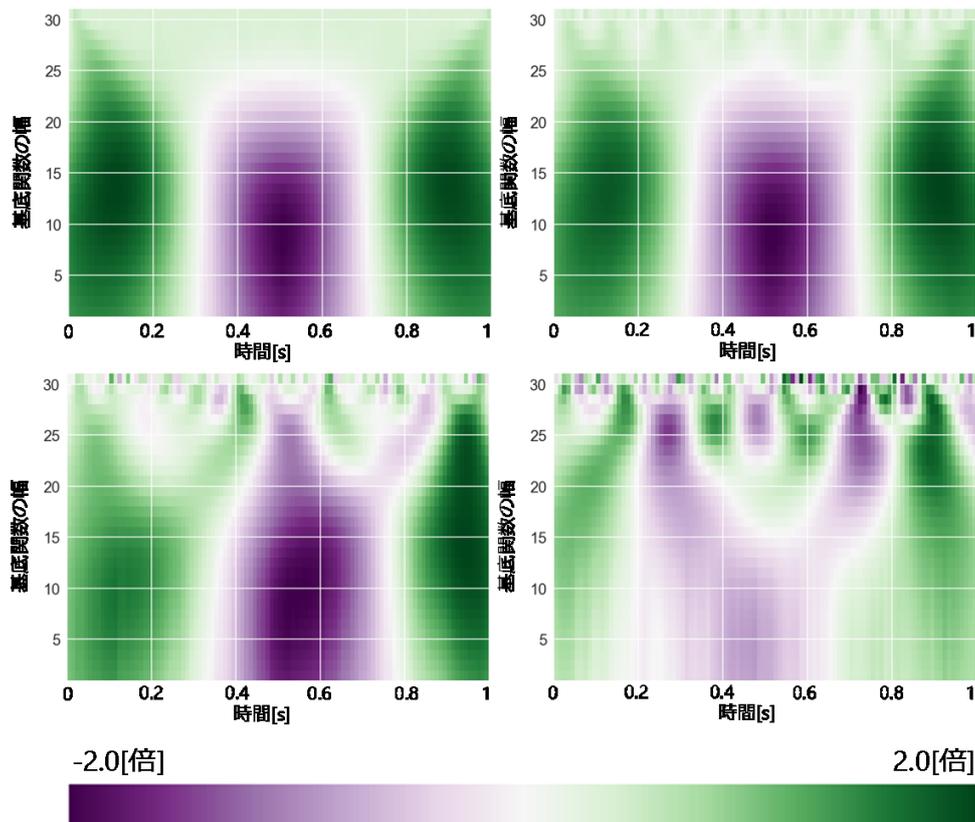


図 4.25: 方位角 $\theta = 0$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ での磁場の x 軸成分のウェーブレット変換, (下) 凡例, (左上) 距離 $r = 1$ m, (右上) 距離 $r = 2$ m, (左下) 距離 $r = 3$ m, (右下) 距離 $r = 4$ m

では、磁気成分が描く図形は楕円をゆがめたような形状をしており、非対称磁場の影響が出ていると考えられる。しかし距離 $r = 1$ m では、磁気成分が描く図形はほぼ楕円のような形状になっており、非対称磁場の影響が減少している様子が分かる。これらのシミュレーション結果から、距離 $r = 1$ m 以上では非対称磁場の影響の検知が困難になると考えられる。

次に、この回転磁石マーカによる磁場をスマートフォンで計測した。実験の設定は以下の通りである。計測場所は方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$ で固定し、距離 $r = 0.25 \sim 1.5$ m の範囲を 0.25 m 刻みの 6 か所で計測した。その他、各場所での計測時間などの設定は 4.5 節の実験と同じである。以下、実験の結果を示す。図 4.33 は実際にスマートフォンが計測した磁気成分とシミュレーションによる磁気成分との比較を示した図である。距離 $r = 0.25$ m では、磁気成分が描く図形がシミュレーションの結果と類似しており、非対称磁場の影響を検知できていると考えられる。一方で距離 $r = 1.0$ m 以上では、磁気成分が描く形状がほぼ楕円形になっており、非対称磁場による影響の判別が困難になっている様子が分かる。また $r = 25$ cm での計測結果がシミュレーション結果と比較して、図形が z 軸に対して少し回転しているが、距離 $r = 1$ m では解消されている

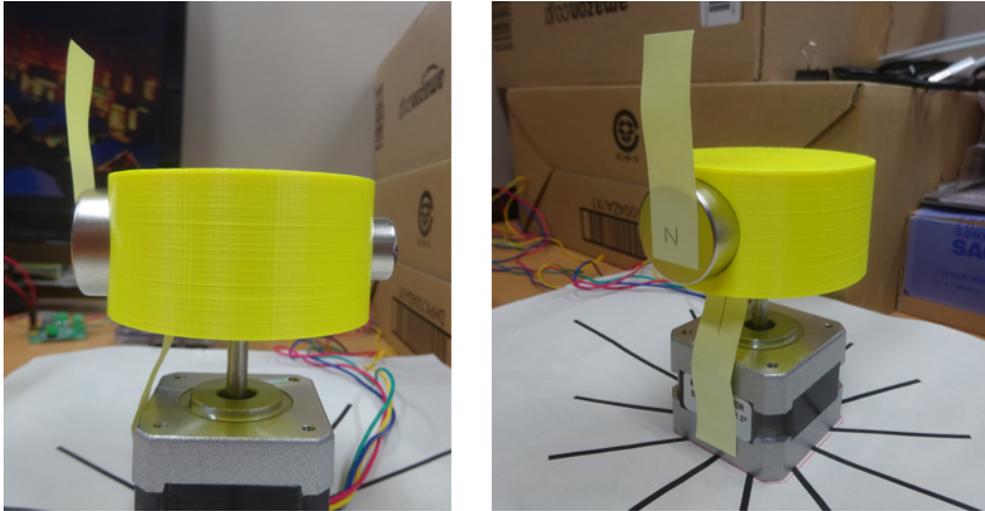


図 4.26: 大きさの異なる磁石を配置した回転磁石マーカ

ことから、先ほどの回転磁石マーカでの結果と同様の理由と考えられる。

以上の評価実験から、非対称磁石を用いた方位角 θ 推定には二つの課題が存在することが分かる。一つ目の課題は、今回の磁石の配置では距離 $r = 1 \text{ m}$ 以上の領域で非対称磁場の影響をスマートフォンでほとんど検知できない点である。4.4.6 節では回転磁石マーカによる磁場を距離 $r = 3 \text{ m}$ まで検知できることを確認したが、磁場の非対称性の影響が距離 $r = 1 \text{ m}$ 程度では推定可能範囲が狭くなってしまう。より強力な磁石の使用は3章で述べた通り安全性の面から難しいため、解決策として非対称磁場の影響がより遠方まで届くような磁石の配置を検討する必要がある。二つ目の課題は、非対称に配置された磁石が生み出す磁場の直交座標成分は正弦波で近似できないため、4.3.5 節で提案したノイズ軽減手法が使えない点である。この課題の解決には非対称な磁石が生み出す磁場の理論式を導出し、それらの式からスマートフォンが計測する非対称磁場の近似曲線を求めなければならない。

4.5 3次元位置推定の評価実験

本節では、4.3 節で提案した3次元位置推定手法の評価実験について述べる。まず、評価実験での回転磁石マーカの設定や推定した3次元位置、計測時間について説明する。次に、方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r を推定した場合の評価実験の結果について述べる。

4.5.1 3次元位置推定の実験設定

本章ではこれまで方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r を別々に推定し、それぞれの推定精度を評価した。本節では、これまでの結果を踏まえて方位角 θ 、仰角 ψ 、距離 r を同時に推定し、それらの推定精度を評価した。なお4.3.4 節でスマートフォンの姿勢推定

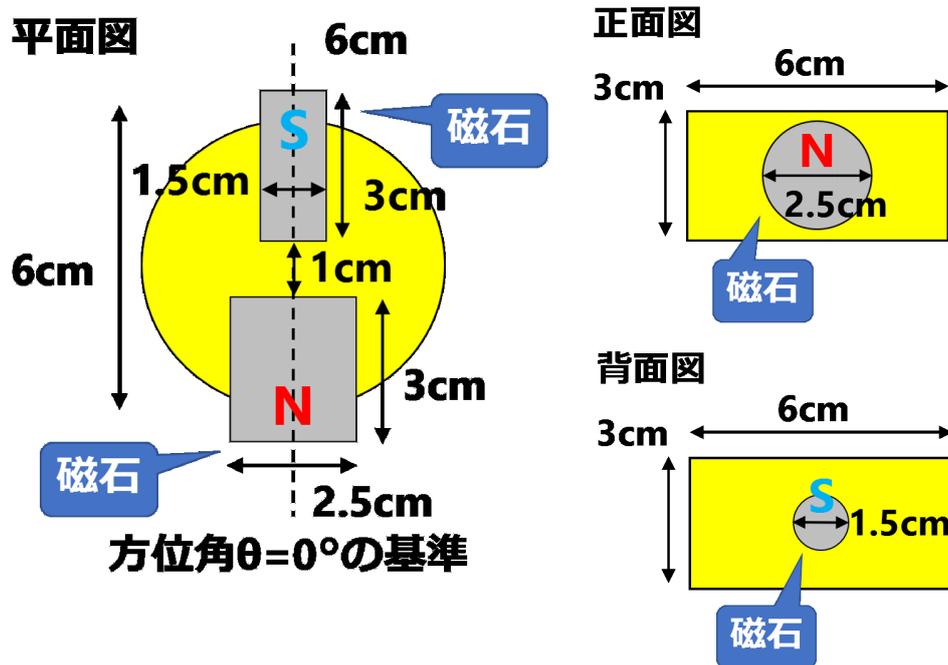


図 4.27: 回転磁石マーカの磁石の配置

について検討したが、今回はスマートフォンの姿勢と回転磁石マーカの関係は図 4.14 に固定した。

今回の実験で推定する 3 次元位置は以下のようにして決定した。方位角 θ の推定精度は 4.4.2 節での実験結果から、方位角 θ に依存しないと考えられる。例えば、表 4.2 が示すように方位角 $\theta = 0^\circ$ での推定精度と方位角 $\theta = 45^\circ$ の推定精度は同程度である。そのため、方位角 θ は $\theta = 0^\circ$ に固定する。

また今回の実験で推定する仰角 ψ は以下のように決定した。本章での推定手法では 4.3.2 節で述べた通り、仰角 $\psi = \pm 90^\circ$ の時は式 (4.15) が発散するため推定できない。そのため、推定する仰角 ψ の範囲を $-60^\circ \sim 60^\circ$ とし、 30° 刻みで計測した。

また今回の実験で推定する距離 r は以下のように決定した。3 章で述べたように、磁気カードへの影響が出ないように歩行者が回転磁石マーカに 15 cm 以上近づかないことを想定している。また 4.4.6 節で検討したように、スマートフォンの磁気センサでは距離 $r = 3$ m 以上の場所で回転磁石マーカによる磁場の影響を検知するのは難しい。そのため、計測する最小距離 $r = 0.5$ m、最大距離 $r = 3$ m とし、0.5 m の間隔で距離を推定した。

以上より、今回の実験で推定する 3 次元位置は方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = -60^\circ, -30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 、さらにそれぞれの仰角 ψ について距離 $r = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$ m の計 30 か所とする。図 4.34 に今回の実験で推定する 3 次元位置を示す。実験 1 回あたりの磁気の計測時間は 15 秒、推定精度の平均と標準偏差を算出するため、各 3 次元位置で 10 回ずつ磁気を計測した。

4.5.2 3次元位置推定の評価

まず、方位角 θ の推定精度を評価する。4.4.2と同様に推定される二つの方位角 θ を θ_1, θ_2 とする。図4.35は磁気データにノイズ軽減処理を施す過程を示したものである。この図では見やすくするため、磁場の3次元成分をxy平面に投影した。(左上)は10秒分の磁気データを平均化した磁気データである、この段階で既にノイズの影響は軽減されているが、点の位置がややばらけた状態になっている。(右上)は移動平均を用いて平滑化した磁気データである。前のデータと比較して点と点との間が滑らかになり、楕円に近い形状を描いていて様子が分かる。(左下)は平滑処理後の磁気データにカーブフィッティングを施し、求めたパラメータで求めた近似曲線である。これらの様子から、ノイズ軽減処理によって磁気データが滑らかになっていく様子が分かる。

図4.36に θ_1 の推定結果を示す。推定結果は平均を少数点以下四捨五入、標準偏差は小数点以下1桁を四捨五入した。また、方位角 θ は本来 $0^\circ \sim 359^\circ$ の値を取るが、平均を算出する都合上ここでは $-180^\circ \sim 180^\circ$ の値を取るとした。距離 $r = 1\text{ m}$ までの推定では、いずれの結果も平均 $\pm 15^\circ$ 以下、標準偏差 6° 以下である。一方で、距離 $r = 2.5\text{ m}$ 以降では、平均、標準偏差とも大きくなっている傾向が分かる。また、同じ距離 r での推定でも、仰角 ψ の絶対値が増加していくと標準偏差も増加していく様子が分かる。距離 r の増加に伴って標準偏差が増加していく原因は、遠方では回転磁石による影響が弱まるため、4.3.5節で示した方法ではノイズの影響が十分に軽減できなくなるためと考えられる。また、同じ距離 r でも仰角 ψ の絶対値が大きい方が標準偏差が大きいのは、4.2.2節でも述べたように、仰角 ψ の絶対値が増加すると磁気ノルムが距離に依存して減少しやすくなるため、仰角 $\psi = 0^\circ$ の時と比べて推定が難しくなるからだと考えられる。図4.37に θ_2 の推定結果を示す。方位角 θ_1 の推定結果は方位角 θ_2 の推定結果とほぼ同じであることが分かる。この理由は、方位角推定にはノルムが極大値を取るタイミングが利用されるが、極大値を取る間隔は0.5秒間隔であるため、方位角 θ_1 推定時の極大値を取るタイミングのずれがそのまま方位角 θ_2 推定時に反映されるためである。

次に、仰角 ψ の推定精度を評価する。図4.38に仰角 ψ の推定結果を示す。推定結果は平均を小数点以下四捨五入、標準偏差は小数点以下1桁を四捨五入した。仰角 $\psi = 0^\circ$ では、距離 $r = 2\text{ m}$ 以下の推定では平均 3° 以下、標準偏差 2.2° 以下だが、距離 $r = 2.5\text{ m}$ を超えると、平均、標準偏差が共に大きくなる様子が見られる。この傾向は仰角 $\psi = 30^\circ$ での推定でも見られ、仰角 $\psi = 0^\circ$ での推定と良く似ている。一方で、仰角 $\psi = \pm 60^\circ$ の推定では、距離 $r = 1.5, 2\text{ m}$ の時に推定精度が最も高く、比較的近い距離 $r = 0.5, 1\text{ m}$ では推定精度が低下している様子が分かる。この原因として、位置推定手法を検討する上で、円柱磁石が生み出す磁場を磁気双極子が生み出す磁場として近似したが、この近似は磁石から十分に離れた距離でよりよく成立するため、近い距離では近似からのずれが生じたと思われる。全体の傾向として、平均、標準偏差ともに方位角 θ 推定の時よりも高い精度であることが分かる。この原因として、方位角 θ 推定では推定に磁石の角度 ωt を用いるため、推定精度がモータの挙動に影響するが、仰角推定は磁気の振幅のみを用いるため、モータの性能の影響を受けにくい

ためだと考えられる。

図 4.3 は仰角推定時の磁気成分をプロットしたものである。図から回転磁石マークが発生させる磁気のベクトルがスマートフォンを中心に楕円に近い形状を描く様子が分かる。さらに仰角 ψ によってその楕円が傾いていき、仰角 $\psi = 60^\circ$ でほぼ垂直になっているが、これは 4.2.2 でのシミュレーション結果の図 4.4.3 と同じ傾向である。

最後に、距離 r の推定精度を評価する。4.3.3 節で述べた通り、任意の仰角 ψ で回転磁石マークからのスマートフォンの距離を推定するためには、式 (4.21) における定数 A, B を求める必要がある。そこで、定数 A, B を求めるために、スマートフォンを方位角 $\theta = 0^\circ$ 、仰角 $\psi = 0^\circ$ 、距離 $r = 1 \text{ m}$ の位置で磁気データを 15 秒間計測した。その後、計測した磁気データにノイズ軽減処理を施し、磁石の角度 $\omega t = 0^\circ$ 、 $\omega t = 90^\circ$ の時のノルムの値を調べた結果、 $A = 6.77 \mu\text{T}$ 、 $B = 3.04 \mu\text{T}$ であった。これらの定数を式 (4.22) に代入した式に推定した仰角と計測した磁気データを代入して回転磁石マークからの距離を推定した。

図 4.39 に仰角推定の結果を示す。推定結果は平均を小数点 2 桁以下を四捨五入、標準偏差は小数点 4 桁以下を四捨五入した。仰角 $\psi = 0^\circ$ の時、距離 2 m までは平均 2.01 m、標準偏差 0.078 m だったが、一方で、距離 $r = 2.5 \text{ m}$ を超えると平均、標準偏差ともに増加していることが分かる。仰角 $\psi = \pm 30^\circ$ の時も距離 $r = 2.5 \text{ m}$ を超えると平均、標準偏差ともに増加する傾向は同じであるが、全体として仰角 $\psi = 0^\circ$ の時よりも推定精度が低下する。仰角 $\psi = \pm 60^\circ$ の時はその傾向がより強まっており、仰角 $\psi = 30^\circ$ の時よりも推定精度が低下している様子が分かる。

4.6 本章のまとめ

本章での提案手法により、スマートフォンに搭載されているような安価な磁気センサを用いての高精度 3 次元位置推定が可能になった。本章ではまず、円柱磁石を磁気双極子として近似し、回転する磁石が生み出す磁場をモデル化した。次に、回転磁石が生み出す磁場の式と 3 次元位置との関係式を導出し、計測した磁場からデバイスの 3 次元位置を推定する手法を提案した。さらに、計測した磁気データに含まれるノイズを軽減し、推定精度を向上させる手法を提案した。評価実験の結果から、我々の目的とする誤差 10 cm 以下の推定精度を満たせるのは回転磁石マークから半径 3 m 以下の領域であると判明した。

本章での提案手法により、机の上や狭い部屋などの回転磁石マークから半径 3 m 以内に納まる領域であれば、1.2.1 節で紹介したワイヤレス給電伝送やパラメトリックスピーカーを用いた情報伝達などのサービスの実現に必要な推定精度を満たせる。今後は回転磁石マークの応用例を広げるため、さらなる推定可能範囲の拡大と推定精度の向上が望まれる。

本章での提案手法の推定精度を向上させる手法として、回転磁石が生み出す磁場の式の改良や、信号処理を用いたさらなるノイズ軽減処理手法の提案がある。今回は円柱型の磁石を磁気双極子として近似し、磁石が生み出す磁場をモデル化した。より

正確に円柱磁石が生み出す磁場をモデル化できれば位置推定の精度が向上する可能性がある。また4.4.6節で述べたように、回転磁石マーカから3m以上離れた距離では、ノイズの影響が回転磁石マーカによる動的磁場の影響を上回るために3次元位置推定が困難になった。この課題に対して、ノイズの影響をモデル化して4.2.1節で導いた理論式に組み込む手法や、信号処理の手法を用いて計測した磁場から動的磁場を検出する手法の提案が考えられる。

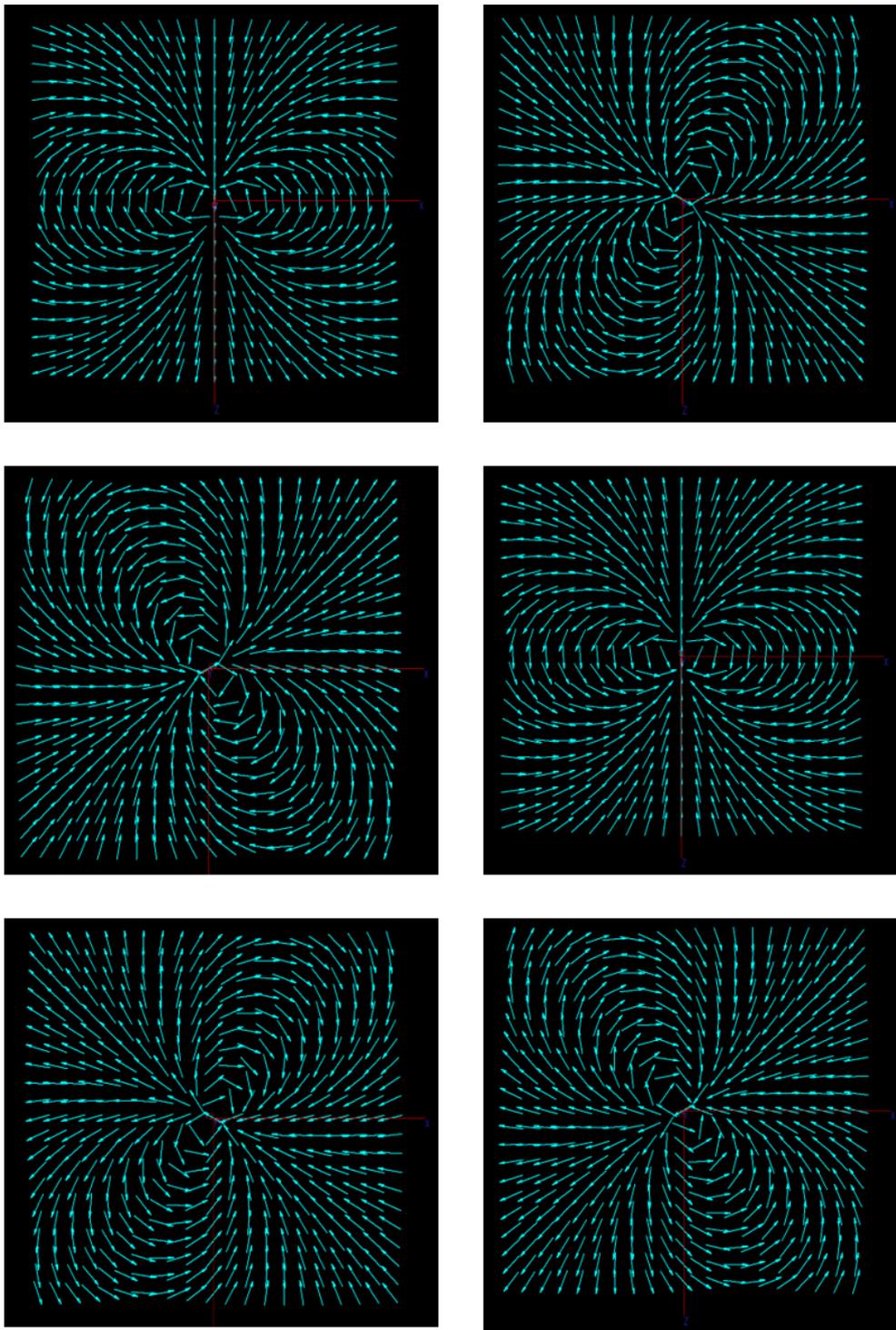


図 4.28: 強さの異なる磁石を配置した回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0 秒, (右上) 12/72 秒, (左中) 24/72 秒, (右中) 36/72 秒, (左下) 48/72 秒, (右下) 60/72 秒

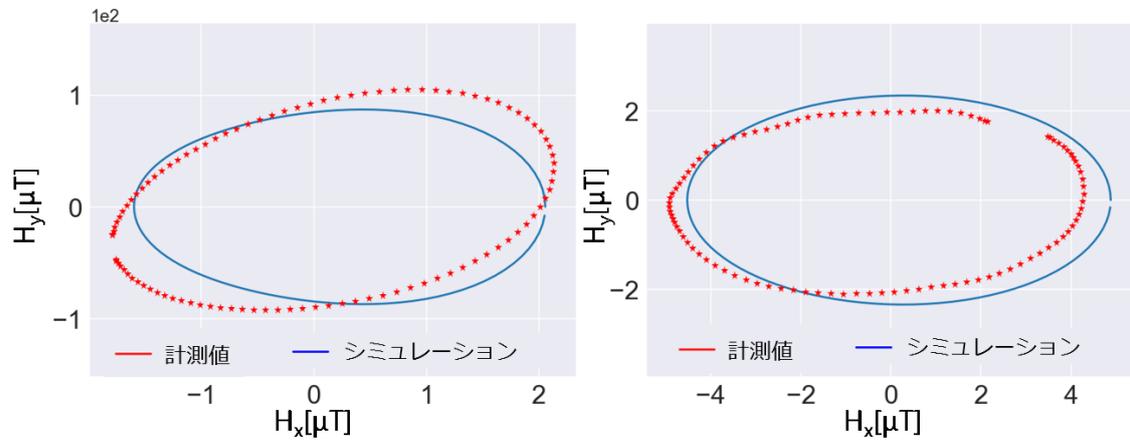


図 4.29: 計測値とシミュレーションの比較：(左) 距離 $r = 20\text{ cm}$ での磁気成分, (右) 距離 $r = 1\text{ m}$ での磁気成分

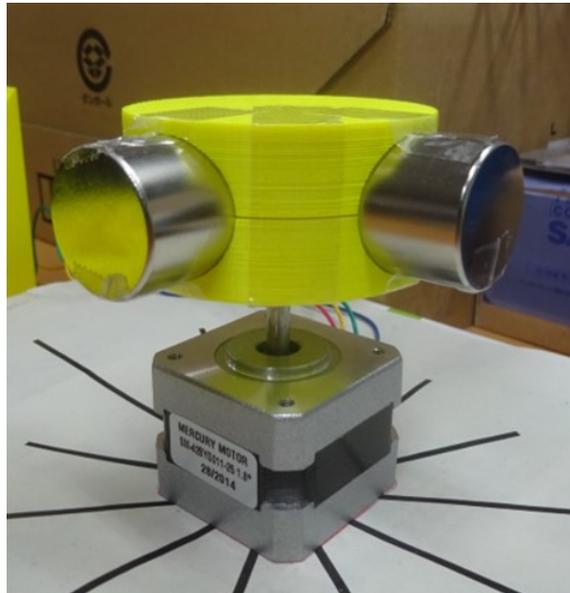


図 4.30: L字型に磁石を配置した回転磁石マーカ

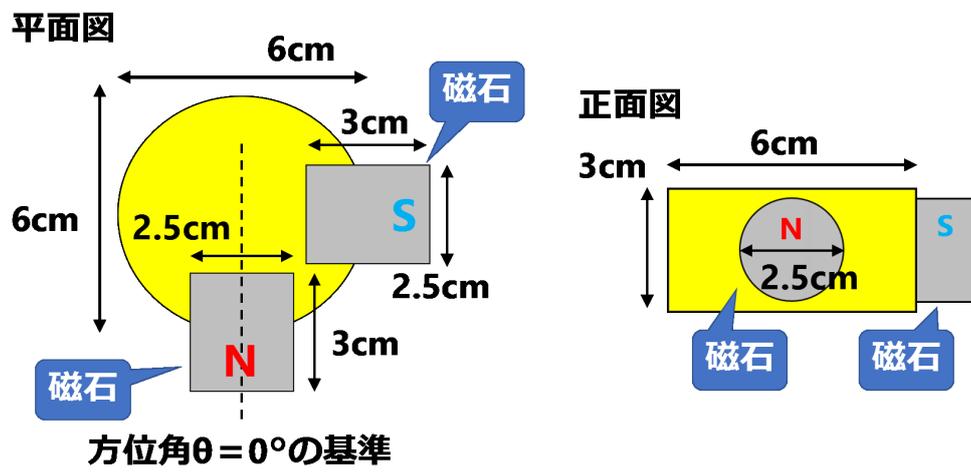


図 4.31: 回転磁石マーカの磁石の配置

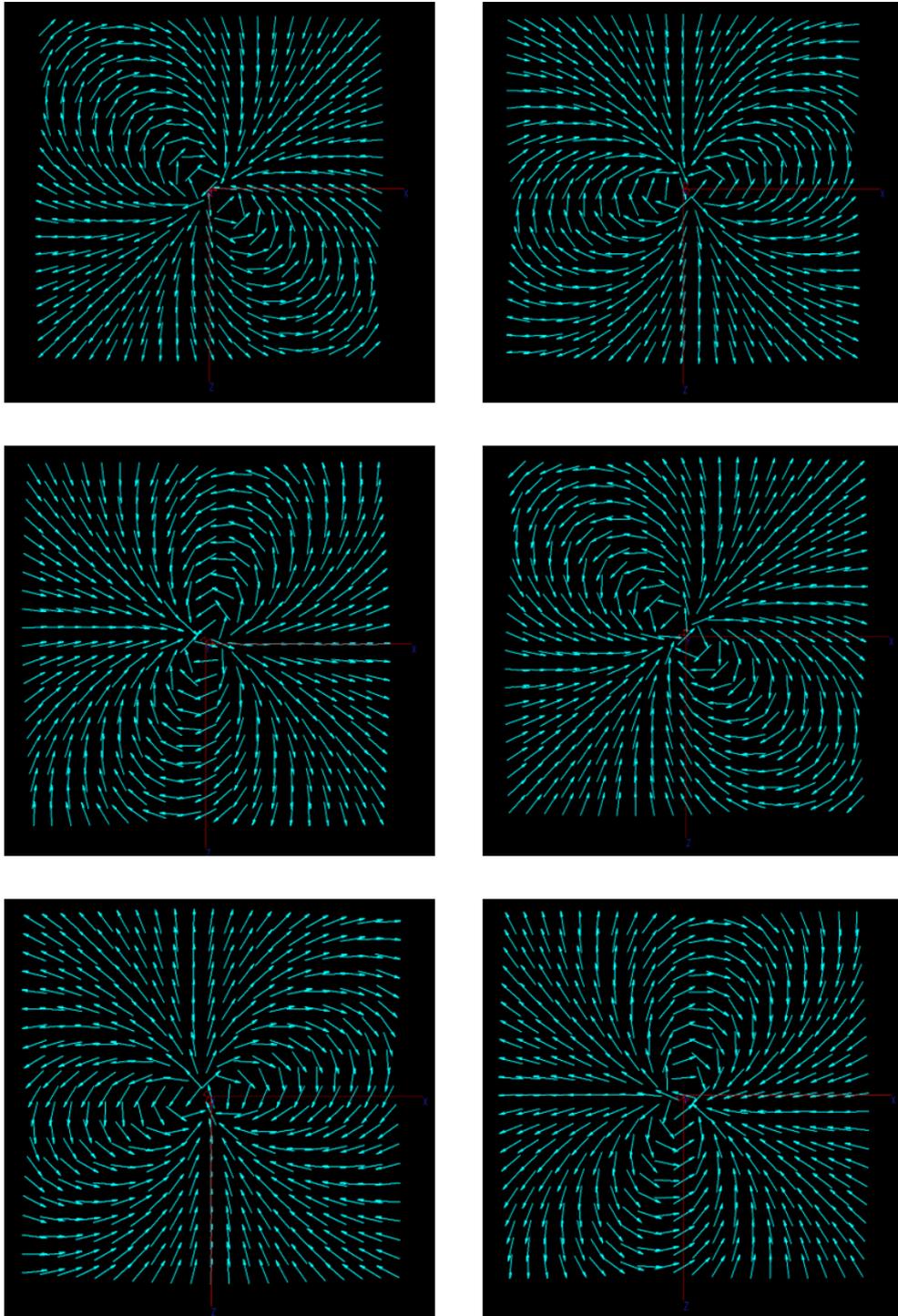


図 4.32: L字型に磁石を配置した回転磁石マーカによる磁場のシミュレーション結果, (左上) 0秒, (右上) 12/72秒, (左中) 24/72秒, (右中) 36/72秒, (左下) 48/72秒, (右下) 60/72秒

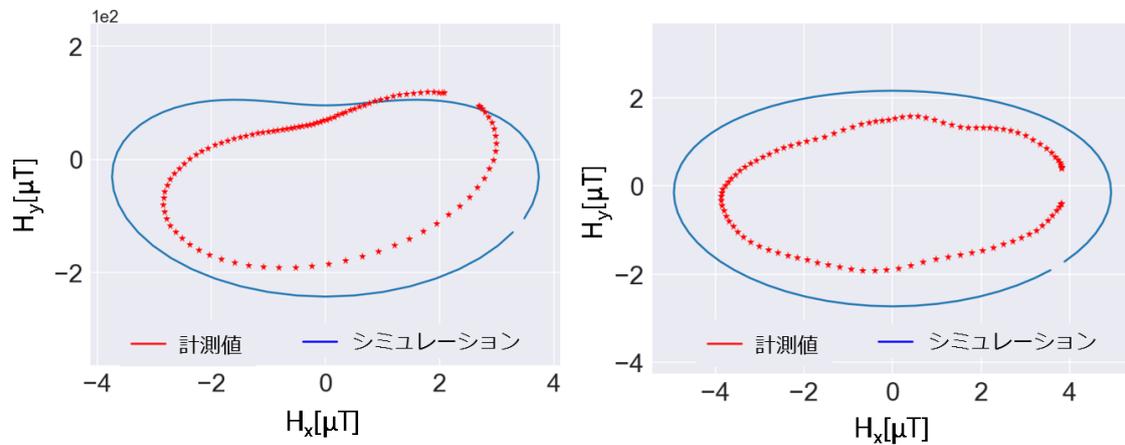


図 4.33: 計測値とシミュレーションの比較：(左) 距離 $r = 25 \text{ cm}$ での磁気成分, (右) 距離 $r = 1 \text{ m}$ での磁気成分

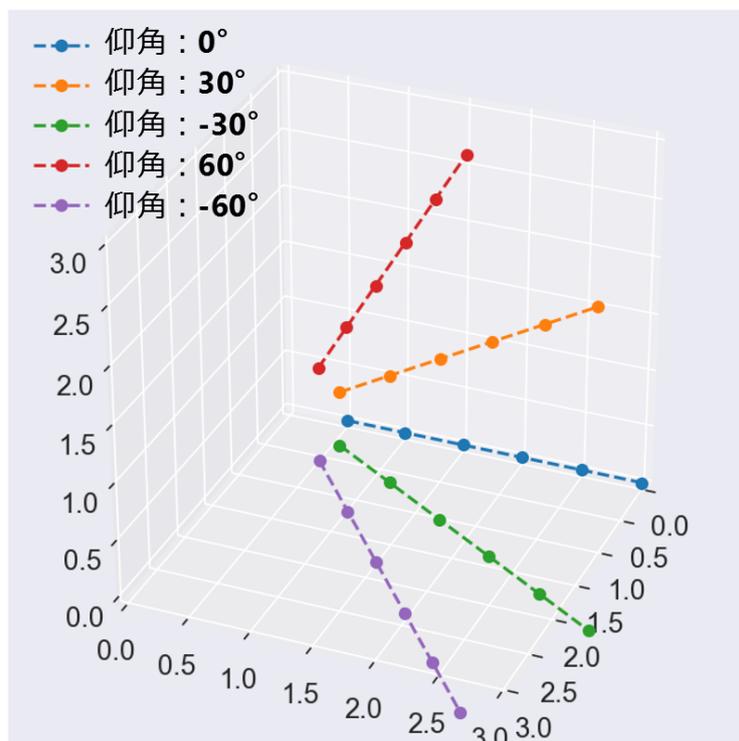


図 4.34: 同時推定の計測場所

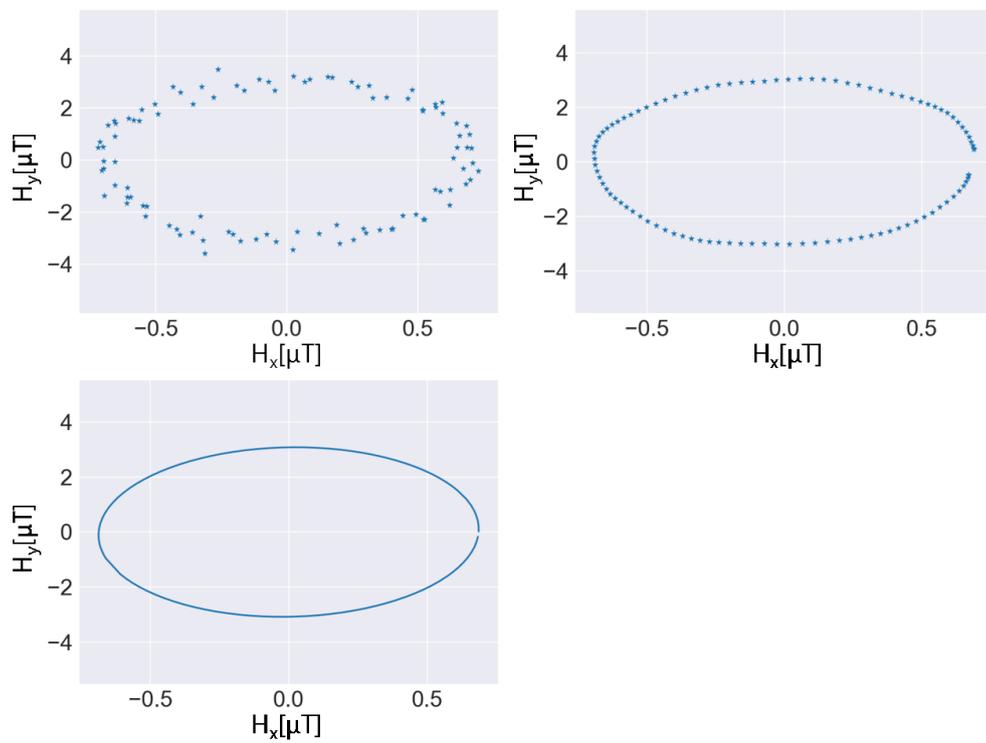


図 4.35: ノイズ軽減処理の様子 (方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 0\text{m}$), (左上) 平均化, (右上) 平滑化, (左下) カーブフィッティングによる近似曲線

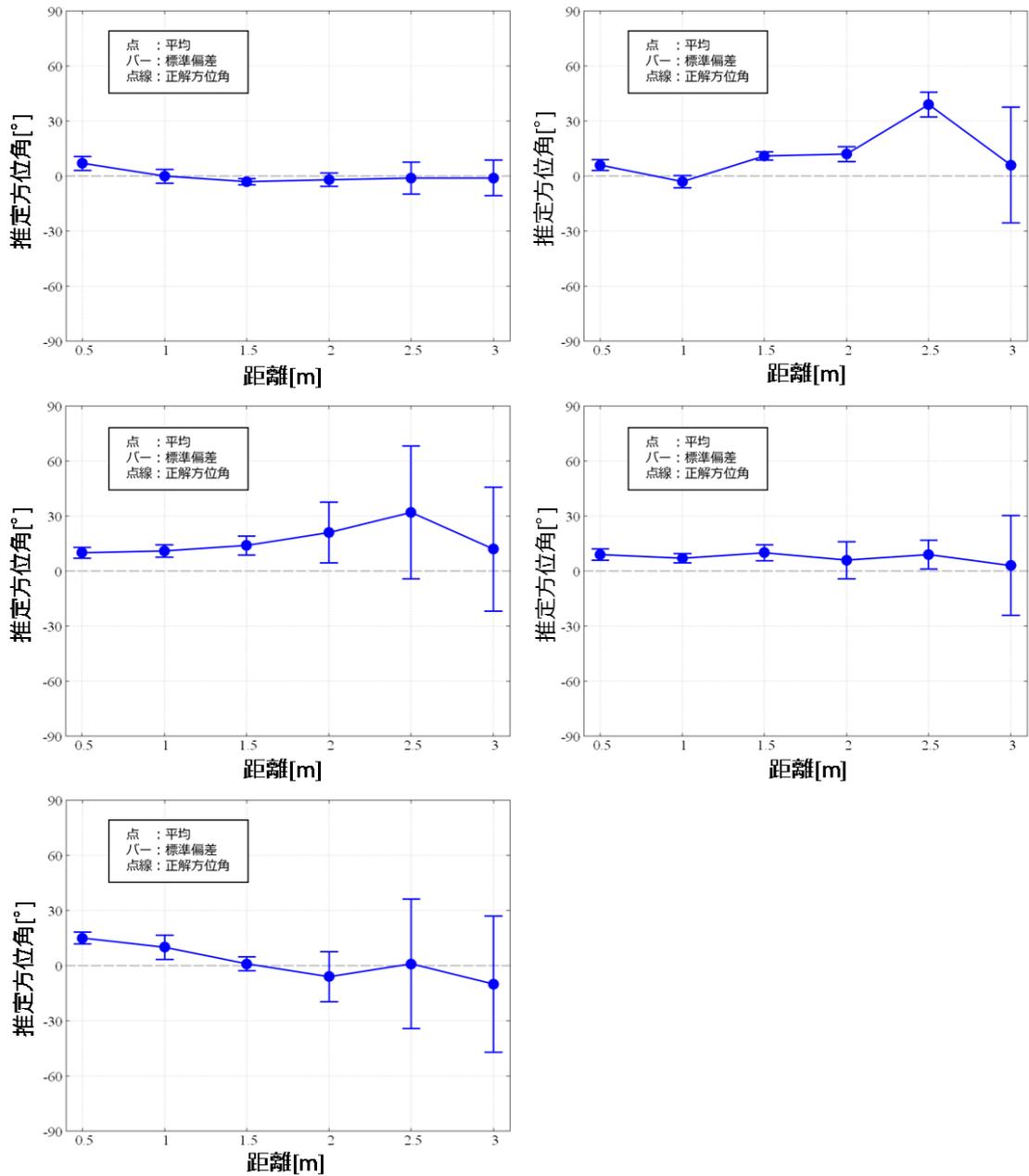


図 4.36: 方位角 θ_1 の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰 : 正解方位角 点 : 平均 バー : 標準偏差

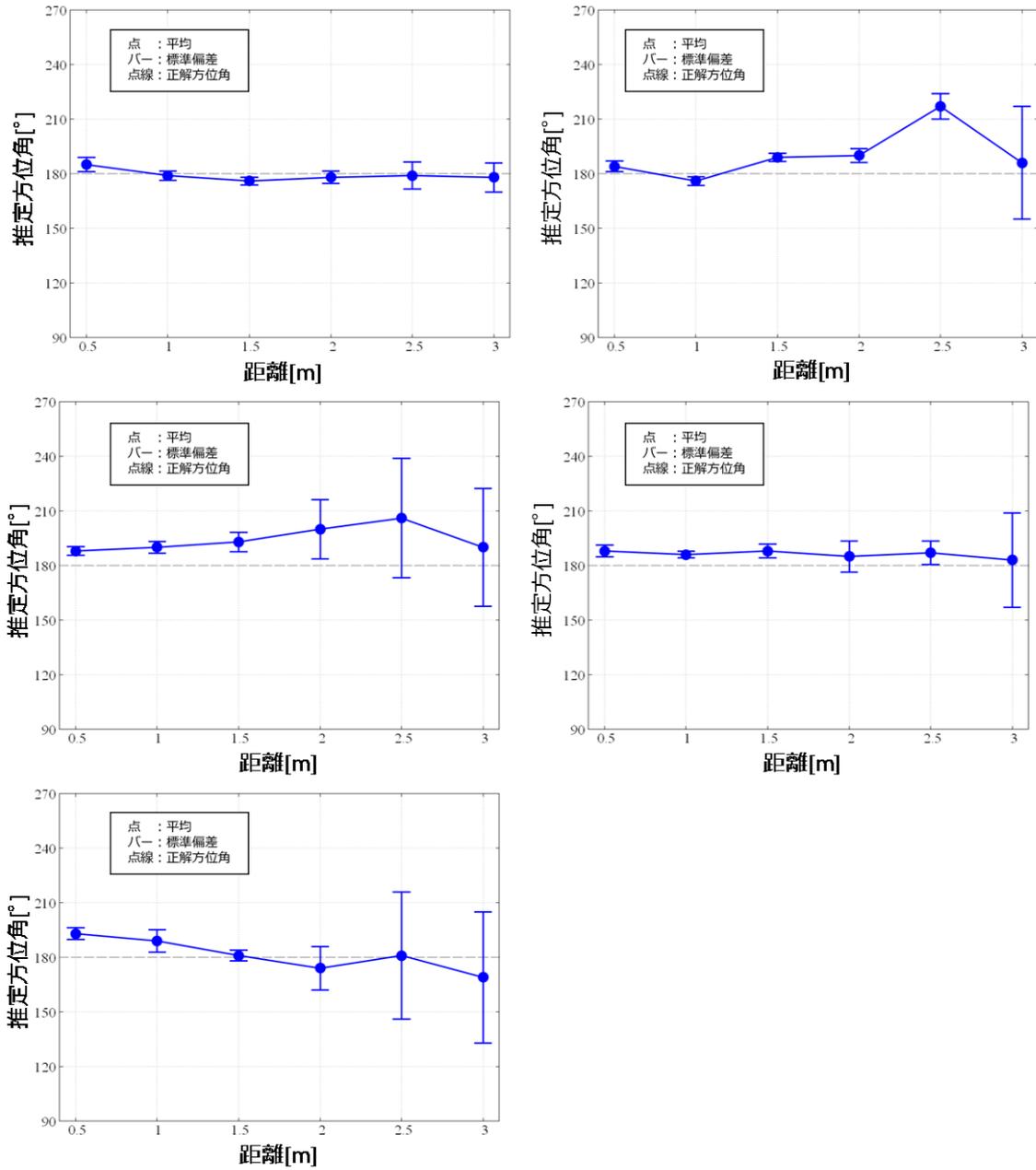


図 4.37: 方位角 θ_2 の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰: 正解方位角 点: 平均 バー: 標準偏差

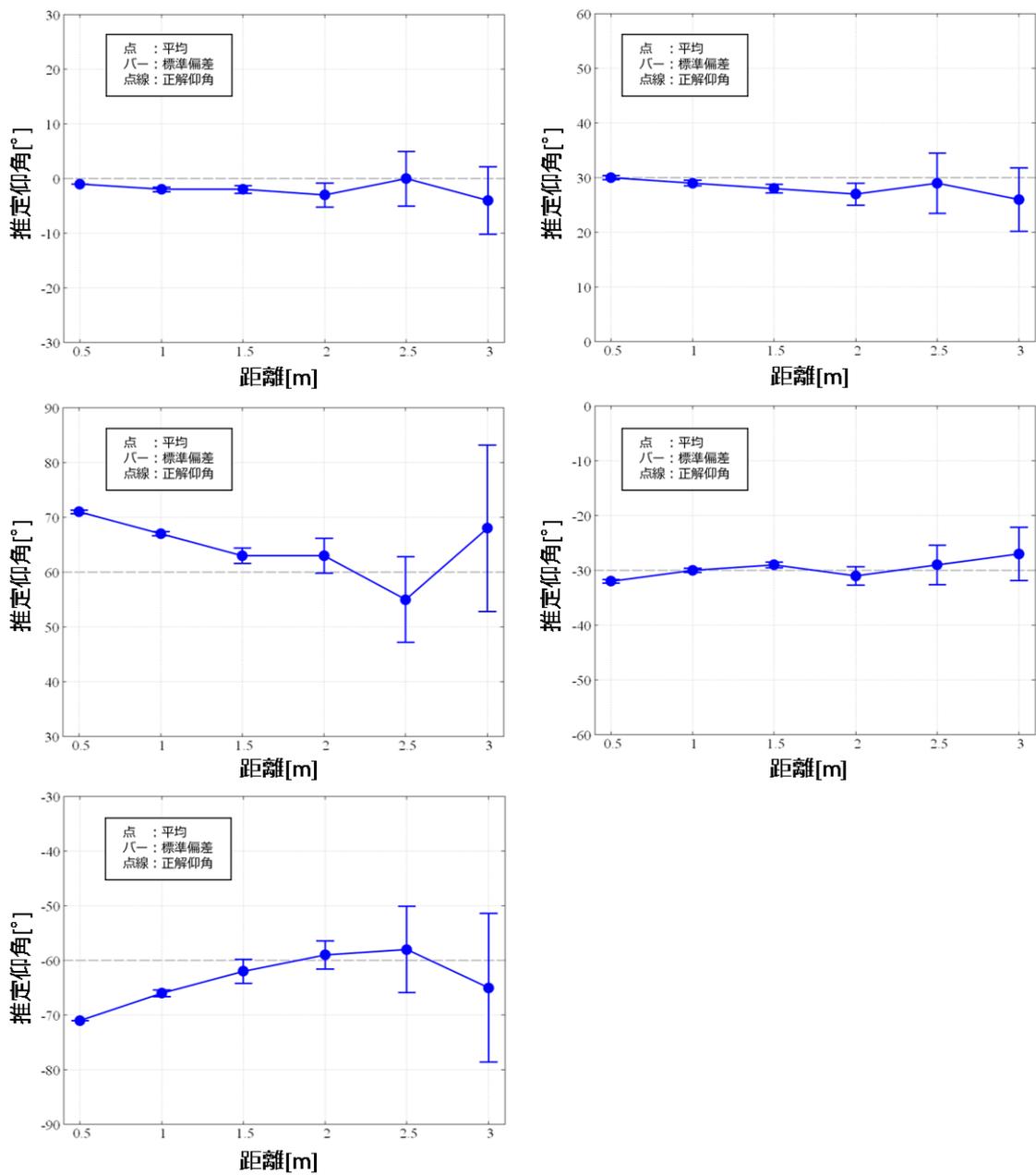


図 4.38: 仰角 ψ の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰: 正解仰角 点: 平均 バー: 標準偏差

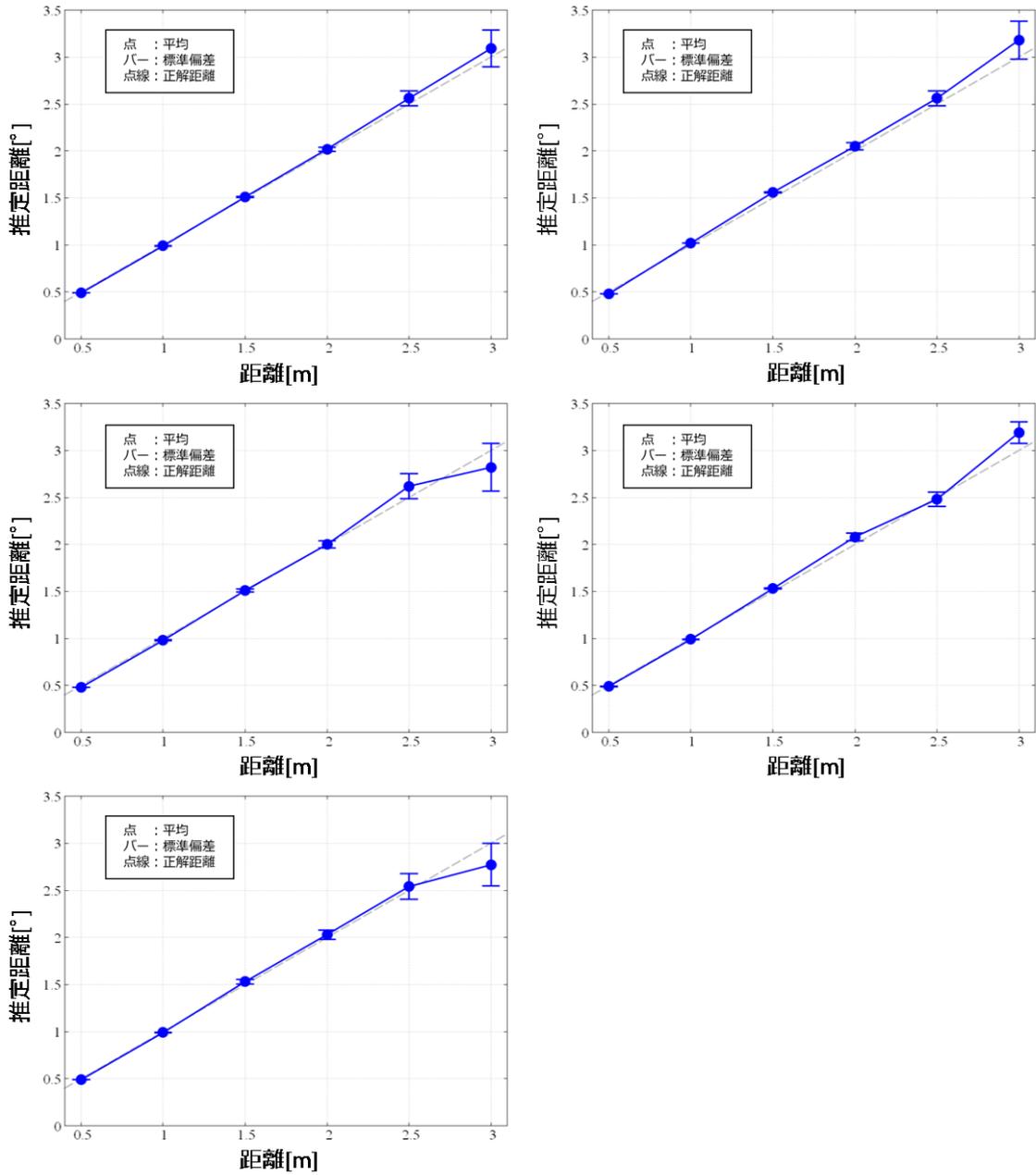


図 4.39: 距離 r の推定精度 (仰角 $\psi = 0^\circ$ 時) 灰: 正解距離 点: 平均 バー: 標準偏差

第5章 回転磁石マーカによる動的磁場を用いたスマートデバイスの移動経路推定

本章では回転磁石マーカを用いたスマートデバイスの移動経路推定手法について説明する。デバイスが移動している時、計測する回転磁石マーカによる磁場は静止している時とは異なる。そこで、まず移動しているデバイスが計測する回転磁石マーカによる磁場を定式化し、次にシミュレータによる結果と比較して、導出した磁場の式を評価する。さらにデバイスの移動経路を定式化し、カーブフィッティングを用いた経路推定手法を説明する。最後に、提案手法による移動経路推定の精度を評価する実験について述べる。

5.1 移動するスマートデバイスに対する磁場を用いた位置推定の課題

位置を推定したいデバイスが移動している時、デバイスが計測する回転磁石マーカによる磁場は非周期的になるため、磁場の振幅を推定に用いる4章で述べた手法は利用できない。磁石の回転数がデバイスの移動速度に対して十分に早い時、各回転周期ではデバイスが近似的に静止しているとみなせるため、デバイスが計測する磁場は周期的になり、4章で述べた手法を利用できる可能性がある。松本らの研究 [65] によると、様々な環境での人間の歩行速度を2984人で調査した結果、全体では1.32 m/sであった。そこで人の歩行速度を1 m/s、磁石の回転速度を10 Hzとする時、所持しているデバイスは磁石の回転周期中に10 cm移動するため、静止しているとみなすのは難しい。例えば、磁石の回転周期中のデバイスの移動を1 cm以下に抑えたい時、磁石の回転数を100 Hz以上にする必要があるが、2章で述べた通り、スマートフォンのサンプリング周波数は最大数100 Hzであるため、磁石の回転数を50 Hz以上にするとうサンプリング定理によりその磁場を計測できない。

回転磁石マーカを用いてデバイスの移動経路を推定するには、磁場の振幅を利用した4章の手法と異なり、移動中に計測した非周期的な磁場を利用する必要がある。移動中にデバイスが計測する磁場はその経路に依存するため、計測する磁場が移動経路によってどのように変化するかを定式化すれば、移動中にデバイスが計測した磁場

からその移動経路を推定できると考えられる。

5.2 移動経路上の回転磁石マーカによる磁場

5.2.1 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁場の定式化

デバイスの移動経路推定のため、回転磁石マーカによる磁場の影響下で移動しているデバイスが計測する磁場の式を導出する。ここではデバイスが2次元平面内を移動すると仮定し、回転磁石マーカが発生させる磁場を図5.1のように表す。ここで t は時刻、 ω は磁石の回転速度、 r, θ はそれぞれ2次元極座標の距離、方位角を示し、 H_r は磁場の動径方向の成分、 H_θ は動径方向に対して垂直な磁場の成分を示している。この時、磁石による磁場の直交座標成分 H_x, H_y は2次元極座標 (r, θ) を用いて以下のように書ける。

$$H_x = H_r \cos(\theta - \omega t) - H_\theta \sin(\theta - \omega t) \quad (5.1)$$

$$H_y = H_r \sin(\theta - \omega t) + H_\theta \cos(\theta - \omega t) \quad (5.2)$$

$$H_z = 0 \quad (5.3)$$

また4.2.1節と同様に磁石を磁気双極子として近似すると、式(4.2)(4.3)の H_r, H_θ は距離 r の3乗に反比例する値とみなせる。そこで H_r, H_θ を磁石によって定まる定数 A, B を用いて以下のように表す。

$$H_r = \frac{A}{r^3} \quad (5.4)$$

$$H_\theta = \frac{B}{r^3} \quad (5.5)$$

式(5.4)(5.5)を式(5.1)(5.2)(5.3)に代入すると以下の式が導出できる。

$$H_x = \frac{A+B}{2r^3} \cos(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \cos(\omega t) \quad (5.6)$$

$$H_y = \frac{A+B}{2r^3} \sin(2\theta - \omega t) + \frac{A-B}{2r^3} \sin(\omega t) \quad (5.7)$$

さらに上式(5.6)(5.7)から磁気ノルムを導出すると以下の式になる。

$$H = \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t)} \quad (5.8)$$

上式(5.6)(5.7)または式(5.8)の r, θ にデバイスの移動経路を表す式を代入すれば、その経路上でスマートフォンが計測する磁気ノルムや、磁場のx軸、y軸成分を求められる。

5.2.2 移動経路の定式化

4章で提案した位置推定手法ではデバイスが静止しているとし、計測した磁場の振幅とモータの回転角から位置を推定したが、デバイスの移動に伴って計測される磁場の振幅は変化する。そのため、デバイス移動時には磁場の振幅のみだけでなく、移動中に計測する磁場全体を推定に用いる必要がある。今回はデバイスの移動経路が直線的な経路と途中で折れ曲がる経路で表せると仮定し、それぞれの経路の定式化とそれらの経路で計測される磁場を定式化する。

まず、デバイスが直線的に移動する経路について定式化する。図5.2にデバイスの直線的な移動経路を示す。この時のデバイスの経路を初期位置 x_{init}, y_{init} 、最終位置 x_{end}, y_{end} と定義する。この時、式(5.6)(5.7)(5.8)における距離 r と方位角 θ は次のように書ける。

$$r = \sqrt{(x_{init} - x_{end})^2 + (y_{init} - y_{end})^2} \quad (5.9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{init} + v_y t}{x_{init}}\right) \quad (5.10)$$

次に、デバイスが途中で進行方向を変える経路について定式化する。デバイスが初期位置 x_{start}, y_{start} から回転磁石マーカに接近し、時刻 $t = t_0$ で最も回転磁石マーカに近い位置 $x_{closest}, y_{closest}$ に到達し、その後進行方向を変えて最終的に位置 x_{end}, y_{end} に到達するとき、デバイスが計測する磁気ノルムはステップ関数 $U(t)$ を用いて次の式で書ける。

$$H = U(-t + t_0) \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t)} + U(t - t_0) \sqrt{\frac{B^2}{r^6} + \frac{A^2 - B^2}{r^6} \cos^2(\theta - \omega t)} \quad (5.11)$$

ここで、 $t < t_0$ の時、

$$x_{start} \leq x \leq x_{closest} \quad y_{start} \leq y \leq y_{closest} \quad (5.12)$$

また $t_0 < t$ の時、

$$x_{closest} \leq x \leq x_{end} \quad y_{closest} \leq y \leq y_{end} \quad (5.13)$$

とする。またステップ関数 $U(t - t_0)$ の定義は、

$$U(t - t_0) = 1 \quad (t > t_0) \quad (5.14)$$

$$U(t - t_0) = 0 \quad (t < t_0) \quad (5.15)$$

である。

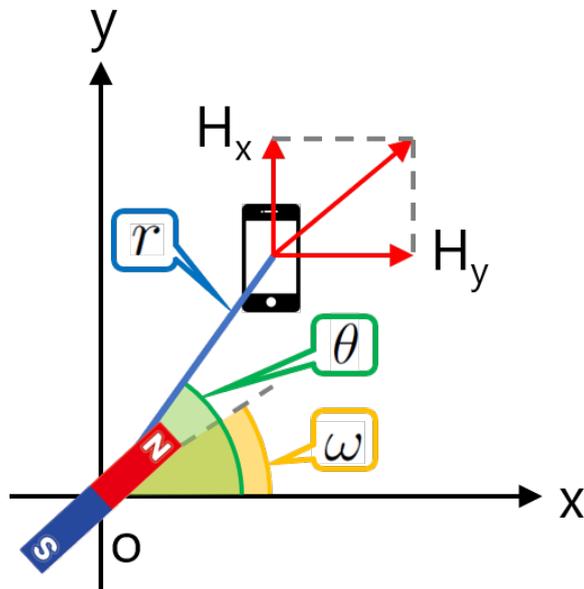


図 5.1: 2次元平面内での回転磁石マーカによる磁気

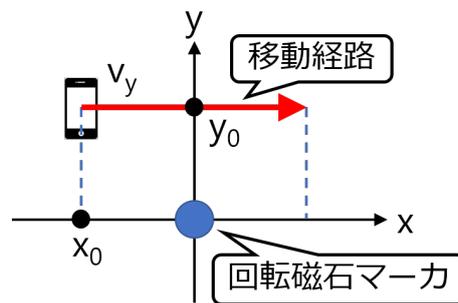


図 5.2: 直線移動するデバイスの経路

5.2.3 シミュレータによる磁場との比較

本節では評価実験の前に、5.2.1 節で導出した磁場の式 (5.6)(5.7) をシミュレータとの磁場との比較によって評価した。シミュレータには 4.2.2 節と同様に 3 次元磁場解析ソルバ Qm* を用いた。磁石のサイズや材質などは 4.2.2 節と同じになるように設定し、移動経路は初期位置 $x_0 = 0.5 \text{ m}$, $y_0 = -1 \text{ m}$, 速度 $v_y = 0.1 \text{ m/s}$ で 20 秒間移動するとした。

図 5.3a, 5.3b はシミュレーション結果と磁場の式 (5.6)(5.7) との比較である。赤線と緑線はそれぞれ磁場の x 軸成分と y 軸成分のシミュレーション結果を示し、青色と黄色の点線はそれぞれ式 (5.6)(5.7) による磁場の x 軸成分と y 軸成分を示している。黒線は x 軸成分のシミュレーション結果と式 (5.6), 灰線は y 軸成分のシミュレーション結果と式 (5.7) との差の絶対値を示している。黒線が示すように、x 軸成分では 10 秒付

*<http://www.slock.co.jp/Qm3/index.html>

近に $0\sim 5\ \mu\text{T}$ の差が見られるが、それ以外ではシミュレーション結果と式との間にほとんど差は見られず、また灰線が示すように y 軸成分に関してはシミュレーション結果と理論式による磁場の値にほとんど差がない様子が分かる。以上の比較から、スマートフォンが等速直線運動する経路において、5.2.1 節で導出した式は 3 次元磁場解析ソルバ Qm のシミュレーション結果とほぼ同じであると考えられる。

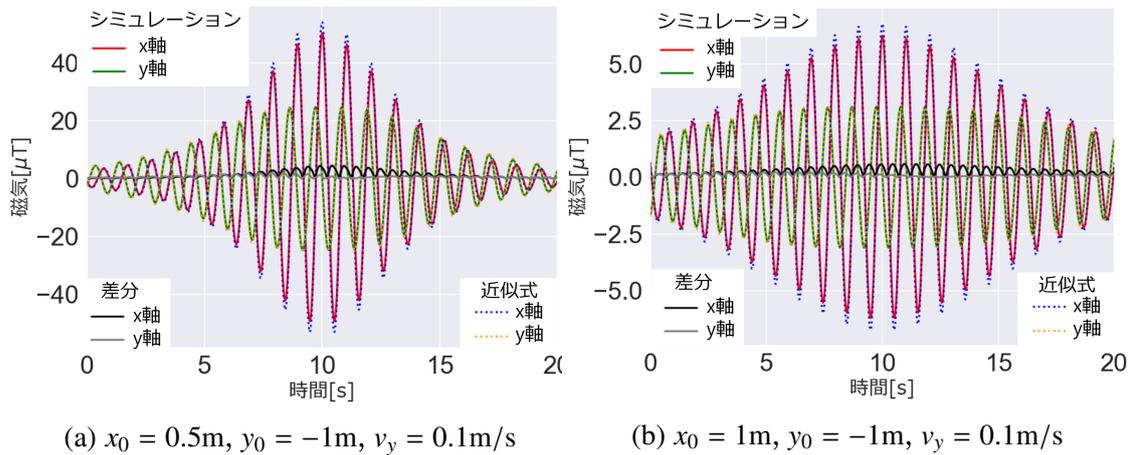


図 5.3: シミュレーション結果と提案した理論式との比較

デバイスがある経路を移動中に計測する磁気は式 (5.8) が示すように、その経路を特徴づけるパラメータによって定まる。例えば、等速直線運動するデバイスが計測する磁気ノルムは式 (5.8) が示すように、その初期位置 x_{init}, y_{init} と最終位置 x_{end}, y_{end} に依存する。この時、経路を特徴づけるパラメータをフィッティングパラメータとして、計測した磁気ノルムをカーブフィッティングすれば、その最適解からデバイスの移動経路を推定できる。

5.2.4 環境磁気軽減手法

本節では、移動に伴って発生する環境磁場による影響を軽減する処理について説明する。4.3.5 節ではデバイスが静止している時を考えたため、環境から受ける磁場の影響が一定だと仮定したが、デバイスの移動中には建物や電子機器などが発する磁場の影響により、 $10\sim 100\ \mu\text{T}$ の磁場の変動が起きる。これらの磁場の変動は回転磁石マーカによる磁場の振幅よりもはるかに大きくなる場合があり、計測した磁気データから移動経路を推定する際に大きな影響を及ぼす。そこで、本節では計測した磁気データから移動に伴う環境磁気の影響を軽減する処理を提案する。

5.2.2 節で導出した式が示すように、移動中に計測する回転磁石マーカの動的磁場は各成分とも 0Hz を中心とした振動で表せるので、その性質を環境磁気の軽減に利用する。まず、計測された磁気データからランダムなノイズを軽減するために窓幅 3 サンプルの移動平均を用いて平滑化する。次に、計測された磁場が極大値もしくは極小値になる時刻を全て取得し、それぞれの極大値と極小値の間の値を回転磁石マーカ

による動的磁場の振動の中心とみなす。そこで、それらの中間の時刻での磁気の値を線形に補間し、元の計測した磁気データからその線形で補間した磁気を環境磁気として引く。以上の処理によって、計測された磁気に含まれる環境磁気の影響を軽減する。

5.3 移動経路推定の評価実験

5.3.1 移動経路推定の実験設定

移動経路推定の精度評価のため、本研究ではベルトコンベアを作成した。金属製の部品は磁気を帯びるため、フレームとプリーをプラスチックを材料として用いる3Dプリンタで作成し、ネジはポリカーボネイト製、ナットは塩化ビニル製のものを用いた。4.4.6節で見たように、回転磁石マーカの推定可能範囲が3m以内であったことから、推定可能なスマートフォンの移動経路の長さは2m程度であると想定し、長さ1mのベルトコンベアを2台作成した。また、ベルトコンベアを動作させるモータには回転磁石マーカに使用したステッピングモータと同じ物を使用し、モータが発する磁場が実験に与える影響を極力抑えるため、モータをベルトコンベアの端に取り付け、端から10cm以上離れた区間を実験に使用した。

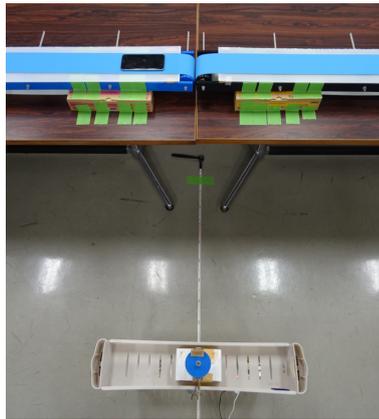
次に、今回の評価実験での回転磁石マーカとスマートフォンの設定について述べる。回転磁石マーカの方位角 $\theta = 0^\circ$ の基準は磁石のN極がx軸の正の向きになる方向とし、磁石の回転数は1Hzに設定した。計測に使用したスマートフォンはiPhone 6 Plus、磁気センサのサンプリング周波数は100Hzに設定した。また、磁気を計測するアプリにはHascLogger*を用い、計測時間は1回の実験ごとに20秒、各経路ごとに5回ずつ計測した。図5.4aはスマートフォンが等速直線運動する経路に対しての実験の様子である。床からの磁気の影響を抑えるため、ベルトコンベアを高さ1m程度のテーブルの上に設置し、高さをそろえるために回転磁石マーカを高さ1m程度プラスチック製の台の上に設置して実験した。

本節ではスマートフォンが直線的に移動する経路と、途中で進行方向を変える経路の二つについて推定精度を評価した。実験に使用したスマートフォンはiPhone 6 Plusで磁気センサのサンプリング周波数は100Hzに設定し、回転磁石マーカの回転数を1Hzとした。それぞれの移動経路で5回ずつ計測し、各時刻での正解経路と推定経路の距離の平均を推定精度とする。

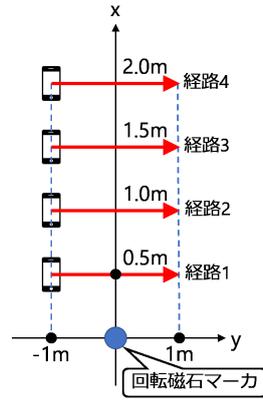
図5.4aに直線経路を推定した実験の様子を示す。図5.4bは今回の実験で推定した直線経路を示している。スマートフォンの速度はすべてy軸の正の向きで $v_y = 0.1 \text{ m/s}$ とし、初期位置はすべて $y = -1 \text{ m}$ 、x座標はそれぞれの経路で $x = 0.5, 1, 1.5, 2 \text{ m}$ とした。

図5.5aは途中で進行方向を変える経路の実験の様子である。2つのベルトコンベアを一定の角度で固定するため、固定するための部品を3Dプリンタで作成して装着した。図5.5bは推定した経路を示している。スマートフォンが移動する向きをy軸の

*<http://hasc.jp/hc2011/hasclogger.h-tml>

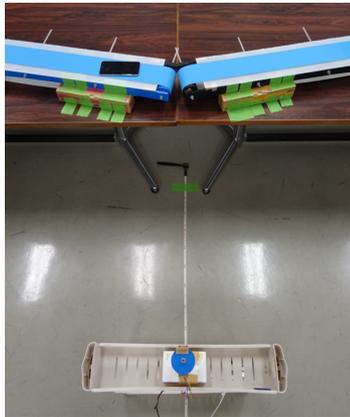


(a) 実験の様子

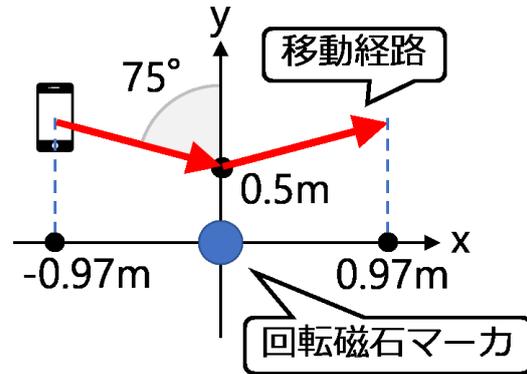


(b) 推定経路

図 5.4: 等速直線運動する経路の実験



(a) 実験の様子



(b) 推定経路

図 5.5: 進行方向を変える経路の実験

正の向きとし，ベルトコンベアは x 軸に対してそれぞれ 75° の角度で固定した．この時，スマートフォンの初期位置は $x_0 \approx 0.76 \text{ m}$ ， $y_0 \approx -0.97 \text{ m}$ ，スマートフォンの速度は $0 \leq t < 10$ で $v_x \approx -0.03 \text{ m/s}$ ， $v_y \approx 0.10 \text{ m/s}$ ， $t > 10$ で $v_x \approx 0.03 \text{ m/s}$ ， $v_y \approx 0.10 \text{ m/s}$ となる．

5.3.2 環境磁気軽減手法の評価

経路推定の評価実験の前に，本節では 5.2.4 節の環境磁気軽減手法の影響を評価した．特定の経路を移動した時に計測した回転磁石マーカの磁気に対して，あらかじめ同じ経路を取った時の環境磁気を計測しておき，計測した回転磁石マーカの磁気から環境磁気を引いた磁気と，計測した回転磁石マーカの磁気に対して 5.2.4 節での環境磁気軽減手法を施した後の磁気と比較し，同じ磁気を得られるかどうかを調べる．

まず環境磁気を計測するため，回転磁石マーカをスマートフォンから十分遠方に

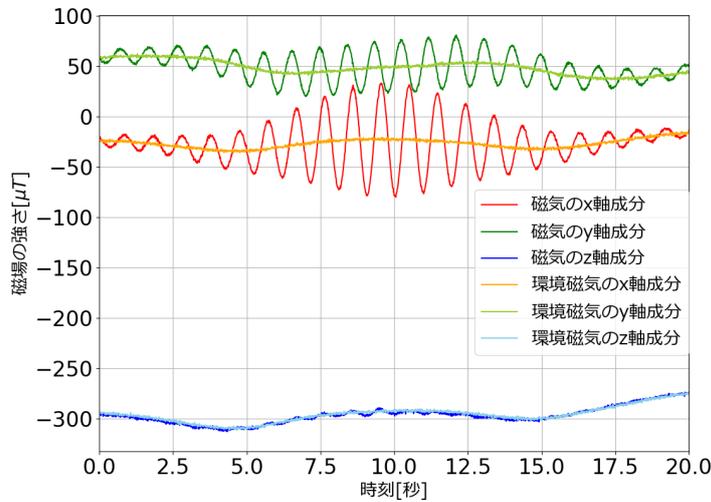


図 5.6: 計測磁気と環境磁気

離し，スマートフォンをベルトコンベアを用いて x 軸の正の向きに 2 m 移動させて磁気を計測した．次に，回転磁石マーカを位置 50 cm に設置したのち，磁石の回転数を 1 Hz に設定し，先ほどと同様にスマートフォンをベルトコンベアを用いて x 軸の正の向きに 2 m 移動させて磁気を計測した．そして，計測した磁気に対して先ほど計測した環境磁気をその磁気から引いた物を正解データとし，5.2.4 節の環境磁気軽減手法を施した場合との結果を比較する．

図 5.6 は計測した環境磁気と環境磁気を軽減する前の磁気のグラフである．図が示すように，各成分の磁気はそれぞれ直流成分を持ち，振動の中心が 0 Hz から大きく離れている．また，移動に伴って振動中心が移動してしており，その振動中心が環境磁気とほぼ一致している様子が分かる．図 5.7 は回転磁石マーカの磁気から環境磁気を引いたものと，回転磁石マーカの磁気に環境磁気軽減処理を施した磁気との比較である．図が示すように，いずれの成分も振動中心が 0 Hz に補正されており，また環境磁気軽減手法による磁気と環境磁気を引いた後の磁気とがほぼ一致している様子が分かる．以上の評価から，5.2.4 節の環境磁気軽減手法は，事前に環境磁気のみを計測し，回転磁石マーカを設置して計測した磁気から環境磁気を引いた場合とほぼ同等の効果があることが分かった．

5.3.3 移動経路推定の結果

経路推定の前に，本節では 5.2.1 の式 (5.4)(5.5) で導入した磁石に依存する定数 A , B を計測する実験をした．式 (5.8) より，距離 $r = 1\text{ m}$ ，方位角 $\theta = 0^\circ$ ， $\omega t = 0$ の時の磁気ノルムの値が定数 A に対応し，距離 $r = 1\text{ m}$ ，方位角 $\theta = 0^\circ$ ， $\omega t = \pi/2$ の時が定数 B に対応することが分かる．そこで，回転磁石マーカから 1 m 離してスマートフォンを設置し，10 秒間磁気を計測する．次に，計測した磁気ノルムの極大値と極小値

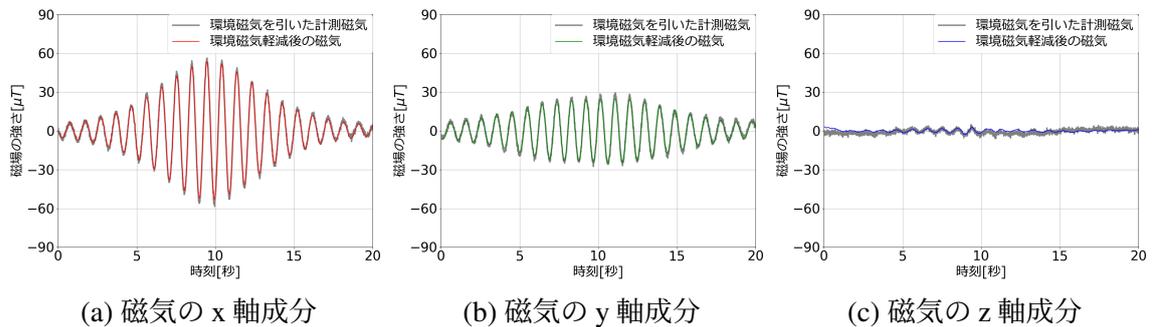


図 5.7: 環境磁気軽減手法後の磁気と環境磁気を引いた磁気との比較

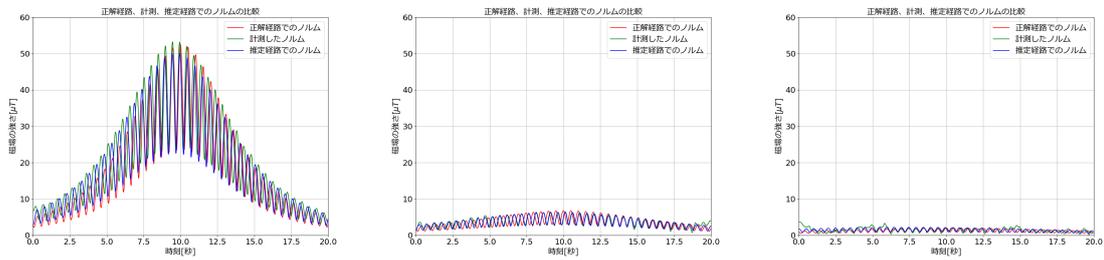
を取得し、それぞれの極値の平均をそれぞれ定数 A , B とする。実験の結果、定数は $A = 6.77 \mu\text{T}$, $B = 3.04 \mu\text{T}$ であった。

図 5.9 は経路 1, 2, 3 それぞれに対するの推定結果を示した図である。この図において移動経路を矢印で表し、正解経路を赤矢印、推定経路を半透明の青矢印で示した。この図が示すように、経路 1 と経路 2 では赤矢印と青矢印がほぼ重なっているのに対し、経路 3 では青矢印にばらつきが見られ、回転磁石マーカからの距離が遠ざかるにつれて推定精度が低下している様子が分かる。

図 5.10 に各直線経路での推定結果の平均誤差と標準偏差を示す。この図から分かるように、回転磁石マーカから距離 1 m 以内の直線経路では平均誤差 10 cm 以下であるのに対し、距離 1.25~1.5 m の直線経路では推定精度が低下し、距離 1.5 m の直線経路ではほとんど推定できていないことが分かる。以上の実験結果から、直線移動しているスマートフォンの場合、回転磁石マーカからの距離が 1 m 以内の場合で、初期位置を平均誤差 5.4 cm 以下、速度を平均誤差 0.01 m/s 以下で推定できた。

図 5.11a は折れ曲がる経路での正解経路と推定経路の比較を示す。ここで、前図と同様に移動経路を矢印で表し、正解経路を赤矢印、推定経路を半透明の青矢印で示した。図が示すように、経路の始点と終点に推定誤差が見られるが、この時の経路推定の平均誤差は 0.09 m、標準偏差は 0.01 m であった。また、図 5.11b は経路を移動中に計測した磁場と 5.2 節で導出した理論上の磁場の値との比較を示している。直線経路と比較して、スマートフォンが最も回転磁石マーカに近づく時刻 $t = 10$ 秒で磁気ノルムが強くなる様子が見られ、推定経路での磁場の値は理論上の磁場の値を再現できている様子が分かる。

今回は移動中のデバイスの近くに回転磁石マーカ以外に強い磁場を発生するものはないと仮定し、非金属の部品で作成されたベルトコンベアを用いて評価実験をした。しかし、金属製の物体も回転磁石マーカの影響で磁気を帯びるため、移動中にそれらが近くある場合はデバイスが計測する磁場に大きく影響する。5.2.4 節で提案した環境磁気軽減手法では、計測した磁場の振幅を用いるため、回転磁石マーカの動的磁場の振幅よりも大きな磁場を計測した場合は推定精度が低下する可能性がある。そのため、今後は実験環境と実環境での移動経路推定精度の違いを検証する必要がある。

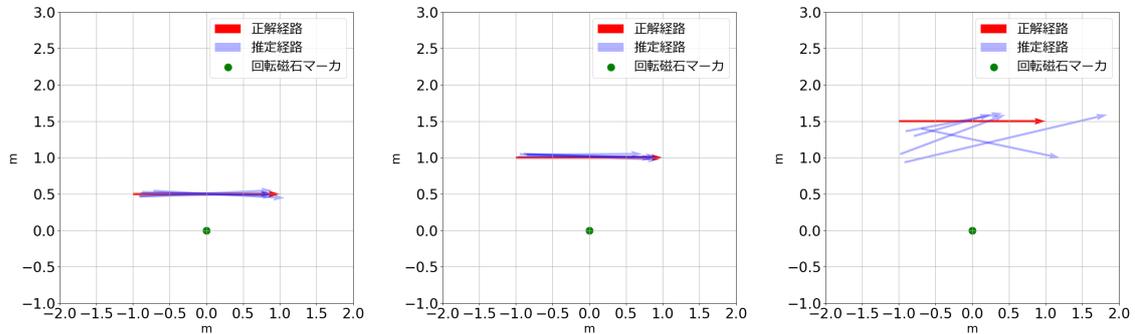


(a) 経路 1

(b) 経路 2

(c) 経路 3

図 5.8: 移動経路 1, 2, 3 で計測された磁気ノルムの比較



(a) 推定経路 1

(b) 推定経路 2

(c) 推定経路 3

図 5.9: 正解経路と推定経路の比較

5.3.4 デバイスの違いによる移動経路推定の精度評価

5.3.3 節では、iPhone 6 Plus を用いて移動経路推定の精度を評価したが、推定精度のスマートフォン依存性を調べるため、いくつかの異なるスマートフォンで移動経路推定の精度を評価した。実験に使用したスマートフォンは、AQUOS R2 SH-M09, moto z3 play, OPPO CPH1877, ZenFone 5Z Z01RD, Huawei nova 3 (PAR-LX9) の 5 台で、磁気センサのサンプリング周波数は 5.3 節での実験と条件を同じにするため、すべて 100 Hz で計測した。

これらのスマートフォンで移動経路を推定するため、まず 5.3.3 節と同様の条件で各スマートフォンでの磁気定数 A, B を導出した。その結果を表 5.1 に示す。表が示すように、定数 A, B の値は各スマートフォンで $2\sim 3\mu\text{T}$ 程度の違いが見られた。正解経路はベルトコンベアから距離 50 cm 離れた直線経路と、距離 100 cm 離れた直線経路とし、その他の条件は 5.3.1 節と同様に設定して実験した。

表 5.2 は各スマートフォンでの移動経路推定の結果を示している。表が示すように、どのスマートフォンでも平均誤差 10 cm 以下で推定されており、スマートフォンごとの推定精度の差も 0.03 m 程度と大きな違いは見られなかった。また、表 5.3 は直線経

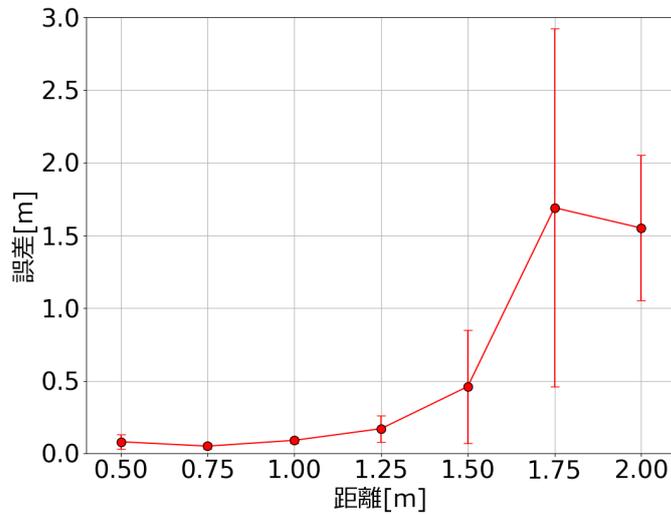
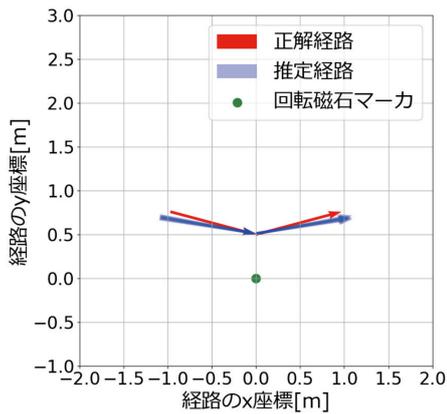
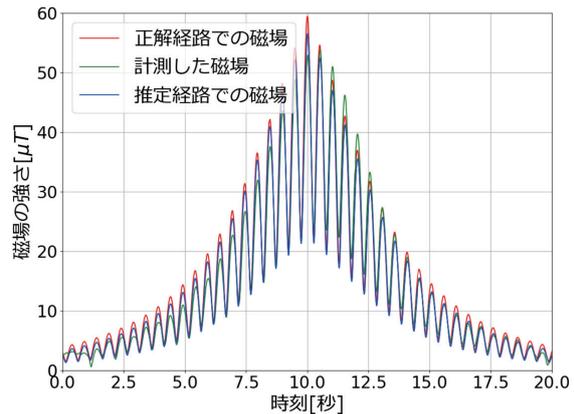


図 5.10: 直線経路での移動経路推定の結果



(a) 正解経路と推定経路の比較



(b) 磁気ノルムの比較

図 5.11: 折れ曲がる経路での経路推定結果

路2での推定結果を示している。表が示すように、どのスマートフォンでも推定精度が平均誤差0.10~0.16m程度であった。以上の結果から、本提案手法を用いた移動経路推定の精度はスマートフォンに大きく依存しないことが分かった。

5.3.5 磁石の回転数の違いによる移動経路推定の精度評価

5.3.3節, 5.3.4節では回転磁石マーカの磁石の回転数を1Hzに設定して位置推定精度を評価したが、本節では回転磁石マーカの磁石の回転数と推定精度との関連を調べた。スマートフォンのサンプリング周波数は100Hz程度であるため、推定に利用する動的磁場の周波数によって推定精度に大きく影響を及ぼす可能性がある。例えば、動的磁場の周波数を高くすればスマートフォンの移動速度に対して動的磁場の周波数

表 5.1: スマートフォンごとの磁気定数

| | AQUOS R2 SH-M09 | moto z3 play | OPPO CPH1877 | ZenFone 5Z Z01RD | Huawei nova 3 (PAR-LX9) |
|-------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| A[μ T] | 7.45 | 7.27 | 5.71 | 6.40 | 5.96 |
| B[μ T] | 5.91 | 2.99 | 2.76 | 2.78 | 2.79 |

表 5.2: スマートフォンごとの推定精度 (経路 1)

| | AQUOS R2 SH-M09 | moto z3 play | OPPO CPH1877 | ZenFone 5Z Z01RD | Huawei nova 3 (PAR-LX9) |
|----------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 平均誤差 [m] | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.07 | 0.07 |
| 標準偏差 [m] | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |

が高くなり、移動中に計測する磁場がより多くの極値を含むため、推定精度が向上すると予想される。

評価実験での推定経路は図 5.4(b) の直線経路 1, 2, 3 とし、それぞれの経路で磁石の回転数を 2 Hz, 3 Hz とした時の移動経路推定の精度を評価をした。実験に使用するスマートフォンは 5.3.1 節と同様に iPhone 6 Plus を使用し、サンプリング周波数を 100 Hz に設定した。それぞれの移動経路でスマートフォンを 0.1 m/s で移動させて 5 回ずつ磁場を計測し、各経路について平均誤差と標準偏差を推定精度とした。

図 5.12 はそれぞれの回転数と移動経路での推定結果を示している。図が示すように、直線経路 1 では磁石の回転数を変化させても推定精度に大きな違いは見られなかった。一方で直線経路 3 では、回転数が 1 Hz と 2 Hz での精度はほぼ同じであるのに対して、3 Hz では推定精度が低下した。さらに直線経路 5 では、回転数が 1 Hz でも推定精度が低下しているのに対し、2 Hz のときでは誤差 15 cm 以下を保っている様子が分かる。以上の評価実験から、磁石の回転数が 2 Hz のときに最も推定精度が向上し、反対に回転数が 3 Hz では推定精度が低下する様子が見られた。回転数 2 Hz の時に推定精度が向上したのは、計測した磁場中に含まれる回転磁石マーカによる動的磁場の周波数成分がより強くなったためである。一方で回転数 3 Hz で推定精度が低下したのは、スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数に対して動的磁場の周波数が高くなりすぎたため、計測した磁場に含まれる回転磁石マーカによる動的磁場の周波数成分が低下したためと考えられる。以上の評価実験から、移動経路推定では回転磁石マーカの回転数が 2 Hz の時に最も推定精度が向上した。

今回の評価実験では磁石の回転数が 2 Hz の時に最も推定精度が高かったが、実際は磁気センサのサンプリング周波数との関係で異なってくると考えられる。今後は磁気センサのサンプリング周波数と磁石の回転数に対する推定精度の関係を調べ、推定精度が最も高くなる磁石の回転数を検証する必要がある。

表 5.3: スマートフォンごとの推定精度 (経路 2)

| | AQUOS R2 SH-M09 | moto z3 play | OPPO CPH1877 | ZenFone 5Z Z01RD | Huawei nova 3 (PAR-LX9) |
|----------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 平均誤差 [m] | 0.10 | 0.11 | 0.15 | 0.11 | 0.16 |
| 標準偏差 [m] | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.06 |

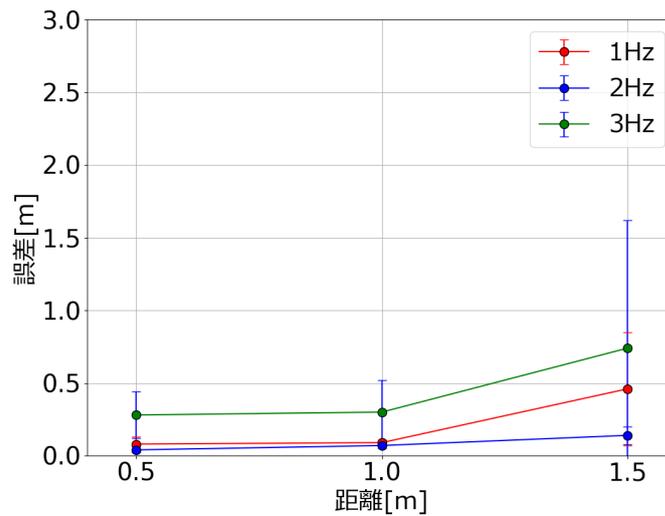


図 5.12: 磁石の回転数と推定精度

5.4 本章のまとめ

本研究での提案手法によって、スマートフォンに搭載されているような安価な磁気センサを用いての高精度な移動経路推定が可能になった。今回の結果から、回転磁石マーカを設置した通路を通過した人の移動向きや速さなどを高精度で推定し、デジタルサイネージに映す情報を歩行者の速度に合わせたり、指向性のある音波を用いて歩行者へ音声信号をピンポイントで伝達する技術への応用が考えられる。しかし、誤差 10 cm 以下の精度を維持可能な範囲は回転磁石マーカから 1 m 離れた程度であったために、その利用可能な状況は限定される。本提案手法の利用機会を広げるには、推定精度の維持可能範囲の拡張が不可欠である。

今回の提案手法ではデバイスが計測した磁場に対して、磁場の理論式をカーブフィッティングして移動経路を推定したが、磁場の理論式に基づいた経路推定ではノイズの影響に対して柔軟に対処できず、推定精度が大きく低下した可能性がある。ノイズの影響に対応するための手法として、例えばノイズの影響をモデル化して磁場の理論式の中に反映させたり、磁場の理論式を用いた推定結果に対して、パーティクルフィルタやカルマンフィルタなどを用いて推定結果を補正する手法などが考えられる。

また推定精度を向上させる手法の一つとして、センサフュージョンが考えられる。今回の提案手法では磁気センサのデータのみを利用しているが、磁気センサが搭載さ

れているデバイスには加速度センサとジャイロセンサなどが搭載されている場合が多く、これらのセンサデータを用いれば推定精度の向上が期待できる。例えば2.3節で紹介したPDRでは、加速度センサとジャイロセンサからデバイスの経路推定が可能で、本提案手法での推定結果に加えてPDRを用いた推定結果を利用すれば、移動経路推定の精度向上が期待できる。

第6章 おわりに

6.1 まとめ

本論文では、回転磁石マーカを用いたスマートデバイスの高精度位置推定手法を提案した。既に誤差 10 cm 以下の高精度屋内位置推定を実現する手法はいくつか提案されているが、専用のデバイスや高精度なセンサの搭載が必要であり、利用可能な環境が工場や倉庫、医療用などに限られていた。スマートフォンやスマートウォッチなどのスマートデバイスの位置を 3次元位置を誤差 10 cm 以下の精度で推定できれば、屋内での人の行動を高精度で認識可能になり、パラメトリックスピーカーによる情報伝達や、ワイヤレス給電伝送などに利用でき、ユビキタスコンピューティングの実現に貢献できると考えられる。

既存の屋内位置推定手法の中で、動的磁場を用いた手法は遮蔽物の影響を受けにくく、磁気センサの 3次元位置を誤差 10 cm 以下で推定可能であった。しかし、既存手法ではコイルを用いて動的磁場を発生させるため、スマートデバイスの磁気センサが計測可能な動的磁場の生成には 100 kW 以上の電力が必要となる。また長時間の利用には、発熱によるコイルの溶解を防ぐために冷却材が必要になる点や、消費電力を抑えるためにはコイルの直径を 1 m 以上にする必要がある点など、一般的な屋内環境での利用が困難であった。

本論文では、スマートデバイスに搭載されている磁気センサで高精度位置推定を実現するため、新たに回転磁石マーカを開発し、それが生み出す動的磁場を用いた位置推定手法を提案した。回転磁石マーカは磁場の発生に磁石を用いるため、コイルを用いる手法と比べて消費電力を抑えられ、長時間の利用でも熱が生じにくく、一般的な屋内環境でも利用可能である。提案手法では、回転磁石マーカが生み出す動的磁場をスマートフォンの磁気センサで検知し、その磁気データと回転磁石マーカの磁石の回転角からスマートフォンの 3次元位置を推定した。さらにスマートデバイスが移動している時、移動速度に依存して計測する磁気为非周期的になるため、計測した磁気のパターンからスマートデバイスの移動経路を推定する手法を提案した。

本論文での提案手法により、スマートフォンやスマートウォッチのような一般的に市販されているデバイスでの誤差 10 cm 以下の高精度屋内位置推定が可能になった。スマートデバイスの高精度屋内位置推定の普及によって、これまでの位置推定手法では困難だった新たなサービスが誕生し、コンピュータとユーザのより綿密なインタラクティブが可能になると考えられる。また今後のさらなる手法の改良やアプリケーションの開発により、ユビキタス社会の実現に貢献されることが期待される。

6.2 今後の展開

本論文では1台の回転磁石マーカを利用した位置推定手法を提案したが、今後の展開の一つとして複数の回転磁石マーカを用いた推定手法の研究が挙げられる。複数台の回転磁石マーカを用いた推定手法が実現すれば、1台のみを利用した場合と比べていくつかの利点がある。例えば、今回の研究では回転磁石マーカによる動的磁場の影響範囲は3m程度であったが、推定可能範囲が重なるように複数台の回転磁石マーカを環境内に設置すれば、屋内でのデバイスの推定可能範囲を拡大できる。また今回提案した手法では、ノイズ軽減処理のために1回の位置推定に対して10秒間磁気データを計測したが、複数台の回転磁石マーカの計測結果を用いれば、推定に必要な計測時間を短縮できる可能性がある。さらに本論文では評価実験の前にデバイスに依存する定数を求める必要があったが、複数の回転磁石マーカからの動的磁場を利用すれば、それらの定数の計測が必要なくなる可能性がある。そのためには複数台の回転磁石マーカが3次元空間中に生み出す磁場を定式化し、それらの式とデバイスの位置の関係を導出する必要がある。

また他の展開として、信号処理手法を利用した磁気データのノイズ軽減が挙げられる。4.3.5節で述べたノイズ軽減手法では加算平均や移動平均を用いてノイズを軽減したが、これらの手法では主にランダムなノイズの影響しか軽減できない。一方で信号処理や画像処理の分野では、スパースモデリングを用いたノイズ軽減処理手法 [66] や信号復元手法 [67] が提案されており、これらの手法をスマートデバイスが計測した磁気データに対して用いれば、より多くのノイズを含んだ磁気データからでも回転磁石マーカによる動的磁場を抽出できる可能性がある。

最後に本提案手法の考えられる性能の可能性について述べる。本提案手法では回転磁石マーカが生み出す動的磁場の振幅を推定に利用しているため、推定精度はデバイスに搭載されている磁気センサの分解能に依存する。現在、スマートフォンやスマートウォッチなどに搭載されている磁気センサは主にホールセンサが用いられており、これらの磁気センサは安価であるがその分解能は μT オーダーである。一方で、現在製品化している磁気センサには分解能が nT オーダーであるMI磁気センサ [68] や、分解能が pT オーダーで生体磁気も計測可能な光ポンピング磁力計 [69] などが存在する。これらの磁気センサはホールセンサと比較すると高価であり、現在スマートデバイスに搭載されるまでには至っていない。今後これらの磁気センサの低コスト化が実現し、スマートデバイスに搭載されるようになれば、1台の回転磁石マーカでの推定可能範囲が10m以上に拡大できる可能性がある。

関連図書

- [1] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, Vol. 3, No. 3, pp. 3–11, 1999.
- [2] 野口伸. 農業ビークルロボットの現状と今後の展開. *精密工学会誌*, Vol. 81, No. 1, pp. 22–25, 2015.
- [3] 中川渉. 農業機械のロボット化の現状と課題・将来への展望. *日本ロボット学会誌*, Vol. 35, No. 5, pp. 387–389, 2017.
- [4] 岸本信弘. 自動運転用高精度衛星測位システム. *電気設備学会誌*, Vol. 37, No. 10, pp. 709–712, 2017.
- [5] 坂上晴信, 佐藤佳, 佐藤俊太, 高石一樹, 木岡拓海, 山下晃弘, 松林勝志. 視覚障がい者ナビゲーションのための準天頂衛星「みちびき」を用いた位置推定システムの提案. 第78回全国大会講演論文集, Vol. 2016, No. 1, pp. 407–408, 2016.
- [6] Zhongliang Deng, Yanpei Yu, Xie Yuan, Neng Wan, and Lei Yang. Situation and development tendency of indoor positioning. *China Communications*, Vol. 10, No. 3, pp. 42–55, 2013.
- [7] Wilson Sakpere, Michael Adeyeye-Oshin, and Nhlanhla BW Mlitwa. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal*, Vol. 29, No. 3, pp. 145–197, 2017.
- [8] PlaceEngine. <https://www.koozyt.com/service/placeengine>. 2020年12月参照.
- [9] WiFiSLAM. <https://www.crunchbase.com/organization/wifislam>. 2020年12月参照.
- [10] Quuppa. <http://quuppa.com/>. 2020年12月参照.
- [11] ABFinder. <https://www.zyyx.jp/service/solution/ibeacon.html>. 2020年12月参照.
- [12] Blegonio. <https://www.erii.co.jp/staffblog-blegonio>. 2020年12月参照.

- [13] IndoorAtlas. <http://www.indooratlas.com>. 2018 年 1 月 参照.
- [14] gipstech. <https://www.gipstech.com>. 2020 年 12 月 参照.
- [15] João Guerreiro, Dragan Ahmetovic, Daisuke Sato, Kris Kitani, and Chieko Asakawa. Airport accessibility and navigation assistance for people with visual impairments. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 2019.
- [16] Sheng-Shih Wang. A ble-based pedestrian navigation system for car searching in indoor parking garages. *Sensors*, Vol. 18, No. 5, p. 1442, 2018.
- [17] Dalal Zaim and Mostafa Bellafkih. Bluetooth low energy (ble) based geomarketing system. In *2016 11th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA)*, pp. 1–6. IEEE, 2016.
- [18] Ravi Ramakrishnan, Loveleen Gaur, and Gurinder Singh. Feasibility and efficacy of ble beacon iot devices in inventory management at the shop floor. *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, Vol. 6, No. 5, 2016.
- [19] POLHEMUS. <https://www.ddd.co.jp/polhemus>. 2018 年 1 月 参照.
- [20] Q-TRACK. <http://q-track.com>. 2018 年 1 月 参照.
- [21] Faheem Ijaz, Hee Kwon Yang, Arbab Waheed Ahmad, and Chankil Lee. Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems. In *2013 15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, pp. 1146–1150. IEEE, 2013.
- [22] ubisense. <https://www.ubisense.jp>. 2018 年 1 月 参照.
- [23] cyberdyne. <https://www.cyberdyne.jp/products/transportrobot.html>. 2020 年 12 月 参照.
- [24] savioke. <https://www.savioke.com>. 2020 年 12 月 参照.
- [25] xeye. <https://www.xeye.jp>. 2020 年 12 月 参照.
- [26] 情報通信白書平成 29 年版. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc111110.html>. 2018 年 1 月 参照.
- [27] Aqeel Mahmood Jawad, Rosdiadee Nordin, Sadik Kamel Gharghan, Haider Mahmood Jawad, and Mahamod Ismail. Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review. *Energies*, Vol. 10, No. 7, p. 1022, 2017.

- [28] 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 粟井郁雄. 共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討. 第 13 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, no. B-3, pp. 220–223, 2011.
- [29] 西村正治. アクティブノイズコントロールの現状. 計測と制御, Vol. 51, No. 12, pp. 1105–1109, 2012.
- [30] Sen M Kuo, Kevin Kuo, and Woon Seng Gan. Active noise control: Open problems and challenges. In *The 2010 International Conference on Green Circuits and Systems*, pp. 164–169. IEEE, 2010.
- [31] Emmanuel A Ntuny and Sergey V Utyuzhnikov. Active sound control in 3d bounded regions. *Wave Motion*, Vol. 51, No. 2, pp. 284–295, 2014.
- [32] 相馬啓佑, 間博人, 山下大輔, 村上広記, 三木光範. モバイル端末とプロジェクタを利用したインタラクティブタッチシステムの検討. 同志社大学ハリス理化学研究報告, Vol. 57, No. 4, pp. 271–276, 2017.
- [33] Han Zou, Hao Jiang, Xiaoxuan Lu, and Lihua Xie. An online sequential extreme learning machine approach to wifi based indoor positioning. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 111–116. IEEE, 2014.
- [34] Yuan Zhuang, Zainab Syed, Jacques Georgy, and Naser El-Sheimy. Autonomous smartphone-based wifi positioning system by using access points localization and crowdsourcing. *Pervasive and mobile computing*, Vol. 18, pp. 118–136, 2015.
- [35] Hyunwook Park, Jaewon Noh, and Sunghyun Cho. Three-dimensional positioning system using bluetooth low-energy beacons. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 12, No. 10, p. 1550147716671720, 2016.
- [36] Fazeelat Mazhar, Muhammad Gufran Khan, and Benny Sällberg. Precise indoor positioning using uwb: A review of methods, algorithms and implementations. *Wireless Personal Communications*, Vol. 97, No. 3, pp. 4467–4491, 2017.
- [37] 中村将成, 秋山尚之, 杉本雅則, 橋爪宏達. 音響信号を用いたスマートフォンの高速・高精度屋内 3 次元位置認識手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 11, pp. 2489–2500, 2016.
- [38] Fuqiang Gu, Kouros Khoshelham, Chunyang Yu, and Jianga Shang. Accurate step length estimation for pedestrian dead reckoning localization using stacked autoencoders. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, No. 8, pp. 2705–2713, 2018.

- [39] Hayato Kumaki, Takayuki Akiyama, Hiromichi Hashizume, and Masanori Sugimoto. 3d indoor positioning and rapid data transfer using modulated illumination. In *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Alcalá de Henares, Spain, pp. 4–7, 2016.
- [40] Ran Zhang, Wen-De Zhong, Qian Kemao, and Sheng Zhang. A single led positioning system based on circle projection. *IEEE Photonics Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 1–9, 2017.
- [41] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 歩行時の磁気センシングデータを利用した屋内位置推定手法. *情報処理学会論文誌*, Vol. 58, No. 1, pp. 57–67, 2017.
- [42] Gerald Pirkl and Paul Lukowicz. Robust, low cost indoor positioning using magnetic resonant coupling. In *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 431–440. ACM, 2012.
- [43] Gerald Pirkl, Peter Hevesi, Jingyuan Cheng, and Paul Lukowicz. mbeacon: accurate, robust proximity detection with smart phones and smart watches using low frequency modulated magnetic fields. In *Proceedings of the 10th EAI International Conference on Body Area Networks*, pp. 186–191. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2015.
- [44] JiuJun Cheng, Yueqiao Cai, Qingyang Zhang, Junlu Cheng, and Chendan Yan. A new three-dimensional indoor positioning mechanism based on wireless lan. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, , 2014.
- [45] Shuaib Alam, Salman Atif, Saddam Hussain, and Ejaz Hussain. 3-dimensional indoor positioning system based on wi-fi received signal strength using greedy algorithm and parallel resilient propagation. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 116, No. 18, 2015.
- [46] Mohamed Er Rida, Fuqiang Liu, Yassine Jadi, Amgad Ali Abdullah Algawhari, and Ahmed Askourih. Indoor location position based on bluetooth signal strength. In *Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2015 2nd International Conference on*, pp. 769–773. IEEE, 2015.
- [47] Myungin Ji, Jooyoung Kim, Juil Jeon, and Youngsu Cho. Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of ble beacons in indoor positioning system. In *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 92–95. IEEE, 2015.

- [48] Cemin Zhang, Michael Kuhn, Brandon Merkl, Mohamed Mahfouz, and Aly E Fathy. Development of an uwb indoor 3d positioning radar with millimeter accuracy. In *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International*, pp. 106–109. IEEE, 2006.
- [49] Abdulrahman Alarifi, AbdulMalik Al-Salman, Mansour Alsaleh, Ahmad Alnafessah, Suheer Al-Hadhrami, Mai A Al-Ammar, and Hend S Al-Khalifa. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, Vol. 16, No. 5, p. 707, 2016.
- [50] Alessio De Angelis, Antonio Moschitta, Paolo Carbone, Massimo Calderini, Stefano Neri, Renato Borgna, and Manueto Peppucci. Design and characterization of a portable ultrasonic indoor 3-d positioning system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 10, pp. 2616–2625, 2015.
- [51] Carlos Medina, José Carlos Segura, and Angel De la Torre. Ultrasound indoor positioning system based on a low-power wireless sensor network providing sub-centimeter accuracy. *Sensors*, Vol. 13, No. 3, pp. 3501–3526, 2013.
- [52] H. Zhao, L. Zhang, S. Qiu, Z. Wang, N. Yang, and J. Xu. Pedestrian dead reckoning using pocket-worn smartphone. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 91063–91073, 2019.
- [53] V Schlageter, P-A Besse, RS Popovic, and P Kucera. Tracking system with five degrees of freedom using a 2d-array of hall sensors and a permanent magnet. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 92, No. 1, pp. 37–42, 2001.
- [54] Eugene Paperno, Ichiro Sasada, and Eduard Leonovich. A new method for magnetic position and orientation tracking. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1938–1940, 2001.
- [55] Chao Hu, Shuang Song, Xiaojing Wang, Max Q-H Meng, and Baopu Li. A novel positioning and orientation system based on three-axis magnetic coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 7, pp. 2211–2219, 2012.
- [56] Joerg Blankenbach, Abdelmoumen Norrdine, and Hendrik Hellmers. A robust and precise 3d indoor positioning system for harsh environments. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012 International Conference on*, pp. 1–8. IEEE, 2012.
- [57] Antonio Moschitta, Alessio De Angelis, Marco Dionigi, and Paolo Carbone. Analysis of simultaneous 3d positioning and attitude estimation of a planar coil using inductive coupling. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017 IEEE International*, pp. 1–6. IEEE, 2017.

- [58] Dong Lin and Xin Chen. Mathematical models of 3d magnetic field and 3d positioning system by magnetic field. *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 8, No. 4, p. 1647, 2014.
- [59] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 通路に設置した回転する磁石による歩行者の通過検出手法. *情報処理学会論文誌*, Vol. 58, No. 1, pp. 43–56, 2017.
- [60] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 回転磁石マーカに基づくスマートフォン位置推定. *情報処理学会論文誌*, Vol. 59, No. 1, pp. 138–149, 2018.
- [61] CANAC 総合カタログ. http://www.jishaku.co.jp/pdf/CANAC_catalog.pdf. 2018年1月参照.
- [62] raspberry pi. <https://www.raspberrypi.org>. 2018年1月参照.
- [63] 株式会社シフトロック, ”3次元リアルタイム磁場解析ソルバー qm ver.3.0”. <http://www.slock.co.jp/Qm3/index.html>. 2018年1月参照.
- [64] Hasc Logger. <http://hasc.jp/hc2010/hasclogger.html>. 2018年1月参照.
- [65] 松本直司, 清田真也, 伊藤美穂. 街路空間特性と歩行速度の関係. *日本建築学会計画系論文集*, Vol. 74, No. 640, pp. 1371–1377, 2009.
- [66] T Tony Cai and Lie Wang. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise. *IEEE Transactions on Information theory*, Vol. 57, No. 7, pp. 4680–4688, 2011.
- [67] David L Donoho, Michael Elad, and Vladimir N Temlyakov. Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise. *IEEE Transactions on information theory*, Vol. 52, No. 1, pp. 6–18, 2005.
- [68] Tao Wang, Yong Zhou, Chong Lei, Jun Luo, Shaorong Xie, and Huayan Pu. Magnetic impedance biosensor: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 90, pp. 418–435, 2017.
- [69] Yosuke Ito, Hiroyuki Ohnishi, Keigo Kamada, and Tetsuo Kobayashi. Development of an optically pumped atomic magnetometer using a k-rb hybrid cell and its application to magnetocardiography. *AIP advances*, Vol. 2, No. 3, p. 032127, 2012.

発表実績

学術論文

Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Takeshi Kamiyama, Hiroyuki Sano, Masakatsu Tsukamoto, Masaji Katagiri, Daizo Ikeda, Katsuhiko Kaji, Nobuo Kawaguchi
A Smartphone 3D Positioning Method using a Spinning Magnet Marker
Journal of Information Processing, Vol.27, pp.10-24, 2019

渡邊康祐, 廣井慧, 米澤拓郎, 梶克彦, 河口信夫
回転磁石マーカを用いたスマートフォン2次元経路推定
情報処理学会論文誌, Vol.61, No.2, pp.362-374, 2020

国際会議論文（査読あり）

Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Satoshi Kamiyama, Hiroyuki Sano, Masakatsu Tsukamoto, Masaji Katagiri, Daizo Ikeda, Katsuhiko Kaji, Nobuo Kawaguchi
A Three-Dimensional Smartphone Positioning Method using a Spinning Magnet Marker
10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking(ICMU2017),
pp.38-44, 2017
(Best Paper Award)

Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Katsuhiko Kaji, Nobuo Kawaguchi
A Smartphone Short-Range Path Estimation Method using Spinning Magnet Marker
9th International Conference on Indoor Positioning Indoor Navigation(IPIN2018)

Kosuke Watanabe
A Smartphone Short-Range Path Estimation with Hyperbolic Function for Spinning Magnet Marker
PerCom 2019 Ph.D.Forum, 2019

研究会における発表（査読なし）

渡邊康祐，廣井慧，神山剛，佐野博之，塚本昌克，片桐雅二，池田大造，梶克彦，河
口信夫

回転磁石マーカを用いた3次元位置推定の基礎的検討
情報処理学会全国大会, pp.453-454, 2017

渡邊康祐，廣井慧，神山剛，佐野博之，塚本昌克，片桐雅二，池田大造，梶克彦，河
口信夫

回転磁石マーカによるスマートフォンの3次元位置推定手法
マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム（DICOMO）, pp.1588-1597, 2017

渡邊康祐，廣井慧，梶克彦，河口信夫

回転磁石マーカを用いた基礎的なスマートフォン経路推定
マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム（DICOMO）, pp.1048-1055, 2018

渡邊康祐，廣井慧，米澤拓郎，梶克彦，河口信夫

回転磁石マーカを用いたスマートフォン所持者の2次元経路推定
マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム（DICOMO）, pp.22-28, 2019

渡邊康祐，廣井慧，米澤拓郎，梶克彦，河口信夫

高精度MI磁気センサを用いたSMM位置推定の精度評価
情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム（UBI）, 2020

付録A 式(4.4)~式(4.9)のグラフ

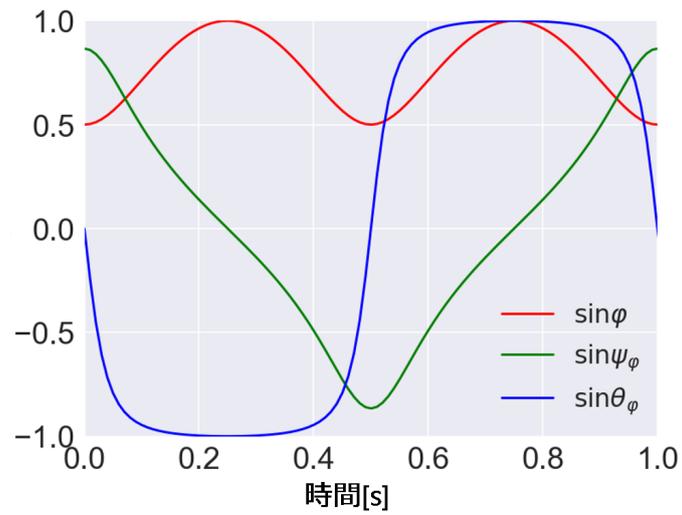


図 A.1: 式(4.4)~式(4.6)のグラフ

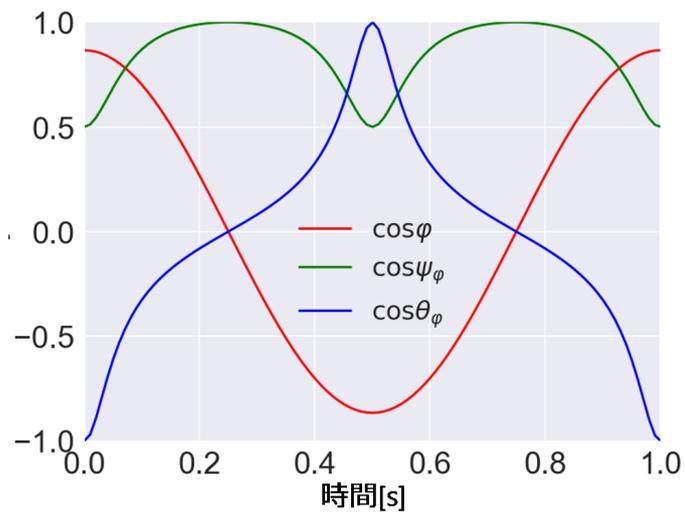


図 A.2: 式(4.7)~式(4.9)のグラフ

付録B 4.5節の推定結果データ

表 B.1: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方位角 1[°] | 11 | 14 | 11 | 6 | 2 | 3 | 5 | 6 | 3 | 7 | 7 | 3.8 |
| 方位角 2[°] | 189 | 191 | 189 | 183 | 180 | 180 | 184 | 187 | 180 | 185 | 185 | 3.9 |
| 仰角 [°] | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 距離 [m] | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0 |

表 B.2: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|-----|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -8 | 4 | -4 | -4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | 0 | 3.8 |
| 方位角 2[°] | 175 | 178 | 178 | 176 | 180 | 179 | 180 | 180 | 184 | 182 | 179 | 2.5 |
| 仰角 [°] | -2 | -2 | -1 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -1 | -2 | 0.4 |
| 距離 [m] | 0.99 | 0.99 | 1 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1 | 1 | 1 | 0.99 | 0.005 |

表 B.3: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -6 | -4 | -3 | -3 | -4 | -4 | -1 | -3 | -1 | 0 | -3 | 1.7 |
| 方位角 2[°] | 172 | 177 | 176 | 177 | 174 | 177 | 176 | 176 | 178 | 180 | 176 | 2.1 |
| 仰角 [°] | -2 | -1 | -1 | -3 | -3 | -2 | -1 | -2 | -2 | -2 | -2 | 0.7 |
| 距離 [m] | 1.51 | 1.5 | 1.51 | 1.51 | 1.51 | 1.52 | 1.51 | 1.51 | 1.51 | 1.52 | 1.51 | 0.005 |

表 B.4: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -8 | 1 | -8 | 1 | -4 | -4 | -1 | 0 | 3 | 1 | -2 | 3.7 |
| 方位角 2[°] | 172 | 180 | 173 | 180 | 176 | 176 | 180 | 180 | 181 | 182 | 178 | 3.3 |
| 仰角 [°] | 2 | -2 | -5 | -3 | -6 | -3 | -4 | -3 | 0 | -2 | -3 | 2.2 |
| 距離 [m] | 2.03 | 2 | 2 | 2.04 | 2 | 2.03 | 2.01 | 2.04 | 1.98 | 2.05 | 2.02 | 0.022 |

表 B.5: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 16 | -3 | 1 | 2 | -2 | 7 | -6 | -18 | -9 | 2 | -1 | 8.7 |
| 方位角 2[°] | 196 | 177 | 180 | 181 | 180 | 185 | 176 | 166 | 173 | 180 | 179 | 7.4 |
| 仰角 [°] | -2 | -6 | 5 | -3 | -7 | 1 | -5 | 4 | 9 | 3 | 0 | 5 |
| 距離 [m] | 2.47 | 2.56 | 2.61 | 2.6 | 2.45 | 2.68 | 2.68 | 2.6 | 2.49 | 2.51 | 2.56 | 0.079 |

表 B.6: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 0^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 11 | -6 | -13 | -4 | 17 | 6 | 2 | -16 | -1 | -3 | -1 | 9.7 |
| 方位角 2[°] | 189 | 173 | 169 | 177 | 193 | 183 | 180 | 166 | 176 | 176 | 178 | 8 |
| 仰角 [°] | -3 | -6 | -8 | -8 | -12 | -6 | -8 | -1 | 12 | -5 | -4 | 6.2 |
| 距離 [m] | 3.21 | 2.88 | 3.39 | 3.21 | 2.85 | 2.84 | 2.93 | 3.02 | 3.29 | 3.28 | 3.09 | 0.197 |

表 B.7: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方位角 1[°] | 11 | 6 | 7 | 1 | 7 | 6 | 10 | 4 | 3 | 3 | 6 | 3 |
| 方位角 2[°] | 189 | 183 | 184 | 180 | 187 | 185 | 189 | 183 | 182 | 182 | 184 | 2.9 |
| 仰角 [°] | 29 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 | 30 | 30 | 30 | 0.4 |
| 距離 [m] | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0 |

表 B.8: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方位角 1[°] | -4 | -2 | -1 | -3 | -2 | -4 | -12 | -4 | -2 | 1 | -3 | 3.3 |
| 方位角 2[°] | 176 | 176 | 177 | 178 | 176 | 175 | 170 | 177 | 177 | 180 | 176 | 2.4 |
| 仰角 [°] | 29 | 29 | 30 | 29 | 29 | 29 | 29 | 30 | 30 | 29 | 29 | 0.5 |
| 距離 [m] | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 0 |

表 B.9: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 14 | 7 | 9 | 10 | 8 | 11 | 10 | 10 | 14 | 13 | 11 | 2.3 |
| 方位角 2[°] | 191 | 186 | 189 | 185 | 187 | 189 | 189 | 189 | 193 | 190 | 189 | 2.2 |
| 仰角 [°] | 28 | 30 | 29 | 28 | 29 | 29 | 28 | 28 | 28 | 27 | 28 | 0.8 |
| 距離 [m] | 1.57 | 1.56 | 1.55 | 1.56 | 1.56 | 1.56 | 1.55 | 1.57 | 1.57 | 1.56 | 1.56 | 0.007 |

表 B.10: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 13 | 8 | 13 | 12 | 17 | 15 | 18 | 5 | 10 | 7 | 12 | 4.1 |
| 方位角 2[°] | 191 | 186 | 192 | 191 | 194 | 192 | 197 | 185 | 190 | 185 | 190 | 3.7 |
| 仰角 [°] | 27 | 29 | 25 | 24 | 31 | 25 | 27 | 27 | 29 | 26 | 27 | 2 |
| 距離 [m] | 2.04 | 1.97 | 2.06 | 2.04 | 2.04 | 2.09 | 2.08 | 2.08 | 2 | 2.07 | 2.05 | 0.036 |

表 B.11: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 32 | 36 | 35 | 43 | 39 | 31 | 36 | 38 | 56 | 41 | 39 | 6.8 |
| 方位角 2[°] | 211 | 214 | 212 | 221 | 218 | 209 | 215 | 215 | 235 | 218 | 217 | 7 |
| 仰角 [°] | 23 | 38 | 29 | 35 | 36 | 28 | 30 | 29 | 20 | 25 | 29 | 5.5 |
| 距離 [m] | 2.58 | 2.42 | 2.56 | 2.55 | 2.43 | 2.61 | 2.69 | 2.56 | 2.61 | 2.55 | 2.56 | 0.077 |

表 B.12: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 30^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -23 | 3 | 36 | 10 | -37 | 4 | 67 | 38 | -1 | -34 | 6 | 31.6 |
| 方位角 2[°] | 158 | 184 | 214 | 186 | 141 | 183 | 245 | 218 | 178 | 148 | 186 | 31 |
| 仰角 [°] | 28 | 30 | 20 | 38 | 30 | 29 | 21 | 20 | 28 | 19 | 26 | 5.8 |
| 距離 [m] | 3.61 | 3 | 3.25 | 2.94 | 3.03 | 3.05 | 3.32 | 3 | 3.27 | 3.36 | 3.18 | 0.203 |

表 B.13: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方位角 1[°] | 15 | 10 | 11 | 10 | 5 | 5 | 11 | 9 | 12 | 12 | 10 | 2.9 |
| 方位角 2[°] | 193 | 188 | 189 | 188 | 183 | 187 | 189 | 188 | 190 | 188 | 188 | 2.4 |
| 仰角 [°] | 70 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 71 | 0.3 |
| 距離 [m] | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0 |

表 B.14: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 14 | 17 | 12 | 9 | 16 | 9 | 8 | 11 | 6 | 12 | 11 | 3.4 |
| 方位角 2[°] | 195 | 195 | 189 | 188 | 193 | 187 | 186 | 190 | 187 | 193 | 190 | 3.3 |
| 仰角 [°] | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 | 66 | 67 | 66 | 67 | 67 | 0.4 |
| 距離 [m] | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.006 |

表 B.15: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 25 | 10 | 19 | 16 | 9 | 8 | 18 | 9 | 14 | 13 | 14 | 5.2 |
| 方位角 2[°] | 205 | 190 | 200 | 194 | 187 | 189 | 196 | 189 | 192 | 191 | 193 | 5.3 |
| 仰角 [°] | 64 | 64 | 60 | 64 | 65 | 64 | 62 | 65 | 63 | 63 | 63 | 1.4 |
| 距離 [m] | 1.49 | 1.5 | 1.54 | 1.52 | 1.48 | 1.51 | 1.52 | 1.49 | 1.5 | 1.5 | 1.51 | 0.017 |

表 B.16: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| 方位角 1[°] | 62 | 23 | 16 | 20 | -3 | 20 | 24 | 16 | 3 | 30 | 21 | 16.5 |
| 方位角 2[°] | 241 | 202 | 193 | 198 | 180 | 198 | 201 | 192 | 182 | 211 | 200 | 16.3 |
| 仰角 [°] | 59 | 62 | 63 | 57 | 64 | 62 | 66 | 69 | 64 | 61 | 63 | 3.2 |
| 距離 [m] | 1.99 | 1.97 | 1.98 | 2.08 | 2.04 | 1.98 | 1.97 | 1.95 | 2.02 | 2 | 2 | 0.037 |

表 B.17: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 40 | 76 | 34 | 61 | 71 | 16 | 36 | -55 | 3 | 33 | 32 | 36.1 |
| 方位角 2[°] | 217 | 232 | 213 | 228 | 243 | 210 | 218 | 120 | 187 | 193 | 206 | 32.8 |
| 仰角 [°] | 49 | 48 | 69 | 53 | 45 | 59 | 51 | 58 | 67 | 49 | 55 | 7.8 |
| 距離 [m] | 2.82 | 2.71 | 2.43 | 2.56 | 2.64 | 2.76 | 2.67 | 2.58 | 2.35 | 2.63 | 2.62 | 0.136 |

表 B.18: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = 60^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -20 | -30 | 33 | 48 | -57 | 37 | 36 | 41 | 11 | 21 | 12 | 33.8 |
| 方位角 2[°] | 162 | 155 | 206 | 227 | 120 | 215 | 214 | 218 | 190 | 194 | 190 | 32.5 |
| 仰角 [°] | 87 | 89 | 76 | 49 | 79 | 51 | 59 | 45 | 66 | 75 | 68 | 15.2 |
| 距離 [m] | 2.55 | 2.36 | 2.79 | 2.82 | 2.66 | 3.05 | 3.1 | 3.04 | 3.16 | 2.63 | 2.82 | 0.253 |

表 B.19: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 11 | 9 | 7 | 12 | 7 | 5 | 11 | 7 | 7 | 16 | 9 | 3.1 |
| 方位角 2[°] | 190 | 187 | 185 | 191 | 186 | 183 | 189 | 185 | 186 | 194 | 188 | 3.2 |
| 仰角 [°] | -31 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | -32 | 0.3 |
| 距離 [m] | 0.5 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.003 |

表 B.20: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 7 | 1 | 7 | 11 | 7 | 9 | 7 | 4 | 8 | 9 | 7 | 2.6 |
| 方位角 2[°] | 185 | 182 | 185 | 187 | 187 | 187 | 188 | 184 | 185 | 188 | 186 | 1.8 |
| 仰角 [°] | -30 | -30 | -30 | -30 | -30 | -30 | -29 | -30 | -30 | -29 | -30 | 0.4 |
| 距離 [m] | 0.99 | 0.99 | 1 | 0.99 | 1 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.004 |

表 B.21: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 15 | 6 | 9 | 16 | 4 | 13 | 7 | 6 | 16 | 11 | 10 | 4.3 |
| 方位角 2[°] | 192 | 185 | 189 | 193 | 181 | 189 | 183 | 185 | 192 | 189 | 188 | 3.9 |
| 仰角 [°] | -28 | -29 | -29 | -29 | -29 | -28 | -29 | -29 | -29 | -30 | -29 | 0.5 |
| 距離 [m] | 1.53 | 1.53 | 1.53 | 1.52 | 1.52 | 1.53 | 1.52 | 1.53 | 1.53 | 1.52 | 1.53 | 0.005 |

表 B.22: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 31 | 18 | -1 | 0 | 2 | -1 | 4 | 1 | -1 | 10 | 6 | 10.1 |
| 方位角 2[°] | 205 | 196 | 178 | 180 | 181 | 178 | 184 | 180 | 179 | 189 | 185 | 8.6 |
| 仰角 [°] | -30 | -31 | -30 | -33 | -31 | -34 | -28 | -31 | -29 | -30 | -31 | 1.7 |
| 距離 [m] | 2.17 | 2.07 | 2.07 | 2.03 | 2.03 | 2.09 | 2.11 | 2.07 | 2.13 | 2.08 | 2.08 | 0.041 |

表 B.23: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 7 | 20 | 3 | 4 | 13 | 3 | 20 | 3 | 18 | -3 | 9 | 7.9 |
| 方位角 2[°] | 184 | 196 | 183 | 184 | 189 | 184 | 196 | 181 | 196 | 177 | 187 | 6.5 |
| 仰角 [°] | -24 | -25 | -28 | -30 | -33 | -36 | -30 | -27 | -25 | -28 | -29 | 3.6 |
| 距離 [m] | 2.38 | 2.56 | 2.42 | 2.57 | 2.38 | 2.44 | 2.61 | 2.46 | 2.51 | 2.42 | 2.48 | 0.078 |

表 B.24: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -30^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -68 | -1 | 24 | 7 | -10 | 20 | 34 | 22 | -6 | 9 | 3 | 27.2 |
| 方位角 2[°] | 115 | 179 | 201 | 185 | 171 | 198 | 213 | 203 | 175 | 185 | 183 | 25.9 |
| 仰角 [°] | -27 | -26 | -26 | -34 | -38 | -25 | -25 | -21 | -25 | -23 | -27 | 4.9 |
| 距離 [m] | 3.27 | 3.27 | 3.06 | 3.37 | 3.25 | 3.12 | 3.08 | 3.23 | 3.25 | 2.99 | 3.19 | 0.113 |

表 B.25: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 0.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 方位角 1[°] | 20 | 16 | 14 | 19 | 14 | 11 | 14 | 14 | 15 | 9 | 15 | 3.1 |
| 方位角 2[°] | 200 | 195 | 192 | 197 | 192 | 189 | 193 | 191 | 193 | 189 | 193 | 3.3 |
| 仰角 [°] | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | -71 | 0 |
| 距離 [m] | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0 |

表 B.26: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 1\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 27 | 13 | 11 | 10 | 7 | 2 | 11 | 1 | 11 | 9 | 10 | 6.7 |
| 方位角 2[°] | 205 | 193 | 189 | 189 | 186 | 182 | 189 | 182 | 187 | 188 | 189 | 6.2 |
| 仰角 [°] | -66 | -66 | -66 | -66 | -66 | -66 | -66 | -66 | -67 | -68 | -66 | 0.6 |
| 距離 [m] | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.005 |

表 B.27: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 1.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | 6 | 8 | -3 | 1 | 2 | -5 | 2 | 1 | -2 | 2 | 1 | 3.7 |
| 方位角 2[°] | 184 | 187 | 177 | 180 | 179 | 178 | 182 | 180 | 178 | 183 | 181 | 3 |
| 仰角 [°] | -62 | -64 | -63 | -64 | -65 | -62 | -62 | -61 | -57 | -64 | -62 | 2.2 |
| 距離 [m] | 1.53 | 1.49 | 1.52 | 1.54 | 1.53 | 1.53 | 1.54 | 1.54 | 1.58 | 1.5 | 1.53 | 0.023 |

表 B.28: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 2\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|
| 方位角 1[°] | -14 | 2 | -16 | -6 | -8 | -24 | -18 | 18 | 18 | -9 | -6 | 13.6 |
| 方位角 2[°] | 167 | 176 | 165 | 175 | 173 | 159 | 164 | 195 | 196 | 173 | 174 | 11.8 |
| 仰角 [°] | -57 | -66 | -60 | -59 | -61 | -59 | -60 | -58 | -58 | -56 | -59 | 2.6 |
| 距離 [m] | 2.05 | 1.93 | 1.97 | 2.05 | 2 | 2.04 | 2.1 | 2.09 | 2 | 2.03 | 2.03 | 0.05 |

表 B.29: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 2.5\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-------|
| 方位角 1[°] | -29 | 3 | -4 | -25 | 22 | -40 | 66 | -39 | 54 | -3 | 1 | 35.2 |
| 方位角 2[°] | 153 | 182 | 177 | 155 | 206 | 140 | 247 | 142 | 232 | 180 | 181 | 35 |
| 仰角 [°] | -65 | -62 | -72 | -57 | -51 | -51 | -49 | -53 | -52 | -69 | -58 | 7.9 |
| 距離 [m] | 2.43 | 2.51 | 2.36 | 2.53 | 2.72 | 2.77 | 2.52 | 2.62 | 2.6 | 2.32 | 2.54 | 0.138 |

表 B.30: 方位角 $\theta = 0^\circ$, 仰角 $\psi = -60^\circ$, 距離 $r = 3\text{m}$ の推定結果

| | 1回目 | 2回目 | 3回目 | 4回目 | 5回目 | 6回目 | 7回目 | 8回目 | 9回目 | 10回目 | 平均 | 標準偏差 |
|-------------------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|
| Azimuth1 [degree] | 22 | -46 | -10 | -9 | -14 | -27 | -76 | 63 | 23 | -27 | -10 | 37 |
| 方位角 2[°] | 199 | 137 | 165 | 171 | 167 | 151 | 105 | 243 | 199 | 155 | 169 | 36 |
| 仰角 [°] | -62 | -64 | -63 | -90 | -66 | -82 | -51 | -38 | -67 | -65 | -65 | 13.6 |
| 距離 [m] | 2.92 | 2.46 | 2.9 | 2.39 | 2.85 | 2.57 | 3.1 | 3.04 | 2.73 | 2.76 | 2.77 | 0.226 |

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方々のご支援をいただきました。この場を借りて感謝の意を述べたいと思います。

研究への詳細な助言だけでなく、研究に集中できる環境を与えてくださった主指導教員の名古屋大学 河口信夫教授に感謝の意を表します。また私の研究に関して様々な面で支えていただいた京都大学 廣井慧准教授、名古屋大学 米澤拓郎准教授、愛知工業大学 梶克彦准教授に感謝いたします。指導教員の方々におかれましては、研究面でなく発表資料の作成やプレゼンテーションの方法などについてもご指導いただき、研究活動に必要な能力形成の大きな助けになりました。

名古屋大学 道木慎二教授、名古屋大学 内山剛准教授、奈良先端科学技術大学院大学 安本慶一教授、長崎大学 神山剛准教授におかれましては、本論文を執筆するにあたって数々のご助言をしていただき、感謝申し上げます。

共同研究という形でご協力いただいた株式会社NTTドコモの関係者の皆様に感謝いたします。本研究に関して様々なご支援をいただき、また回転磁石マーカの開発やアプリを用いたデモを何度か開催していただきました。

研究生活を送る上でお世話になった同じ研究室のメンバー、特に同期の浦野健太君にお礼を述べたいと思います。工学部出身でない私にとって、この分野での研究活動は不慣れなことが多く、最初はPCの基本的な設定すらままならない状態でしたが、困っている私に対して何度も熱心に基礎的な使い方や知識を教えてくださいました。

最後に、既に就職していたにもかかわらず、退職して再び大学院での研究活動に取り組むため、私の生活を支えてくれた父 祐謙、母 美知子にもこの場を借りて感謝を述べたいと思います。

回転磁石マーカによる動的磁場を用いた
スマートデバイスの位置推定手法

2021年4月

渡邊 康祐