

博士論文（要約）

# 双極子回転型電磁場源を用いた 三次元定位法

東京大学大学院情報理工学系研究科  
システム情報学専攻  
千葉昭宏

指導教員 奈良高明 教授



## 概要

物体の三次元定位には、工場や倉庫での移動ロボットの制御や屋内ナビゲーション、雪崩や瓦礫に埋もれた人の探索など、様々な応用がある。従来の電波や超音波に基づく位置推定手法には、マルチパスによる精度の悪化や、オクルージョンへの対応に課題があった。そこで、本論文では周辺環境の影響を受けにくい低周波磁場に着目する。従来、水平面内で回転する磁気双極子をマーカとして、最大の磁場が観測される時刻からセンサの位置を推定する手法が提案されていた。この手法は、最大値の検知に基づいているためノイズに弱く、時刻を検知するためにはマーカとセンサとの間で時刻同期が必要であり、システムが複雑になるなど、実用上の課題があった。そこで、本論文では、双極子回転型電磁場源によって生成される磁場の周波数成分に着目し、観測磁場を直交検波することで、ノイズに頑健で、時刻同期不要な手法を提案する。時刻同期が不要になったことで、既存の回転体をマーカとして活用できるなど、幅広い応用への展開が期待される。

第1章では、背景を述べた後、関連する研究を体系的にまとめ、本論文で提案する手法の位置付けを明確にする。

第2章では、双極子回転型電磁波源の定位法の基礎理論を述べる。提案手法では、双極子回転型電磁場源の発する磁場の周波数成分を用いて、磁気双極子モーメントの回転の初期位相を知ることなく、原点に配置したセンサから電磁場源への方位角、天頂角、距離を推定する。観測される磁場の正周波数成分に基づく手法と負周波数成分に基づく手法、正負の周波数成分に基づく手法の3種類の定位法を提案し、それぞれの誤差傾向をシミュレーションによって明らかにする。

第3章では、第2章で述べた定位方法の有効性を検証する。静磁石をモータで回転させる機械式双極子回転型電磁場源を製作し、Magnetic Impedance (MI) センサで構成されるセンサユニットを用いた実験により、基礎理論の有効性を検証する。移動するマーカの位置を追跡可能であること、センサがアルミ板のような非磁性の金属に囲まれていたとしても、精度が悪化しないことを実験的に示す。また、直交するコイルを用いて等価的に磁気双極子モーメントを回転させる電磁式双極子回転型電磁場源の有効性を検証する。

第4章では、第2章で述べた磁場源定位法を拡張し、センサ座標系が世界座標系と一致しない場合の補正法を提案する。瓦礫埋没者の探索や屋内ナビゲーションなど、センサ位置を推定する場合、センサ座標系が傾き、世界座標系と一致しない。センサ位置を推定するためには、傾いた状態のセンサで観測される磁場を補正する必要がある。一般に方位角の傾きは地磁気に基づいて補正されるが、瓦礫埋没者の探索などでセンサ周辺に磁性体が存在する場合、地磁気が歪められ補正が困難である。そこで、本論文では、双極子回転型電磁場源を補正に利用し、地磁気を用いずに補正する方法を提案する。瓦礫埋没者の探索を想定した複数のスマートフォンの同時位置推定、屋内ナビゲーションを想定した複数の電磁場源を用いたスマートフォンの自己位置推定を実験により検証する。また、機械式と電磁式の両方の機構を組み合わせたハイブリッド型電磁場源を提案し、有効性を検証する。

第 5 章では、比較的長距離の探索を目指した電波源探索について述べる。電磁波のエネルギーの流れを表す Poynting ベクトルをもとに 920 MHz の発信機の位置を探索することを考える。本論文では、電場ベクトルから磁場ベクトルを推定することで、電場ベクトルを観測するのみで Poynting ベクトルを得る方法を提案する。提案手法を用いて、電場ベクトルから得られた Poynting ベクトルに沿って探索を進めることで、最終的に電磁波源に到達することを考える。

6 章では、結論と今後の展望を述べる。

# 目次

第 1 章	序章	1
1.1	背景 . . . . .	1
1.2	位置推定の分類 . . . . .	2
1.3	従来研究 . . . . .	5
1.4	研究の目的 . . . . .	13
1.5	論文の構成 . . . . .	14
第 2 章	双極子回転型電磁場源定位の基礎理論	15
2.1	緒言 . . . . .	15
2.2	問題設定 . . . . .	16
2.3	観測される磁場ベクトル . . . . .	17
2.4	天頂角 $\psi$ の推定 . . . . .	18
2.5	方位角 $\phi$ の推定 . . . . .	18
2.6	距離 $r$ の推定 . . . . .	20
2.7	提案手法のまとめ . . . . .	21
2.8	シミュレーション . . . . .	22
2.9	結言 . . . . .	29
第 3 章	双極子回転型電磁場源定位の検証	30
3.1	緒言 . . . . .	30
3.2	機械式マーカの定位 . . . . .	30
3.3	電磁式マーカの方向推定 . . . . .	47
3.4	結言 . . . . .	53
第 4 章	電磁場源定位を応用した携帯端末の位置推定	54
4.1	緒言 . . . . .	54
4.2	背景 . . . . .	54
4.3	問題設定 . . . . .	56
4.4	提案手法：座標系の傾きへの対応 . . . . .	58
4.5	実験：加速度と地磁気を用いた補正 . . . . .	60

iv 目次

4.6	実験：スマートフォンの探索 . . . . .	61
4.7	実験：自由姿勢のスマートフォンを用いたナビゲーション . . . . .	61
4.8	ハイブリッド型マーカ . . . . .	61
4.9	結言 . . . . .	61
第 5 章	電波源の探索 . . . . .	64
5.1	緒言 . . . . .	64
5.2	提案手法 . . . . .	65
5.3	シミュレーション . . . . .	67
5.4	実験 . . . . .	70
5.5	考察 . . . . .	73
5.6	結言 . . . . .	74
第 6 章	結論 . . . . .	75
	謝辞 . . . . .	78
	参考文献 . . . . .	79
付録 A	<i>IQ</i> 成分に基づく定位法 . . . . .	85
付録 B	双極子モーメントの振幅を変化させる方法 . . . . .	86
B.1	問題設定 . . . . .	86
B.2	振幅を変化させることによる定位 . . . . .	86
B.3	シミュレーション . . . . .	87
付録 C	発表 . . . . .	89

# 第 1 章

## 序章

### 1.1 背景

空を飛ぶ鳥の中には、冬の寒い時期を南方で過ごし、夏の暑い時期を北方で過ごす種類の鳥がいる。一般的に渡り鳥と呼ばれるこうした鳥たちは、広い地球の何を目印として飛び立ち、正しい目的地へとたどり着くのだろうか。一説によると、一部の動物たちは体内に地球の地磁気を検知する機能を持っており、地表面で南極から北極へ伸びる磁力線を頼りに飛んでいるという [1]。地球上のほとんどの箇所で観測可能な地磁気を用いることは、合理的な方向推定方法であり、自然の偉大さを感じさせる。

鳥だけでなく、人類も方位磁針を発明し、地磁気を使って方位を知るようになった。方位を知ることで、地球上での自分の位置を把握することが可能になり、人々は世界中を移動するようになった。位置を知ることは、人類に移動の自由を与え、文明の発展に寄与したのだ。

「位置」という基本的な情報は、現在、日常生活の様々な場面で使われている。例えば、ショッピングモールへ買い物に行くシーンを考えてみても、まず、自分の家からショッピングモールまで行くには、経路を示す位置情報が必要である。ショッピングモールに到着すると、今度は目的の店舗のショッピングモール内での位置情報が必要になる。さらに、店舗まで移動する間も、自分が今どこにいるのかを常に把握する必要がある。店舗に着いてからも、局所的な位置情報が必要である。目的の商品が置かれている棚の位置を探し、目的の商品が棚の何段目にあるのか、さらに探索する。買い物という日常的な行動のなかにも、店舗までの道のりといった広大な範囲での位置情報から、棚の中での商品の配置といった限られた範囲での位置情報まで、様々な位置情報が用いられている。

広い範囲から狭い範囲まで、すべての範囲を対象とする位置推定技術はなく、その範囲に応じて適切な位置推定技術が必要である。例えば、ショッピングモールまでのナビゲーションのような地球規模の位置推定には、スマートフォンに搭載された Global Positioning System (GPS) が使用されるだろう。逆に、棚の中での商品の位置推定のような狭い範囲には、商品に IC タグを取り付け、棚にタグを読み取るリーダを付けておくことで解決されるだろう [2]。また、その範囲の探索では、目視による探索でも十分である。問題となるのは、ショッピングモールや店舗内での位置のような、数 m 規模の屋内位置推定である。なぜならば、屋内では

## 2 第1章 序章

衛星からの信号を受信できず、GPS が利用できないからである。もし屋内で自分の位置を推定することができれば、ショッピングモール内での自分の位置を把握できるようになり、迷わずに店舗に向かえる。さらに、GPS と併用することで屋外から屋内へシームレスに店舗までナビゲーションすることもできるだろう。また、店舗内での目的の商品の位置もわかれば、商品までまっすぐに進み、見つけることが可能になるだろう。

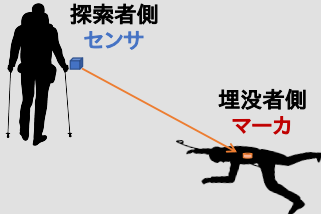
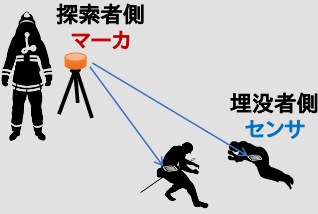
こうした数 m 規模の位置推定には、他にも様々な応用がある。例えば、工場などの屋内で稼働する移動ロボットや台車などの移動体の位置を追跡できれば、移動ロボットを制御したり、台車が立ち入り禁止区画に侵入したら警告したりすることもできるだろう。また、特に GPS の電波の届かない水分や金属の層に覆われた物体の位置を推定することができれば有用である。例えば、雪崩に埋もれた人や、地震で瓦礫に埋もれた人などである。もし雪崩や瓦礫に埋もれた人の位置を推定することができれば、迅速な救助に役立つだろう。このように、GPS が利用できないような屋内や雪・瓦礫に埋没している状況で物体の位置を推定することができれば、日常生活から災害時まで、様々な場面で便利で安全な生活を実現することができる。

### 1.2 位置推定の分類

前節で述べたような、屋内での物体の位置推定を実現するとしたら、物理的な場を発する送信機を目印に、受信機でその信号を受信して探索することになるだろう。本論文では、この物理的な場を発する発信機をマーカと呼び、その情報を計測する受信機をセンサと呼ぶことにする。

マーカを用いた位置推定では、位置を推定される側の物体にマーカを取り付ける場合とセンサを取り付ける場合に大別される（表 1.1）。雪崩に巻き込まれた人の救助の例では、登山開始前に事前にマーカをメンバが持っておき、いざ雪崩に巻き込まれたときにはセンサを使って埋没しているメンバを探索するといったことが考えられる。この例では、位置推定される側が

表 1.1: 位置推定の種類

	センサから見たマーカの定位	マーカから見たセンサの定位
探索する側	センサ (世界座標に対して位置固定)	マーカ (世界座標に対して移動)
探索される側	マーカ (世界座標に対して移動)	センサ (世界座標に対して位置固定)
イメージ		
想定される応用	<ul style="list-style-type: none"><li>雪崩埋没者の探索</li><li>移動するロボットの位置把握</li><li>店舗での商品の探索</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>瓦礫埋没者の探索</li><li>ドローンの制御</li><li>屋内ナビゲーション</li></ul>



マーカを持ち、位置推定する側がセンサを持つことになる。一方で、瓦礫に埋もれた人の救助の例では、雪崩の例のようにあらかじめマーカを持ち歩いておくということは考えにくい。ため、探索される側がいつも持ち歩いているであろうスマートフォンのセンサを活用することが妥当であろう。この例では、位置推定される側がセンサを持ち、位置推定する側がマーカを持つことになる。両者の違いは、世界座標系を位置推定する側とされる側のどちらに設定するかであり、センサとマーカ間の相対的な距離を推定できれば、両者に対応できるであろう。

先の埋没者探索で重要なのは、雪崩や瓦礫などの遮蔽物に囲まれた環境でも位置推定可能であることである。目視による探索は難しいため、雪や瓦礫を透過するような物理場を用いる必要がある。埋没者を覆う雪崩は水分を多く含み、瓦礫の中には金属なども含まれるであろうから、物理場の種類によっては、減衰や反射の影響を受けるであろう。

さらに、こうした災害時の救助では迅速な探索が求められる。雪崩埋没者の救助では、15分以内の救助が理想とされている。ある方向にのみ探索が可能な指向性のあるセンサを用いて、それを移動させながらスキャンするような方法では、探索に時間がかかる。迅速な救助のためには、指向性のない定位システムを用いて、直接的に埋没者の位置を推定することが求められる。

また、買い物の例でも、応用先に合わせて、対象のマーカ位置を推定するか、センサの自己位置を推定するかが異なる。例えば、店舗内で目的の商品を探すような用途では、商品にマーカを設置しておき、来店客はスマートフォン（センサ）を見ながら、マーカ位置を推定することになる。一方で、ショッピングモール内でのナビゲーションのように自分の位置を把握するときには、スマートフォン（センサ）の自己位置を推定することになる。買い物の例でも、定位範囲内には人や金属の棚などが存在しており、場合によっては、物理場の減衰や反射の影響を受けるであろう。また、スムーズに買い物をするためにも、指向性のない定位システムを用いた最短経路での探索が望まれるであろう。

工場や倉庫での荷物を輸送する移動ロボットの例でも、マーカ位置の推定とセンサ位置の推定は使い分けられる。例えば、作業員と移動ロボットの位置関係を把握しておき、接触しそうなときに警告を発するような応用が考えられる。こうしたシステムに適用する場合、作業員にセンサを持たせておき、センサからみた移動ロボットの位置を推定し、接近したときに作業員に警告する。または、ロボットにセンサを設置しておき、マーカを持った作業員が接近したときに、停止することになる。いずれにしても、これらの例では、センサを中心としたマーカ位置を推定することになる。作業員とロボットの距離だけでなく、接近してくる方向も推定することができれば、ロボットの前から作業員が接近したときのみロボットを停止するなど、高度な制御システムを実現できる。一方で、移動ロボットが倉庫内を自律走行するような場合は、倉庫内でのロボットの自己位置が必要であるため、移動ロボットにセンサを取り付けておき、周辺環境に設置したマーカに基づいて自己位置推定することになる。移動ロボットの例でも、工場や倉庫には什器や装置などが存在し、マーカの発する物理場が反射される可能性がある。また、死角から飛び出してくる作業員やロボットとの接触を防ぐためには、ある程度の遮蔽に頑健である必要がある。また、方向に依らずにロボットの接近を知る必要があるため、指向性のない位置推定が必要である。

#### 4 第1章 序章

以上，埋没者探索，買い物，移動ロボットの制御の例を通じて，マーカ・センサ位置推定の適用を検討したが，いずれの例でも水分や金属による遮蔽，反射の影響，および，定位範囲の指向性への対応が重要であることが示唆された．そこで次節では，遮蔽や反射などへの頑健性と定位範囲の指向性に着目して従来研究をまとめるとともに，本研究の位置づけを明らかにする．

## 1.3 従来研究

位置推定方法についての従来手法をまとめる。物理的な情報を用いた探索では、表 1.1 に示したように「センサから見たマーカ位置の推定」と「マーカから見たセンサ位置の推定」に大別することができる。本節では、それぞれの推定方法に対して、従来研究を次の観点から比較する。

- 指向性：全方位的な位置推定手法であるか、特定の方向に対して精度・感度が高いような指向性を持つ手法であるかを比較する
- 頑健性：探索領域内の物体による遮蔽（オクルージョン）や反射（マルチパス）など環境に対する頑健性を比較する

これらの観点で、従来の研究と本研究の位置づけを示した表を表 1.2 に示す。

表 1.2: 本研究の位置づけ

		センサから見たマーカの位置推定		マーカから見たセンサの位置推定	
探索する側		センサ		マーカ	
探索される側		マーカ		センサ	
頑健性 (*)		NG	OK	NG	OK
指向性	あり	超音波 [3-5]	雪崩ビーコン [6]	SLAM [7,8] カメラ [9-14]	地中レーザ [15]
	なし	画像処理 [16-18] 電波 [4,19-21]	センサアレイ [22,23] 荷重積分法 [24-29] 本研究 (第 2, 3 章)	GPS [30] Wi-Fi, BLE [31-33]	地磁気 [34,35] RFID [36,37] 回転磁場 [38,39] 本研究 (第 4 章)

(\*) 環境中の物体による遮蔽（オクルージョン）、反射（マルチパス）への対応

### 1.3.1 センサから見たマーカ位置の推定

本節では、環境中に設置されたセンサを用いて、位置推定したい対象に取り付けたマーカ位置を推定する手法をまとめる。

#### 超音波

GPS の使えない屋内において、移動する人物を追跡するような応用には、超音波による定位が提案されている [3-5]。定位したい対象に超音波の送信機を取り付けておき、天井などに配置したセンサアレイを用いて送信機の位置を推定する [3]。移動する物体も誤差数 cm の精

## 6 第1章 序章

度で追跡できるという利点がある。しかしながら、超音波には指向性があり、定位精度に指向性がある。また、音波を用いるため温度や風の影響を受けやすく、遮蔽物があると定位できないという課題がある。

### 画像処理

画像処理により対象の位置を推定する方法もある。環境中に配置したカメラを用いて対象に取り付けたマーカの位置を推定する。RGB 画像を用いる方法 [16,17] のほか、赤外光を用いる方法 [18] がある。広角の撮影が可能なカメラを用いれば、広い範囲を指向性なく定位可能である。しかしながら、超音波の例と同様に遮蔽物に囲まれた対象を探すことはできない。

以上のように、超音波や画像処理などのセンサを用いて対象の位置を推定する手法は、比較的簡便な装置を用いて位置推定できるという利点がある一方で、遮蔽物の存在や光量、風速など周辺環境の影響を強く受ける。雪崩に埋もれた人を探索するような用途には応用することは難しい。

### 電波

超音波と比較してオクルージョンに強い手法として電波がある。周波数が 40 kHz の超音波の波長 8.5 mm に対して、2.45 GHz の電波の波長は、122.4 mm であり、環境中の物体に対して回折することが期待できるためである。電波を用いた位置推定手法として、Wi-Fi [19,20] や Bluetooth Low Energy (BLE) [21]、サブ GHz 帯の電波 [4] などの電波強度に基づく手法が提案されている。浦野ら [21] は、屋内において移動する被験者に BLE タグを持たせ、環境中に配置したスキャナを用いて電波強度を観測し、パーティクルフィルタによって位置を推定している。電波を用いるため定位範囲に指向性はないが、23 m×70 m の範囲における推定された位置の平均誤差は 3.6 m にとどまっている。これは比較的周波数の高い電波を用いた手法では、人体による電波強度の減衰 [40] や什器などの金属によるマルチパスの影響で誤差が大きという課題があるためである [41]。

### 低周波電磁場

屋内において、高周波の電波が人などの水分による吸収の影響や、柵などの金属の反射の影響を受けやすいことを考慮すると、信号の波長  $\lambda/(2\pi)$  が、適用範囲に比べて十分に長い低周波の電磁場源の利用が考えられる。雪山で遭難者の探索に用いられる雪崩ビーコン (図 1.1) は、その一例である。雪崩ビーコンは、バーアンテナを内蔵した電磁波源で、457 kHz という比較的周波数の低い信号を発信し、その波長は  $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{3 \times 10^8 / (457 \times 10^3)}{2\pi} = 104$  [m] となり、数十 m の範囲で低周波磁場源とみなせる。雪崩ビーコンを用いた探索では、探索者は、埋没者の持つビーコンから発せられる磁場をセンサで計測し、磁場の強度や方向を頼りに探索する [6]。こうした手法は、得られる情報が現地点からの磁力線の向きであり、指向性があった。このため、最終的な到達点に関する情報を把握できず、条件によっては、最短経路から離れた経路を通る可能性があった。

低周波磁場源は、雪崩探索以外にも、高周波電波源を用いることのできない水中や水辺にお

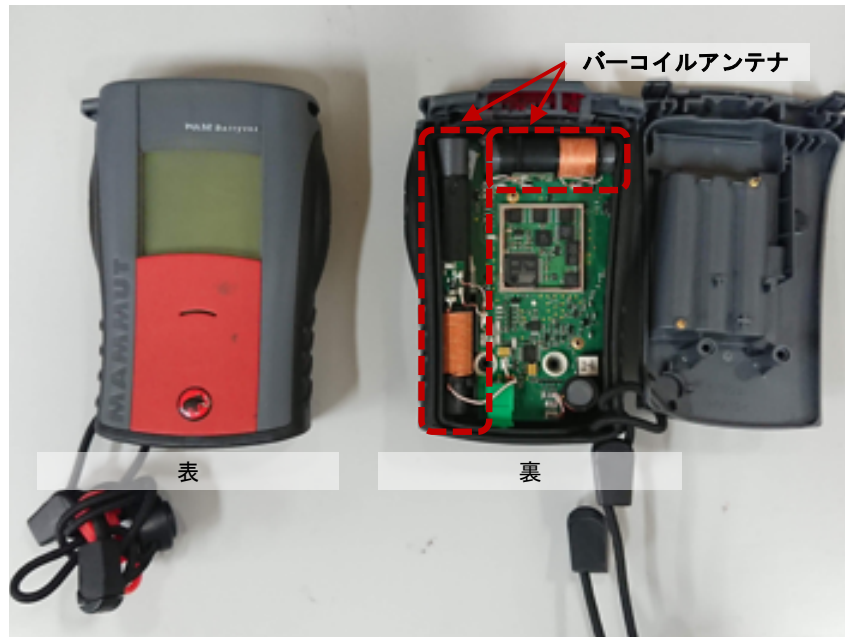


図 1.1: 雪崩ビーコン (PULSE Barryvox, MAMMUT)

ける魚の追跡 [42] や砂礫移動検出 [43] から、ユーザインタフェース [44] まで様々な領域で利用されている。こうした応用では、多数の磁気センサをアレイ状に並べ、各センサから得られたデータから非線形最適化により、その位置を推定する手法が提案されている [22, 23, 45–49]。複数のセンサを用いるため、計測システムに指向性はないが、チャンネル数が多くなり、システムは複雑になる。さらに、非線形最適化を用いる場合、初期解が必要、ローカルミニマムに陥る危険があるといった課題がある。

また、比較的少ないセンサ数で、Radio Frequency IDentification (RFID) タグなどの磁場源の位置を直接的に推定する例もある。例えば、周波数 135 kHz の Low Frequency (LF) RFID 帯タグの場合、 $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{3 \times 10^8 / (135 \times 10^3)}{2\pi} = 354$  [m] となり、想定する屋内空間に対して十分に大きい。同様にして現在最も普及の進む、周波数 13.56 MHz の High Frequency (HF) 帯 RFID タグの場合でも、 $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{3 \times 10^8 / (13.56 \times 10^6)}{2\pi} = 3.5$  [m] となり、机上や棚上での使用を考えれば、低周波磁場源をみなせる。非破壊検査のために開発されたフーリエコイル [24, 25] は、従来の非線形最適化による推定の欠点を克服し、簡便な 2 チャンネルのセンサのみで低周波磁場源の位置座標を得られるという特徴を持つ。また、観測される磁場の荷重積分量から RFID タグやスマートフォンの位置を推定する手法として、直線型のセンサ [26] や矩形型のセンサ [27, 28]、立方体型のセンサ [29] が提案されている。オクルージョンやマルチパスに強く、指向性もないという特徴がある。ただし、定位範囲は数十 cm であり、応用範囲は限定されている。

### センサから見たマーカ位置の推定法のまとめ

以上で述べたセンサから見たマーカ位置推定の従来法の特徴をまとめる。超音波や可視光・赤外光を用いた光学式マーカは、障害物の少ない空間では指向性なく高精度に定位可能であるが、遮蔽物が存在する場所での探索には向かない。電波を用いた手法は、ある程度遮蔽の影響を受けことなく推定可能であるが、マルチパスなどの課題がある。遮蔽やマルチパスの影響を受けにくい手法として、低周波磁場を用いた手法が提案されている。雪崩ビーコンなどの比較的広範囲での通信が可能な手法であっても、探索方向には指向性があり、直線的な探索が難しかった。磁気センサアレイで観測した磁場を用いて、非線形最適化により定位する手法が提案されてきたが、ローカルミニマムなどの恐れがあった。少ないセンサ数で直接的に定位する手法も提案されてきたが、定位範囲は限定的であった。雪崩ビーコンのような指向性のある場に対して、ビーコンの姿勢に応じて磁気双極子モーメントの向きを鉛直に制御する手法 [50] が提案されており、発信機の磁気モーメントを制御すれば、図 1.2 のように従来の雪崩ビーコンよりも効果的な探索を実現できる可能性がある。

センサから見たマーカ位置を推定し、工場内の移動ロボットを制御したり、雪崩埋没者を探索したりするような応用を考えたとき、解決すべき課題は以下の3点である：

- 什器などによるマルチパスや雪などによる遮蔽に頑健であること
- なるべく直線的な探索であること
- 数 m 四方の範囲での探索であること

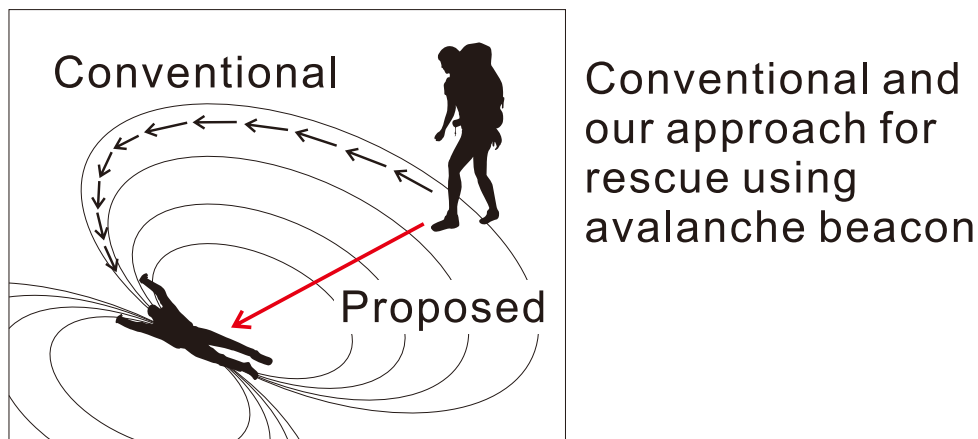


図 1.2: 雪崩埋没者探索

### 1.3.2 マーカから見たセンサ位置の推定

本節では、環境中に設置されたマーカを用いて、位置推定したい対象に取り付けたセンサ自身の自己位置を推定する手法をまとめる。位置推定したい対象に物理場を発する発信機と受信機（センサ）の両方を取り付けておき、壁などの周辺環境から反射してきた場を観測すること

で位置推定するような手法も、環境中に物理場を発するマーカがあるとみなして、本節でまとめる。

#### 周辺環境をスキャンする方法

センサの自己位置を推定するアプリケーションには、空中を飛行するドローンの制御 [8] や海中探査の無人探査機 [51] など、移動体の制御が多い。海中の探査など、事前に環境中にマーカを配置することが困難である場合は、対象が持つセンサを使う手法が必要になるからである。例えば、Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) によって、屋内での自己位置を推定する方法がある [7, 8]。SLAM による自己位置推定では、高分解能で周辺の物体までの距離を計測できるレーザレンジファインダを用いることが多い。移動しながらレーザレンジファインダで周辺の環境をスキャンし、スキャン結果をつなぎ合わせることで、マップを作成する。環境中にマーカを設置する必要がないという利点がある一方で、局所的な情報に基づいて推定するため、探索範囲は限定的で指向性がある。また、環境が変化したときに再学習が必要で、周辺にレーザを反射するような壁が存在しない屋外などでは利用できないなど、周辺環境に対する頑健性は低い。

カメラを使う方法もある [9–12]。Hwang ら [10] は、天井を撮影するカメラを移動ロボットに搭載し、照明や扉といった屋内でのランドマークをもとに、自己位置を推定するマップを作成し、ロボットの屋内定位を実現している。天井に配置された照明器具とスマートフォンを用いた定位法も提案されている [13]。こうしたカメラを用いた手法の最大の利点は、その手軽さである。特殊な送受信機を準備する必要はない。すでに多くの人が、カメラ付きの携帯端末を持ち歩いていることを考えれば、非常に実用性の高い手法である。さらに、撮影した画像を利用して、位置情報に合わせた情報を提示するといった応用も可能である [52]。しかしながら、カメラを用いる手法も、局所的な情報に基づいて推定するため、探索範囲は限定的で指向性がある。また、ランドマークとなる物体が遮蔽されてしまうと位置推定することができず、認識率は光量などの周辺環境に左右され、周辺環境に対する頑健性は低い。さらに、全周囲カメラなどの高解像度の画像を用いる場合、高い処理能力を持った計算機が必要になるという課題も指摘されている [14]。

以上、レーザレンジファインダやカメラなど、センサを用いて周辺環境を認識することで、屋内のマップを作成する手法を紹介した。これらの手法には、什器の移動などの環境の変化に弱く、周辺環境に対する頑健性が低いという課題があり、探索範囲も局所的で指向性がある。

#### 基準局を設置する方法

環境中に位置が既知の基準局を設置できる場合は、そこからの情報をもとにセンサの位置を推定することが考えられる。その代表的な手法は、GPS である。GPS は、複数の人工衛星からの情報を頼りに、地球上での受信機の自己位置を推定する [30]。GPS の受信機は、多くのスマートフォンに内蔵されており、誰でも簡単に自己位置を推定することが可能である。また、定位可能な範囲は地球上のほとんどの地域であり、指向性はない。しかしながら、GPS は衛星からの信号を受信できない屋内や地下などの空間で使用することができないという課題

がある [41]。また、ビルの間などでは位置推定精度が悪化することが報告されている。GPS の弱点である地下や屋内での定位についても Indoor Messaging System (IMES) により、屋外から屋内へのシームレスな定位が提案されているが、あらかじめ基地局の設置が必要である [53]。

屋内などの限られた空間では、電波を発するアンテナを基準局とすることが考えられる。例えば、電磁波を用いた位置推定手法として、Wi-Fi [19,20,54] や BLE [21,31] などの電波強度に基づく手法が提案されている。Hou ら [31] は、BLE の電波強度に基づいて、モンテカルロ法を用いた位置推定法を提案している。電波強度を用いるため、定位範囲に指向性はない。また、環境中の人などの動的遮蔽物の影響を考慮して位置推定に有効な BLE ビーコンを選択することで、推定精度を向上させる手法 [32] も提案されているが、実環境での平均誤差は 70 cm にとどまっている。工場や倉庫などを走行するロボットや無人搬送車、ベルトコンベアを流れる荷物などの移動体の位置推定を考えたとき、人が往来し、金属製の柵に囲まれるような環境において、数 m 四方の範囲で数 cm から十 cm 程度の精度の位置推定が求められると考えられる。また、二次元通信シート内に高周波の信号を局在化させることにより、問題を解決した例 [33] もあるが、広い 3 次元空間中での応用は難しい。

以上のように、GPS や Wi-Fi など、複数の基準局からの情報をもとに推定するような手法は、定位範囲に指向性がないという利点がある一方で、天井や壁など、電波を遮るような遮蔽物がある環境では有効でないという課題がある。

#### 環境中の情報を活用する方法

新たに基準局を設置するのではなく、すでにある環境中の情報を積極的に活用する手法もある。例えば、地磁気を用いる方法が提案されている [34,35]。地球を大きなダイポールマーカとみなして、地表で観測される地磁気から磁気センサの位置を推定する。屋内でも地磁気を観測することはできるが、屋内で観測される磁場は柱や什器などの磁性体の存在によって、わずかに歪んでいる。この歪みが什器などの位置関係に依存しており、場所ごとに固有の分布を持っている。地磁気を用いる手法は、この性質に着目したものであり、あらかじめ場所固有の磁場の分布を位置情報とともにデータベースに記録しておき、推定時には磁場分布を観測し、それに類似する磁場分布が観測された位置をデータベースから検索することで位置を把握する。Nagai ら [35] は、屋内の位置と、そこで観測される地磁気を対応させて記録したマップを用いて、観測された地磁気のパターンをマップから検索することで、マップ内での位置を推定する手法を提案している。地磁気センサの情報だけでなく、加速度センサや慣性センサなど、携帯端末に搭載されている複数のセンサを用いた例もある [4]。周辺環境による地磁気の変化を活用するため、周辺環境への頑健性は高く、指向性もない。しかしながら、事前にマップの作成が必要で、什器の移動などによって観測される地磁気のパターンに変化が生じた場合は、再度マップを作り直す必要があるといった課題がある。

また、RFID タグを用いて直接的に位置情報を空間中に埋め込む方法もある [36,37]。パッシブ型 RFID タグを床に敷設し、移動するロボットに搭載した RFID リーダでタグを読み取ることにより、ロボットの位置を推定している [4,36]。RFID は、電磁波を用いて非接触で固



有の ID を読み取る非接触の自動認識装置である。近年では、交通系 IC カードの普及により、一般に広く利用されている技術である。RFID タグの ID とそのタグを設置した位置の情報をペアにしてデータベースに保存しておき、位置推定時には読み取ったタグの ID をもとにデータベースから位置情報を検索する。RFID は、非接触かつ高速に ID を認識できるため、周辺環境への頑健性は高く、均質にタグを配置すれば指向性もない。しかしながら、精度を高めるためには、大量のタグを高密度に敷設する必要があり、この手間が課題である。

地磁気や RFID のように、環境中に存在する情報をセンサで計測して、センサ位置を推定する手法が提案されているが、磁気や低周波磁場を用いるため、マルチパスやオクルージョンには強く、指向性もない手法である。しかしながら、環境が変化するたびにマップを作りなおしたり、高精度な探索のためにはタグを敷設する手間があったり、事前・事後の処理の手間が課題である。

#### レーダを用いる方法

遮蔽物に隠れた対象の位置を推定する手法としては、地中レーダ [15] が提案されている。地中レーダは、送信用のアンテナと受信用のアンテナが備えられたユニットを埋没者が存在する可能性の高い場所に設置して利用する。送信用のアンテナから地中に向けて高周波の電磁波を送出すると、埋没者が存在する場合、埋没者に反射して返ってくる反射波が返ってくる。その反射波を捉えることで、埋没者の有無を判断することができる。さらに、反射波の強度や送信波との位相のずれから、埋没者までの距離のほか、振動成分を検出して、呼吸の有無を判断することもできる。位置情報だけでなく生体情報を計測可能な地中レーダは、埋没者探索においては有効な手段である。しかしながら、直進性の高いレーダを用いることから、水平方向の位置を精度良く推定するためには、地表を移動させながらスキャンさせる必要があり、広範囲の領域の探索には向かない。また、複数の対象が重なるように存在する場合、それぞれの位置を推定することが難しい。

#### 回転磁場を用いる方法

遮蔽物に隠れた対象の位置を推定する手法としては他にも、磁気双極子を磁気マーカとして用いて、その磁場を磁気センサアレイで観測し、非線形最小自乗問題を解くことにより、磁気マーカの位置を推定する手法が提案されている [45–49]。こうした手法では、姿勢と位置を未知変数として同時に推定するが、磁気双極子の姿勢によっては、観測される磁場の Signal-to-noise (SN) 比が悪化する恐れがある。そこで、姿勢は制御可能として、条件の良い姿勢に変化させ、感度を高めることが考えられる。例えば、磁気双極子を水平面内で回転させる手法が提案されている [38, 39]。水平方向に回転させることで、どの方向にも一度は磁気双極子が向くことになり、磁気双極子が 1 回転する間に必ず最大の磁場を観測することができる。Paperno ら [38] は、2 つの直交するコイルに位相が 90 度異なる信号を入力することにより、磁気双極子モーメントが回転するような磁場を発生させている。計測用のコイルで観測される磁場の大きさが最大、または、最小になる時刻を検知することによって、そのコイルの 3 次元位置を推定している。また、Watanabe ら [39] は、磁石をモータで機械的に回転させた磁

気マーカを提案し，スマートフォンに内蔵された磁気センサで観測された磁場の強度が最大になったときに，磁気マーカが水平面内で向いている方向を検出することで，マーカから見たスマートフォンの方位角を推定している．さらに，仰角および距離も観測される磁場から推定することで，半径 3m の範囲において，方位角の平均誤差  $1^\circ$ ，仰角の平均誤差  $4^\circ$ ，距離の平均誤差 9 cm で，スマートフォンの 3 次元位置推定を実現している．Kim ら [55] は，ロボットアームの先端に取り付けられた回転する磁石を用いて，人の体内にあるカプセル内視鏡の位置を推定している．また，回転する磁場を用いて血管内を移動するロボットの位置計測と制御を行っている例もある [56]．これらすべての手法は，回転磁場を用いることで，オクルージョンに強く，指向性のない方向推定を実現している．しかしながら，電氣的または機械的に変化させられる磁気双極子モーメントの方向を時系列として把握する必要があるために，中央処理系 (PC) を用意して，磁気センサの信号だけでなく，磁気マーカを回転させるモータの回転角度の情報も取り込んだ上で処理する必要がある．さらに，磁気センサと磁気マーカとで時刻の同期も必要になる．結果として，定位システムが複雑になるという課題がある．また，磁場の最大値の検出は，ノイズの影響を受けやすく，頑健性に課題がある．

#### マーカから見たセンサ位置の推定法のまとめ

以上で述べたマーカから見たセンサ位置推定の従来法の特徴をまとめる．センサの自己位置推定には，ロボットの制御 [8, 51] から屋内ナビゲーション [9, 57, 58] まで，様々な応用がある．レーザレンジファインダやカメラを用いて周辺環境をスキャンする方法があるが，これらが局所的な情報に基づいて推定するため定位範囲は限定的で，オクルージョンなど周辺環境への頑健性も低い．また，GPS や Wi-Fi などの基地局を設置する手法が提案されているが，マルチパスやオクルージョンの影響を受けやすいという課題がある．環境中の情報を利用する方法として，地磁気や RFID が提案されている．磁気や低周波磁場を用いるため，マルチパスやオクルージョンには強いと思われるが，探索範囲は狭い．地中レーダは，オクルージョンの影響は小さいもの，指向性がある．回転磁場を用いる手法は，マルチパスやオクルージョンに強いものの，同期が必要となり，システムが複雑となる．

マーカから見たセンサ位置を推定し，屋内ナビゲーションや瓦礫埋没者探索を実現するために解決すべき課題は以下の 4 点である：

- 瓦礫などのマルチパスや人体などによる減衰に頑健であること
- 局所的な情報に基づかず，指向性なく広範囲の探索が可能であること
- 定位領域の環境が変化しても，推定の事前・事後に処理が必要でないこと
- マーカとセンサの間で同期する必要がないこと

### 1.3.3 従来法の課題

従来手法の課題をここでまとめる．本論文では，センサを用いてマーカ位置を推定する手法と，マーカを用いてセンサ位置を推定する手法の 2 種類を対象に従来研究をまとめた．それぞ

これらの手法において、オクルージョンやマルチパスなどの周辺環境への対応と探索範囲や探索方向の指向性を中心に従来研究を調査した。

センサを用いてマーカ位置を推定する手法では、代表的なものとして、超音波マーカや、赤外線マーカ、Wi-Fi, BLE などの電波源が提案されているが、これらの手法は、マルチパス、オクルージョンなどの影響を受けやすいという課題がある。一方で、雪崩ビーコンのような低周波磁場源をマーカとして用いる手法は、水分による減衰などの課題を解決している。しかしながら、一般的な雪崩ビーコンの探索方法は、磁力線をたどることにより電磁場源に到達するものであり、状況によっては大回りになることもあった。

マーカを用いてセンサ位置を推定する手法では、SLAM, カメラ, GPS, Wi-Fi を用いた手法が提案されてきたが、オクルージョンやマルチパスなど、周辺環境への頑健性に課題があった。また、地中レーダのような手法は、瓦礫に埋もれた人を探索できるという利点がある一方で、水平方向の探索にはレーダを移動させてスキャンする必要があった。また、重なり合うような複数の対象の位置を推定することが難しかった。地磁気や RFID などの環境情報を用いる手法は、オクルージョンやマルチパスの問題を解決しているが、環境情報の変化に伴う事前・事後の処理に課題があった。

以上のように、低周波電磁場源を用いる手法は、マルチパスやオクルージョンの課題の解決方法として有望である。また、水平面内を回転する磁気双極子の発する回転磁場を用いることで、探索の指向性の課題も解決できると考えられる。しかしながら、従来の回転磁場を用いる手法では、最大の磁場の観測される時刻に基づいて推定しているため、SN 比の悪い状況での精度悪化の懸念があった。また、マーカとセンサとの間で時刻を同期させる必要があり、システムが複雑になるという課題もあった。もし同期が必要なければ、定位システムを簡便にするとともに、既存の回転体に磁石を取り付けてマーカとして利用することが可能になる。例えば、重機に取り付けられた既存の回転灯に磁石を取り付けるだけで、その回転灯がマーカとなり、工事現場での重機の位置管理が可能になる。そこで、本論文では、マーカとセンサとで同期することなく、マーカまたはセンサの三次元位置を推定することを目指す。

## 1.4 研究の目的

本論文では、屋内での移動ロボットの追跡から、雪崩・瓦礫埋没者の探索まで、幅広いアプリケーションに応用可能な位置推定技術の開発を目指して、2つの目的を設定する。

第一に、オクルージョンに強く、探索精度に指向性がなく、同期の必要のない定位を実現するための双極子回転型電磁場源を用いた3次元定位の基礎理論を提案する。これは、センサから見たマーカ位置の推定と、マーカから見たセンサ位置の推定の両方の推定の基礎となる理論である。また、数 m 四方を定位可能な双極子回転型電磁場源の実現方法についても検討し、実機を用いた検証により、基礎理論の有効性を評価する。

第二に、3次元定位法の基礎理論をスマートフォンなどのセンサの自己位置推定に拡張するための姿勢補正法を提案する。センサの自己位置は、瓦礫埋没者探索や屋内ナビゲーションの実現に必須である。こうした応用では、センサ（スマートフォン）の姿勢が傾いて保持される

ため、傾いた座標系で観測された磁場を補正する必要がある。応用に合わせた補正法を提案するとともに、実機を用いた検証により提案する補正法の有効性を評価する。

## 1.5 論文の構成

本章では、背景を述べた後、位置推定に関する論文を体系的にまとめ、本研究の目的を明確にした。次章以降の構成は以下の通りである。第2章では、探索精度に指向性のない定位を実現するための双極子回転型電磁場源を用いた3次元定位の基礎理論を提案する。センサを中心としたときのマーカの3次元位置（天頂角，方位角，距離）を観測される磁場の周波数成分から推定する定位式を導く。第3章では、第2章で述べた理論の有効性を実機を用いた実験により検証する。双極子回転型電磁場源と3軸方向の磁場を観測可能なセンサユニットの製作について述べる。センサは屋内に水平に設置されるとして、屋内での移動ロボットなどの移動体の位置推定を想定して、方位角の推定方法の違いによる定位誤差，移動するマーカの追跡性能，非磁性の金属や遮蔽による影響を検証する。また，電磁式的双極子回転型電磁場源を用いた方位角推定の可能性についても言及する。第4章では，屋内ナビゲーションや瓦礫埋没者探索を想定した，センサ位置推定を提案する。センサ位置推定では，センサ座標系が傾いて世界座標系と一致しない。そこで，第2章で述べた理論を拡張し，センサ位置を推定するために，傾いたセンサ座標系の補正方法を提案する。実験では，地震災害などで瓦礫に埋もれた人の探索を想定し，スマートフォンの位置を推定する。さらに，第5章で，広範囲の探索のために，比較的周波数の高い電波源の探索について述べる。最後に第6章で，研究の今後の展望を含めて，本論文をまとめる。

## 第 2 章

# 双極子回転型電磁場源定位の基礎理論

### 2.1 緒言

本章では、双極子回転型電磁場源を用いた位置推定について述べる。電波を用いた手法に対して、近接磁場を用いた手法は、人体や非磁性の金属の影響を受けにくいという利点がある。一方で、磁束密度の大きさが距離の 3 乗に反比例して減衰することから定位範囲が限定されるという課題がある。しかしながら、電波を用いた手法を併用することで解決することも考えられる。そこで、金属や人体の影響を受けずに、屋内の数 m 四方の範囲において、誤差数 cm から十 cm 程度の高精度な定位を実現するために、磁気双極子による近接磁場と磁気センサを用いた手法を提案する。以降で述べる磁場は、低周波磁場を意味し、マーカ-センサ距離に比べ波長が十分長いような磁場源の発する場とする。本章では、磁気マーカを取り付けたロボットや無人搬送車のような移動体の定位を想定して、表 1.1 の「磁気センサから見た磁気マーカの定位」の基礎理論について述べる。第 3 章では、この基礎理論に基づき、磁気センサから見た磁気マーカの位置の定位法の有効性を実機を用いて検証する。本章で提案する手法は、「磁気マーカから見た磁気センサの定位」の基礎理論となり、センサの自己位置推定への基礎理論の拡大とその応用に関しては、第 4 章で述べる。

本章では、磁気双極子の姿勢を制御することによって、周囲に指向性のない場を形成する双極子回転型電磁場源と、その定位法を提案する。磁気双極子は周囲に非線形な場を形成するため、磁気双極子の姿勢と観測地点によって、感度にばらつきが生じてしまう。そこで、磁気双極子の姿勢を制御することによって、周囲に指向性のない場を作る。磁気双極子を水平方向に回転させることにより、周囲に周期的に変動する場を作り、観測地点による感度のばらつきをなくす。また、周期的に変化する場は、直交検波を用いることで、高い SN 比でマーカの信号を検出できると期待される。本論文では、磁気双極子を水平方向に回転させる磁気マーカを双極子回転型電磁場源と呼ぶ。本章では、双極子回転型電磁場源をマーカとして移動ロボットなど 3 次元定位したい対象物に取り付けることを考える。センサから見た双極子回転型電磁場源の位置を、磁気双極子モーメントの向きを知ることなく直接推定する手法を提案する。これ

により，磁気マーカを回転させるモータの回転角度の情報を用いずに磁気センサの情報のみから定位可能な簡便なシステムを実現する．本章では，方位角と天頂角，センサとマーカ間の距離が磁束密度のフーリエ成分（マーカ回転周波数成分）を用いて直接表せることを示す．この結果，観測された磁束密度に対して直交検波することで，磁気双極子モーメントの位相を把握することなく，マーカの位置を推定することができる．これにより，SN比が低くなるような場合であっても安定した位置推定の実現が期待される．また，本章で述べるセンサから見たマーカへの相対的な位置の推定は，第4章で述べるスマートフォンなどのセンサの自己位置推定への展開の基礎となる．

## 2.2 問題設定

双極子回転型電磁場源の実現方法は2つある．1つ目は，静磁石をモータによって回転させることで直接的に磁気双極子モーメントを回転させる機械式である．2つ目は，直交するコイルに正弦波を入力することで等価的に磁気双極子モーメントを回転させる電磁式である．本章では，マーカは  $xy$  平面に平行に設置されるとする．つまり，磁気双極子モーメントの回転軸と  $z$  軸は平行であるとする．マーカが  $xy$  平面に平行に設置できない場合は，電磁式マーカを用いる．加速度センサを用いて姿勢を検知し，電磁式マーカに入力する電流を調整することで，等価的に磁気双極子モーメントが  $xy$  平面に平行に回転する磁場源を実現する．本章では，探索者は3軸磁気センサを持ち，センサの座標系と世界座標系は一致しているとして，探索者の持つセンサから見たマーカの3次元位置を推定する．

図2.1に示すように，3軸磁気センサは，原点に配置されているとする．磁気マーカが，位置

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \psi \cos \phi \\ r \sin \psi \sin \phi \\ r \cos \psi \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

に配置され，その磁気双極子モーメントが

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \cos(\omega t + \theta_0) \\ p \sin(\omega t + \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

で表されるように  $xy$  平面に平行に回転するとき，原点で観測される磁場は，

$$\mathbf{B}(t) = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^5} - \frac{\mathbf{p}(t)}{|\mathbf{r}|^3} \right) \quad (2.3)$$

で表される．ここで， $\mu_0$  は真空の透磁率である． $p$  は磁気双極子モーメントの大きさで，既知とする． $\omega$  は磁気双極子モーメントの回転の角周波数であり，実際には検出した信号の Fast Fourier Transform (FFT) によって決定される． $\theta_0$  は磁気双極子モーメントの回転の初期位相であり，未知である．

本章では，式(2.3)で表される磁束密度を観測し，センサから見たマーカの方位角  $\phi$ ，天頂角  $\psi$ ，距離  $r$  を推定する．提案手法では，初期位相に依らずに，つまりは，時刻  $t$  における位相  $\omega t + \theta_0$  を知ることなくマーカの位置を推定する．

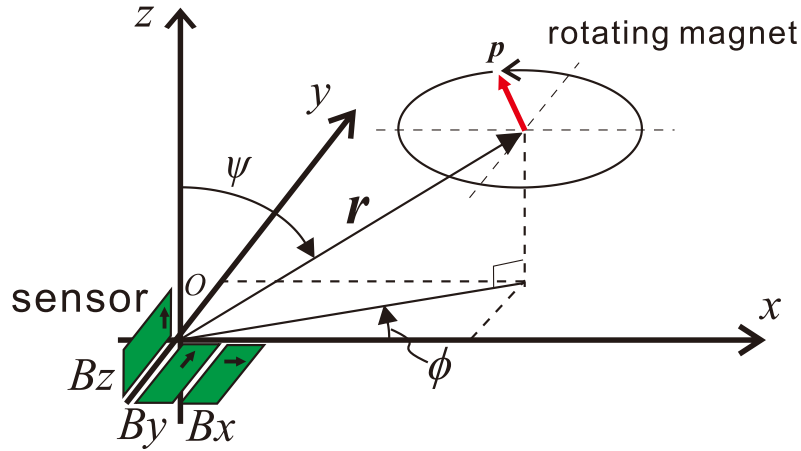


図 2.1: 問題設定

## 2.3 観測される磁場ベクトル

角速度  $\omega$  で回転する磁気双極子によって作られる磁場の性質を考える．式 (2.3) の右边を第 1 項と第 2 項に分けて考える．まず，第 1 項は，電磁場源への方向  $\frac{\mathbf{r}}{r}$  を向き，大きさが  $\frac{3(\mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^5} = \frac{3p \sin \psi \cos(\omega t + \theta_0 - \phi)}{r^3}$  のベクトルである．第 2 項は，振幅  $\frac{1}{r^3}$  で角周波数  $\omega$  で回転するベクトルである．つまり，観測される磁場ベクトルは，電磁場源の方向を向いて直線的に振動するベクトルと磁気双極子モーメントと同じ方向に回転するベクトルの和として表される．

ここで， $xy$  平面で角周波数  $\pm\omega$  での回転を見るために， $B_x + iB_y$  という観測量を考える．式 (2.2)，式 (2.3) から， $B_x + iB_y$  は，

$$B_x + iB_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3}{2} \frac{((p_x + ip_y)(x - iy) + (p_x - ip_y)(x + iy))}{r^5} (x + iy) - \frac{p_x + ip_y}{r^3} \right) \quad (2.4)$$

$$= \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \left( \frac{3 \sin^2 \psi}{2} e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + \frac{3 \sin^2 \psi}{2} e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} - e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} \right) e^{i\phi} \quad (2.5)$$

となる．式 (2.5) の第 1 項と第 2 項は，式 (2.3) の第 1 項に由来しており，直線振動は，振幅と初期位相が同一で  $\omega$  で回転するベクトルと  $-\omega$  で回転するベクトルの和であることがわかる．さらに，式 (2.5) の第 3 項は， $\omega$  で回転するベクトルであることがわかる．つまり，原点で観測される  $B_x + iB_y$  は， $\omega$  で回転する 2 つの成分と  $-\omega$  で回転する 1 つの成分の和で構成されている．そこで以降， $B_x + iB_y$  から， $\pm\omega$  の周波数成分に基づいて  $\phi, \psi, r$  を推定することを考える．

## 2.4 天頂角 $\psi$ の推定

まず，天頂角  $\psi$  を求める．式 (2.5) は，

$$B_x + iB_y = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \left( \frac{3\sin^2\psi}{2} e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + \frac{3\sin^2\psi - 2}{2} e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} \right) e^{i\phi} \quad (2.6)$$

と書き換えられるので， $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分は，

$$\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin^2\psi - 2}{2} NT e^{i\theta_0} \quad (2.7)$$

$$\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin^2\psi}{2} NT e^{-i\theta_0} e^{i2\phi} \quad (2.8)$$

と書ける．同様にして， $B_z$  は

$$B_z = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin\psi \cos\psi}{2} \left( e^{-i(\omega t + \theta_0 - \phi)} + e^{i(\omega t + \theta_0 - \phi)} \right) \quad (2.9)$$

と表され，その正負の周波数成分は

$$\int_0^{NT} B_z e^{-i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin\psi \cos\psi}{2} NT e^{i\theta_0} e^{-i\phi} \quad (2.10)$$

$$\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt = \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{3\sin\psi \cos\psi}{2} NT e^{-i\theta_0} e^{i\phi} \quad (2.11)$$

と表される．よって，式 (2.8)，式 (2.11) より， $\psi$  は

$$\psi = \tan^{-1} \left| \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt}{\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt} \right| \quad (2.12)$$

と表される．すなわち， $B_x + iB_y$  および  $B_z$  の  $-\omega$  の周波数成分から，天頂角を求めることができる．

## 2.5 方位角 $\phi$ の推定

続いて，方位角  $\phi$  を求める．本論文では， $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく推定，正の周波数成分に基づく推定，負の周波数成分に基づく推定の3種類を提案する．

### 2.5.1 $B_x + iB_y$ の正負の周波数成分に基づく推定 [59]

$B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく推定では，定位範囲を  $0 \leq \phi < \pi$ ， $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$  に限定する．これは，磁気マーカがセンサの前面かつ上方に存在すると仮定することに相当し，センサを屋内の壁側の床に設置して屋内の移動体を定位する状況を想定したものである．



式 (2.7), 式 (2.8) から, 初期位相  $\theta_0$  が既知であれば, 方位角  $\phi$  を推定可能であるが, 推定される  $\phi$  の精度が  $\theta_0$  に依存する. そこで, 式 (2.7), 式 (2.8) の積をとり,  $\theta_0$  を消去すると,

$$\begin{aligned} & \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt \\ &= \left( \frac{p\mu_0}{4\pi r^3} \frac{NT}{2} \right)^2 (3\sin^2 \psi)(3\sin^2 \psi - 2)e^{i2\phi} \end{aligned} \quad (2.13)$$

となり, 式 (2.13) 左辺の複素量の偏角から方位角を求めることができる. ここで, 式 (2.13) の偏角は,  $3\sin^2 \psi - 2$  の正負によって変化することに注意しなければならない. つまり,  $3\sin^2 \psi - 2$  が正の場合は,

$$\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt = 2\phi \quad (2.14)$$

となり,

$$\phi = \frac{\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt}{2} \quad (2.15)$$

となる. 一方で,  $3\sin^2 \psi - 2$  が負の場合は,

$$\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt = 2\phi + \pi \quad (2.16)$$

となり,

$$\phi = \frac{\arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt}{2} - \frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

となる. こうして, 式 (2.12) より  $\psi$  を推定した後, 方位角  $\phi$  は,  $3\sin^2 \psi - 2 > 0$  のとき, 式 (2.15) を用いて,  $3\sin^2 \psi - 2 < 0$  のとき, 式 (2.17) を用いて求められる. 本論文では, 式 (2.15) または式 (2.17) による推定を,  $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく推定と呼ぶ.

### 2.5.2 $B_x + iB_y$ の正の周波数成分, 負の周波数成分に基づく推定 [60]

前項では, 回転する磁気双極子の作る磁場の  $x$  方向成分と  $y$  方向成分  $B_x$  と  $B_y$  のフーリエ係数から, 方位角  $\phi$  を求める推定式を導いた. 壁沿いにセンサを設置して, 屋内の移動体の位置を推定するような応用を想定して,  $0 \leq \phi < \pi$  の範囲に限定していた (図 2.2). しかしながら, 例えば, センサを部屋の中央の天井に設置して, 屋内の移動体の位置を推定するような応用を考えたとき, この不定性が課題になる. そこで, ここでは, 一意に方位角  $\phi$  を求める方法について述べる.

式 (2.8)–式 (2.11) より, これらの式から未知である初期位相  $\theta_0$  を消去すれば良いので,

$$\phi = \arg \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt}{\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt} = \arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt \int_0^{NT} B_z e^{-i\omega t} dt \quad (2.18)$$

$$\phi = \arg \frac{\int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt}{\int_0^{NT} B_z e^{-i\omega t} dt} = \arg \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt \quad (2.19)$$

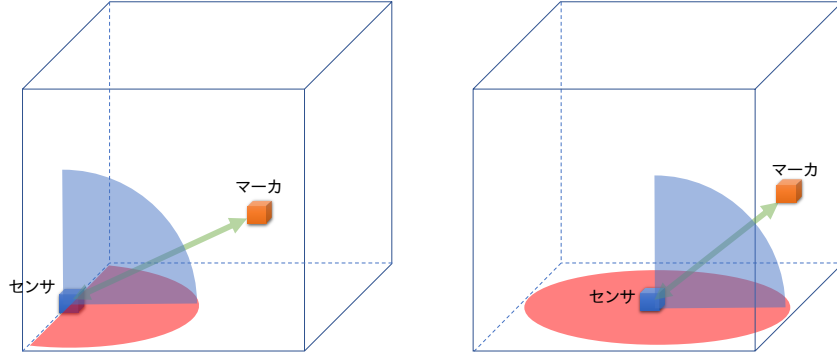


図 2.2: (左) 2.5.1 項の対象とする範囲, (右) 2.5.2 項の対象とする範囲

のように 2 通りの定位式が求められる. 式 (2.18) による推定を  $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく推定, 式 (2.19) による推定を  $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく推定と呼ぶ.

式 (2.8) より,  $\sin \psi = 0$  のとき,  $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく推定 (式 (2.18)) では, 方位角を推定することができない. しかしながら,  $\sin \psi = 0$  となるのは, マーカがセンサ直上に存在する場合であり, 以下の方法で, マーカがセンサの直上であることを検出し方位角を推定しないことで対応可能である. まず,  $|\int_0^{NT} B_z e^{i\omega t} dt|$  が適当に定めたしきい値よりも十分に小さいことを検出する. 次に,  $\frac{|\int_0^{NT} B_x e^{i\omega t} dt|}{|\int_0^{NT} B_y e^{i\omega t} dt|}$  がほぼ 1 であるとき,  $\psi = 0$  と推定する. また, 式 (2.7) の右辺は,  $\sin \psi = 0$  であっても 0 とならないため,  $\sin \psi \approx 0$  で  $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく推定では十分な精度が得られない場合は,  $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく推定 (式 (2.19)) によって方位角を推定する.

式 (2.7) より,  $3 \sin^2 \psi - 2 = 0$  のとき,  $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく推定 (式 (2.19)) では, 方位角を推定することができない. このときは,  $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく推定によって, 方位角を推定する. さらに,  $\psi = \frac{\pi}{2}$  のとき, 式 (2.10) および式 (2.11) の右辺が 0 になることから,  $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく推定と正の周波数成分に基づく推定では, 方位角を推定できない. この場合は,  $B_z$  の周波数成分に基づかない,  $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく推定によって, 方位角を推定する.

## 2.6 距離 $r$ の推定

最後に, センサとマーカとの距離は, 次の手順で求められる. 式 (2.7), 式 (2.8) より,

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{4\pi r^3}{p\mu_0 NT} \right]^2 \left[ \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt \right|^2 + \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt \right|^2 \right] \\ &= \left[ \frac{3 \sin^2 \psi}{2} \right]^2 + \left[ \frac{3 \sin^2 \psi - 2}{2} \right]^2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる．式 (2.20) の左辺は 0 とならないので，任意の  $\psi$  に対して次式が成り立つ．

$$r = \left[ \frac{p\mu_0 NT}{8\pi} \sqrt{\frac{(3 \sin^2 \psi)^2 + (3 \sin^2 \psi - 2)^2}{\left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{-i\omega t} dt \right|^2 + \left| \int_0^{NT} (B_x + iB_y)e^{i\omega t} dt \right|^2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.21)$$

こうして，磁気双極子モーメントの大きさ  $p$  が既知であれば，推定された  $\psi$  を式 (2.21) に代入することによって，距離  $r$  を推定することができる．

## 2.7 提案手法のまとめ

双極子回転型電磁場源の 3 次元定位法の基礎理論についてまとめる．本章では， $B_x + iB_y$  の正の周波数成分と負の周波数成分に着目し，角周波数  $\pm\omega$  で検波することにより，センサを原点としたときのマーカの天頂角  $\psi$ ，方位角  $\phi$ ，距離  $r$  を推定できることを示した．天頂角は，式 (2.12) を用いて推定され，距離は，式 (2.21) を用いて推定される．方位角は， $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく方法 (式 (2.15))， $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく方法 (式 (2.18))， $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく方法 (式 (2.19)) の 3 種類を提案した．いずれの方法においても，磁気双極子モーメントの初期位相を知ることなく，方位角を推定可能である．双極子回転型電磁場源によって，指向性なく，直線的な探索が可能となった．本手法は，雪崩埋没者の探索の応用を考えたとき，既存の雪崩ビーコンと比較して，より早期の探索を実現できる可能性がある．

図 2.3 に，提案手法の定位手順を示す．まず，天頂角を推定し，次に推定された天頂角に応じて，適した式を用いて方位角を推定する． $\psi = 0^\circ$  のとき， $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく手法によって推定し， $3 \sin^2 - 2 = 0$  のとき，つまり， $\psi \approx 54.7^\circ$  のとき， $B_x + iB_y$  の負の周波数成分に基づく手法によって推定する． $\psi = 90^\circ$  のときは， $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく手法によって推定する．最後に距離を推定して，3 次元定位は完了する．

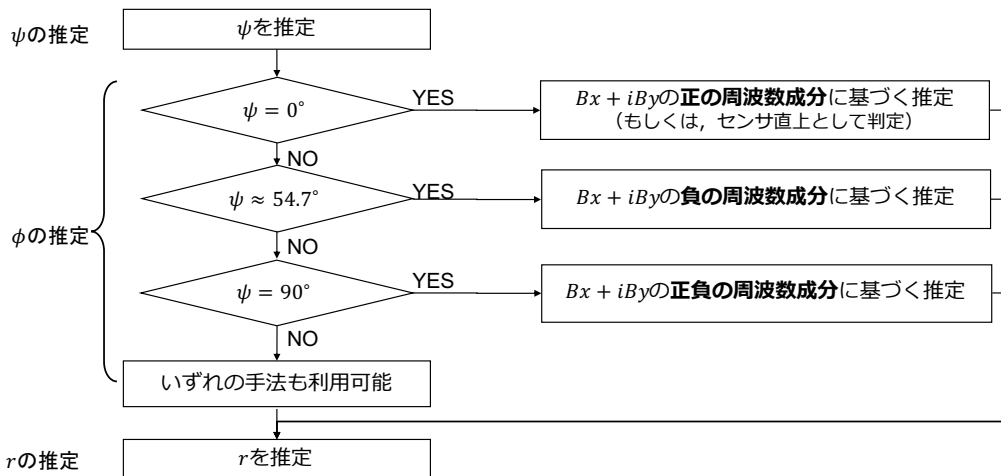


図 2.3: 提案手法の定位手順

## 2.8 シミュレーション

数値シミュレーションによって、双極子回転型電磁場源の発する磁場の性質と前節で提案した定位法の特徴を分析する。すべてのシミュレーションには、MATLAB2019bを用いた。

### 2.8.1 $B_x + iB_y$ の正負の周波数成分に基づく方法 (2.5.1 項) の検証

本項では、2.5.1 項で述べた提案手法の有効性をシミュレーションによって検証する。

#### シミュレーション条件

マーカの位置 (天頂角, 方位角, 距離) を変化させながら, それぞれの位置で発する磁場を原点で観測した。センサからマーカまでの距離  $r$  は 1000 mm とした。天頂角  $\psi$  は,  $5^\circ \leq \psi \leq 85^\circ$  の範囲で,  $5^\circ$  刻みで変化させた。方位角  $\phi$  は,  $5^\circ \leq \phi \leq 175^\circ$  の範囲で,  $5^\circ$  刻みで変化させた。磁場は, 原点において, サンプル周波数 100 Hz, サンプル時間 60 秒で観測したとした。サンプル周波数は, スマートフォンのセンサで磁場を観測できるアプリケーション [61] で設定できる最大の周波数を参考に決定した。マーカの回転周波数は, 4 Hz とした。観測される 3 軸の磁場には, 磁場ベクトルの大きさの最大値の 10% のノイズを付加した。なお, 磁気双極子モーメントの大きさは既知とした。 $\phi, \psi, r$  をそれぞれ式 (2.15), 式 (2.12), 式 (2.21) によって求めた。

#### シミュレーション結果

図 2.4, 図 2.5, 図 2.6 に,  $\phi, \psi, r$  の推定結果をそれぞれ示す。方位角, 天頂角, 距離の推定解をそれぞれ  $\phi^*, \psi^*, r^*$  としたとき, 真の値  $\phi, \psi, r$  との誤差  $\phi^* - \phi, \psi^* - \psi, r^* - r$  を求め, 可視化した。 $\psi, r$  に関して, いずれの位置にマーカが存在する場合でも精度良く推定できていることがわかる。 $\phi$  に関しては,  $\psi = 55^\circ$  のとき, 誤差が非常に大きくなっている。

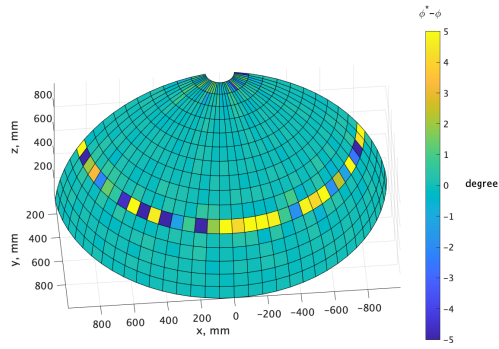


図 2.4: 式 (2.15) に基づいて推定された  $\phi$  の誤差

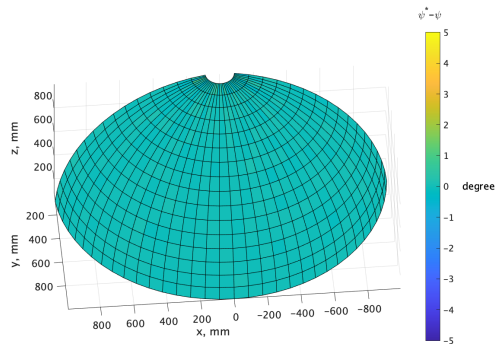


図 2.5: 推定された  $\psi$  の誤差

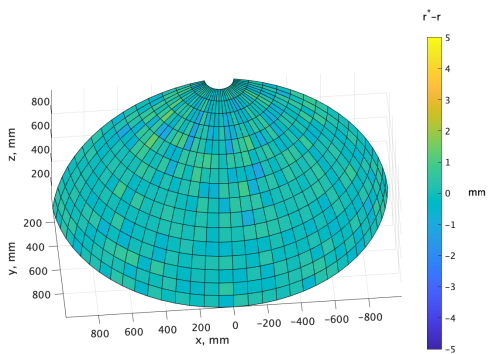


図 2.6: 推定された  $r$  の誤差

### 2.8.2 $B_x + iB_y$ の正の周波数成分, 負の周波数成分を用いる方法 (2.5.2 項) の検証

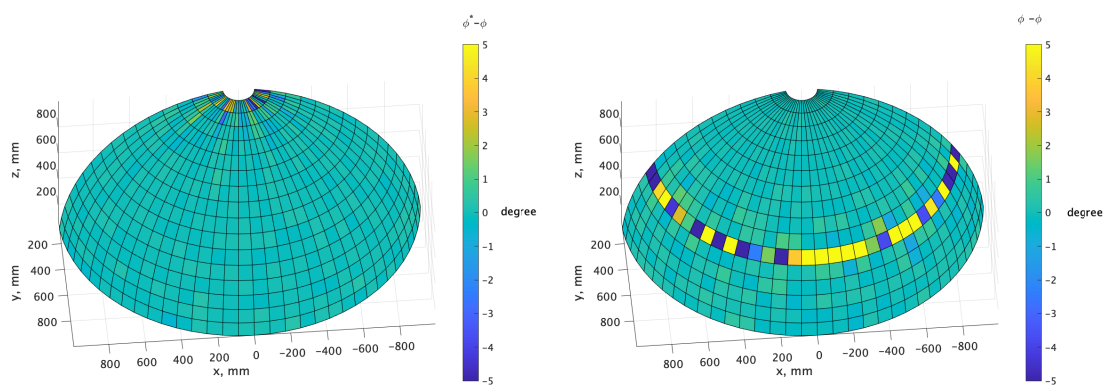
次に, 2.5.2 項で述べた手法の有効性をシミュレーションによって検証した.

#### シミュレーション条件

前項のシミュレーションと同様にマーカの位置 (天頂角, 方位角, 距離) を変化させながら, それぞれの位置で発する磁場を原点で観測したとして, マーカ位置を推定した. シミュレーションの条件は, 2.8.1 項と同一とした. 天頂角と距離のシミュレーション結果は, 前項と同一の推定式を用いて推定され, 同様の傾向となるため, 本項では省略する.

#### シミュレーション結果

図 2.7a, 図 2.7b に, 式 (2.18), 式 (2.19) を用いて推定した解  $\phi^*$  と真の値  $\phi$  との誤差  $\phi^* - \phi$  を示す. 図 2.7a では, センサ直上付近での誤差が大きい. また, 図 2.7b では,  $\psi = 55^\circ$  のとき, 誤差が大きくなっている.



(a) 式 (2.18)

(b) 式 (2.19)

図 2.7:  $\phi$  の推定結果

### 2.8.3 $\psi$ を変化させたときの方位角の誤差

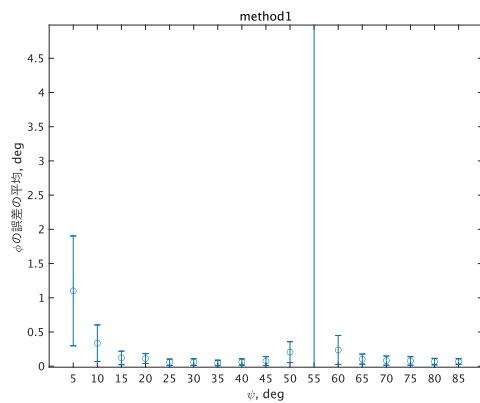
それぞれの方位角の推定式の特徴を調べるために、 $\psi$  を変化させたときの方位角の誤差を評価した。

#### シミュレーション条件

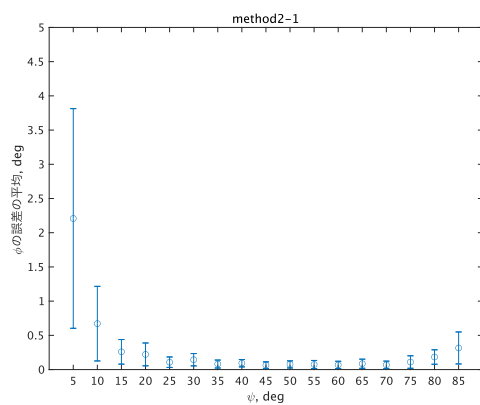
天頂角  $\psi$  は、 $5^\circ \leq \psi \leq 85^\circ$  の範囲で、 $5^\circ$  刻みで変化させた。方位角  $\phi$  は、 $5^\circ \leq \phi \leq 175^\circ$  の範囲で、 $5^\circ$  刻みで変化させた。観測される 3 軸の磁場には、磁場ベクトルの大きさの最大値の 10% のノイズを付加した。天頂角ごとに推定した方位角  $\phi^*$  と真の値  $\phi$  との絶対誤差  $|\phi^* - \phi|$  の平均値を求めた。

#### シミュレーション結果

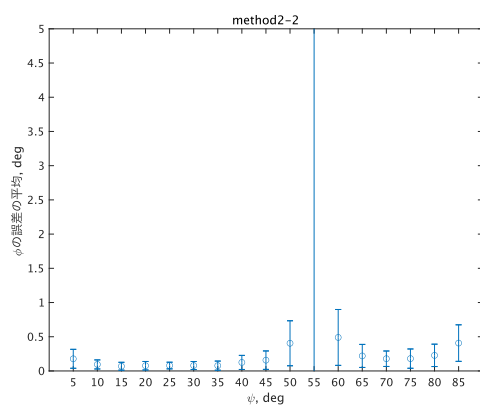
シミュレーション結果を図 2.8 に示す。方位角の回転による誤差の標準偏差は、エラーバーで表示した。 $\psi = 55^\circ$  では、誤差も標準偏差も非常に大きな値となり、枠外に表示されている。



(a) 式 (2.15) に基づく推定



(b) 式 (2.18) に基づく推定



(c) 式 (2.19) に基づく推定

図 2.8: φ の誤差の平均



## 2.8.4 考察

シミュレーションによって明らかになった提案手法の性質について述べる．シミュレーション結果は、いずれの手法も方位角方向に精度の偏りはなく、指向性なく推定できることがわかる．図 2.8a に示した  $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく手法では、 $\psi = 5^\circ, 55^\circ$  での誤差が大きい．ここで、観測される  $(B_x, B_y)$  の変化をシミュレーションした結果を図 2.9 に示す．天頂角が  $\psi^* = \tan^{-1} \sqrt{2}$  よりも大きいとき、楕円の長軸はマーカ方向を向き、 $\psi^*$  よりも小さいとき、短軸がマーカ方向を向く．マーカの直上 ( $\psi^* = 0$ ) 及び  $\psi^*$  の地点では、円となる． $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく手法では、 $\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt$  と  $\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt$  の積に基づいて方位角を求める．これらの積分量はそれぞれ  $\psi = 0^\circ$ 、 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2} \approx 54.7^\circ$  のとき 0 となる．天頂角  $\psi$  が  $0^\circ$ 、 $\tan^{-1} \sqrt{2}$  に近い領域では、SN 比が悪化し、誤差の要因となっていると考えられる．しかしながら、 $\psi = 5^\circ, 55^\circ$  の 2 点を除けば、誤差の平均値は  $0.5^\circ$  以内であり、標準偏差も非常に小さいことがわかる．

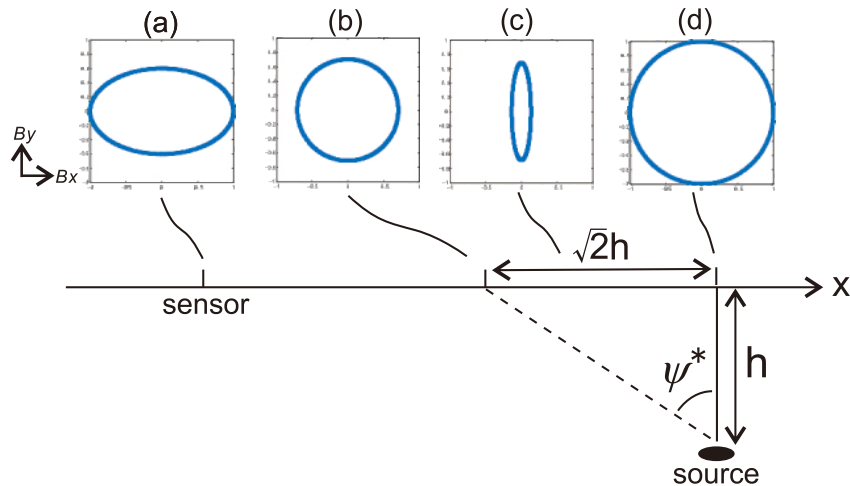


図 2.9:  $(B_x, B_y)$  のリサージュ図形のシミュレーション

図 2.8 に示した式 (2.18)、式 (2.19) に基づく推定の誤差を考察する．式 (2.18) に基づく推定では、 $\psi = 5^\circ$  のとき誤差が最大である．これは、 $\psi = 0^\circ$  でセンサの直上にマーカが存在する場合、 $\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{i\omega t} dt$  の値が小さくなることから、SN 比が悪化するためだと思われる．式 (2.19) に基づく推定では、 $\psi = 55^\circ$  のとき誤差が最大である．これは、 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2} \approx 54.7^\circ$  の近くでは、 $\int_0^{NT} (B_x + iB_y) e^{-i\omega t} dt$  の値が小さくなり、SN 比が悪化するためだと思われる．また、図 2.8 をみると、いずれの手法においても、 $\psi = 90^\circ$  でマーカが  $xy$  平面の近くに存在するとき、誤差が比較的大きい．さらに、式 (2.19) に基づく推定では、 $\psi = 0^\circ$  でセンサの直上にマーカが存在する場合、わずかに誤差が大きい．ここで、天頂角ごとの  $B_x, B_y, B_z$  の振幅を図 2.10 に示す． $B_x, B_y$  に対して  $B_z$  の振幅が、 $\psi = 0, 90^\circ$  付近で小さいことがわかる． $B_x + iB_y$  の正の周波数成分、負の周波数を用いる手法では、方位角の推定に  $B_z$  を用いるため、 $B_z$  の振幅が小さくなるようなセンサ直上 ( $\psi = 0^\circ$ ) や  $xy$  平

面 ( $\psi = 90^\circ$ ) では、方位角の誤差が大きくなると考えられる。しかしながら、その誤差は  $1^\circ$  以内と比較的小さい。

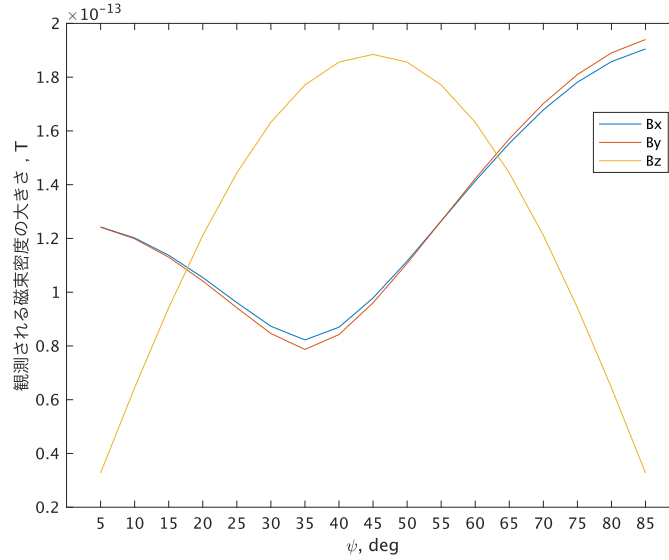


図 2.10: 観測される  $B_x, B_y, B_z$

方位角の推定手法の特徴をまとめる。

- 式 (2.15) は、推定可能な方位角の範囲は、 $0^\circ \leq \phi < 180^\circ$  に限定されるが、 $B_x, B_y$  のみから方位角を推定可能である。 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  付近の領域では誤差が大きくなるという課題がある。
- 式 (2.18) は、マーカがセンサ直上付近 ( $\psi \approx 0^\circ$ ) に存在する場合、誤差が大きくなるという課題がある。また、マーカが  $xy$  平面に近い領域 ( $\psi \approx 90^\circ$ ) に存在する場合も誤差が大きくなる。ただし、 $0^\circ < \psi < 90^\circ$  の範囲で、解が求められない箇所はなく、定位精度は良好であった。
- 式 (2.19) は、マーカがセンサ直上付近 ( $\psi \approx 0^\circ$ ) に存在する場合、誤差が他の手法に比べて小さい。ただし、 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  付近の領域では誤差が大きくなる。また、マーカが  $xy$  平面に近い領域 ( $\psi \approx 90^\circ$ ) に存在する場合も誤差が大きくなる。

これらの特徴を踏まえると、屋内での移動ロボットの追跡のように  $z$  軸方向への移動量が小さい場合は、式 (2.15) の手法が適している。ドローンのような  $z$  軸への移動が考えられる場合やマーカが  $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  付近に存在する場合は、式 (2.18) が適している。式 (2.18) を用いた場合、センサ直上での誤差が大きくなるという課題があるが、これは推定された  $\psi$  の値に応じて式 (2.19) に切り替えることで解決できると考えられる。

## 2.9 結言

本章では、双極子回転型電磁波源の発する磁場の周波数成分に着目し、原点に配置したセンサからマーカへの天頂角、方位角、距離を推定する方法を提案した。まず、2.4節において、観測される  $B_x + iB_y$  および  $B_z$  の周波数成分から天頂角を推定可能であることを示した。そして、2.5節において、 $B_x + iB_y$  および  $B_z$  の正負の周波数成分の組み合わせによって、3種類の方位角の推定方法があることを示した。まず、 $B_x + iB_y$  の正の周波数成分と負の周波数成分から、式 (2.15) を用いて方位角を推定することが可能であることを示した。ただし、この方法の定位可能な範囲は、 $0^\circ \leq \phi < 180^\circ$  に限定される。次に、 $B_z$  の周波数成分を用いることで、式 (2.18)、式 (2.19) によって、定位可能な範囲を  $0^\circ \leq \phi < 360^\circ$  に拡大して方位角を推定可能であることを示した。ただし、天頂角の大きさによって、方位角の推定式は選択する必要がある。最後に、2.5節において、センサからマーカまでの距離も観測される磁場の周波数成分より推定可能であることを示した。提案手法は、いずれの式を用いても初期位相  $\theta_0$  に依らずに3次元位置を推定可能であり、マーカとセンサの間で時刻同期する必要はない。したがって、既存手法に比べて定位システムを簡便にすることができ、環境中に存在する既存の回転体に磁気双極子を設置することで、回転体をマーカとして活用できるという特徴がある。

本章では、シミュレーションによって、定位手法の有効性を検証した。その結果、天頂角  $\psi$ 、距離  $r$  を精度よく推定できることがわかった。方位角  $\phi$  は、定位手法によって誤差の傾向が異なることが判明した。

- 式 (2.15) は、推定可能な方位角の範囲は、 $0^\circ \leq \phi < 180^\circ$  に限定されるが、 $B_x, B_y$  のみから方位角を推定可能である。 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  付近の領域では誤差が大きくなるという課題がある。
- 式 (2.18) は、マーカがセンサ直上付近 ( $\psi \approx 0^\circ$ ) に存在する場合、誤差が大きくなるという課題がある。また、マーカが  $xy$  平面に近い領域 ( $\psi \approx 90^\circ$ ) に存在する場合も誤差が大きくなる。ただし、 $0^\circ < \psi < 90^\circ$  の範囲で、解が求められない箇所はなく、定位精度は良好であった。
- 式 (2.19) は、マーカがセンサ直上付近 ( $\psi \approx 0$ ) に存在する場合、誤差が他の手法に比べて小さい。ただし、 $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  付近の領域では誤差が大きくなる。また、マーカが  $xy$  平面に近い領域 ( $\psi \approx 90^\circ$ ) に存在する場合も誤差が大きくなる。

本章では、双極子回転型電磁場源の3次元定位法を提案した。シミュレーションにより、センサを原点としたときのマーカの天頂角、方位角、距離を磁場のフーリエ成分から推定できることを示した。提案手法は、方位角方向に精度のばらつきはなく、指向性のない定位が実現された。提案する5種類の方位角の推定方法の性質、数値シミュレーションによって明らかにした。複数の手法を併用することで誤差を低減することができ、全領域にわたって精度良く推定できると考えられる。

## 第 3 章

# 双極子回転型電磁場源定位の検証

### 3.1 緒言

本章では，前章で述べた双極子回転型電磁波源定位の基礎理論の検証と応用を述べる．まず，静磁石をモータで回転させることにより双極子回転型電磁場源を実現する方法について述べる．ネオジム磁石と磁気インピーダンスセンサを用いて SN 比の高い定位システムを実現する．次に，屋内での移動ロボットなどの移動体の定位を想定して，製作した電磁場源の 3 次元位置を， $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく手法， $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく手法， $B_x + iB_y$  の正の周波数成分に基づく手法のそれぞれで推定し，誤差傾向について議論する．また，実用性を考慮して，移動するマーカの追跡性能，非磁性の金属の存在による影響を評価する．さらに，デモンストレーションとして，部屋の内部に配置されたセンサを用いて，外部に配置されたマーカの位置を推定できることを示す．最後に，電磁コイルを用いた電磁式双極子回転型電磁場源について述べる．2 軸の直交するコイルに位相の  $90^\circ$  ずれた正弦波をそれぞれ入力することで，電磁式双極子回転型電磁場源を実現する．機械式の電磁場源に比べて，携帯のしやすさで利点がある．雪崩埋没者の探索を想定して，電磁コイルを用いた電磁場源と同じく電磁コイルを用いたセンサユニットによる方向推定を実施する．

### 3.2 機械式マーカの定位

#### 3.2.1 実装

##### マーカ

図 3.1 に静磁石をモータで回転させる機械式のマーカを示す．一定の角周波数で静磁石を回転させる必要があるため，モータには回転数を一定に保つことが可能なモータ (KM-1, Keigan) を用いた．モータの回転数は，240 rpm (4 Hz) に設定した．モータは，Bluetooth で接続されたスマートフォンからアプリケーションを用いて制御した．

静磁石にはパイプ型のネオジム磁石 (長さ 27 mm, 外径 23 mm, 内径 13 mm) を 4 つ直列に接続したものをを用いた．静磁石の端点での磁束密度の大きさは最大 50.5 mT であった．アクリル板のジグを用いて，静磁石はモータに固定された．

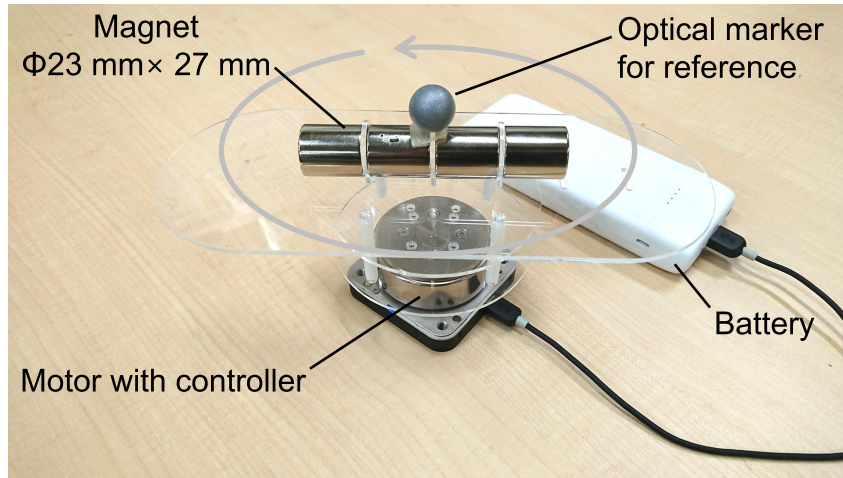


図 3.1: 磁気マーカ ([59] より引用)

### センサ

広範囲を定位するためには、センサの感度が重要になる。そこで、センサには磁気インピーダンス (magnetic impedance: MI) センサ (MI-CB-1DH, Aichi Micro Intelligent, 図 3.2) を用いた。このセンサは、1つのセンサ素子で1軸方向の磁気を計測することができる。観測できる周波数の範囲は0.1 Hz~100 kHz, 感度は1 V/ $\mu$ Tである [62]。

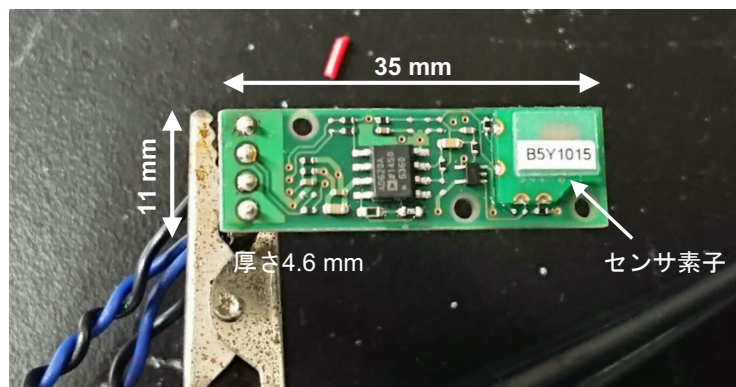


図 3.2: MI センサ

3つのMIセンサをそれぞれの磁場の計測方向が直交するように配置してセンサユニットとした。MIセンサを固定するジグは、3D CADで設計し、3Dプリンタで製作した。図3.3にセンサユニットの設計を示す。まず、片方のジグに $x$ 軸方向と $y$ 軸方向の磁場を観測するMIセンサを取り付けた、もう片方のジグには $z$ 軸方向の磁場を観測するMIセンサだけを取り

付けた。そして、それぞれのジグを組み合わせて、3軸方向の磁場を観測できるようにした。図3.4にセンサユニットを示す。

3つのMIセンサを、発振器 (MI-CB-1DH-OSC, Aichi Micro Intelligent) に接続し、同期して計測した。3つのセンサの出力を、AD変換ボード (NI9215, National Instruments) を用いて2 kHzで同期してサンプリングした。

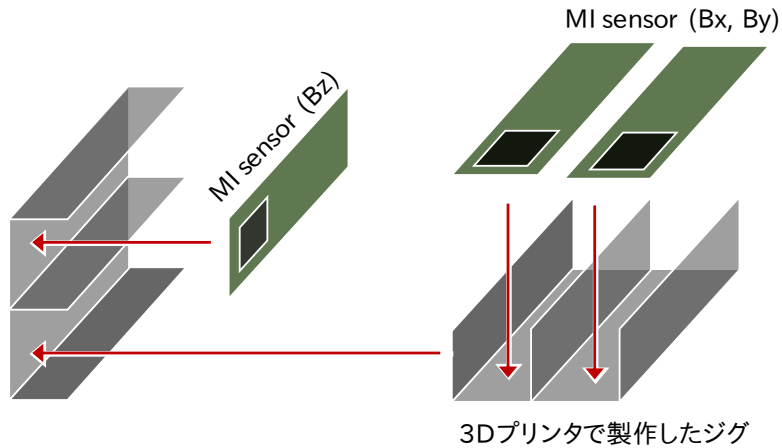


図 3.3: センサユニットの構成

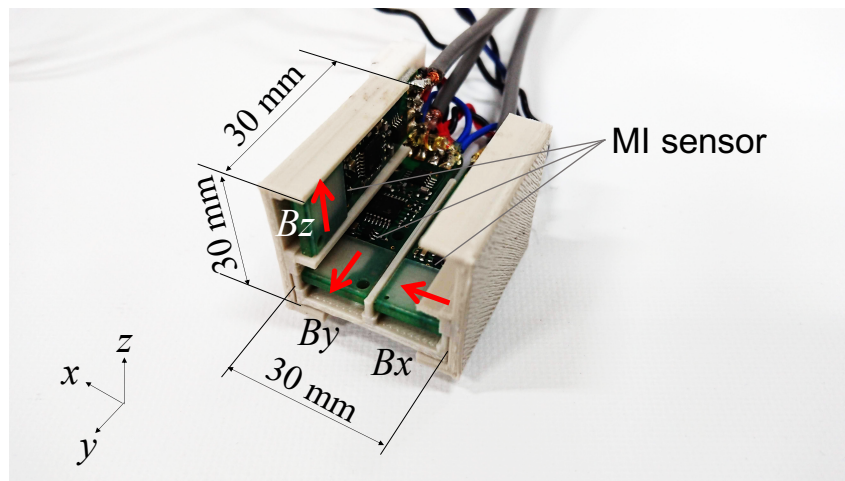


図 3.4: センサユニット ([59] より引用)

### 計測システム

図 3.5 に、実験環境の模式図を示す。マーカを台車に載せ、 $xy$  平面に平行な平面上を移動させた。実験では、以下の手順でマーカの位置を推定した。まず、磁気マーカから発せられる磁場を、センサで1秒間計測し、FFTによりピーク周波数を計算した。次に、FFTで検出されたピーク周波数を $\omega$ とし、 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ とする。実験では、 $NT = 1 \text{ sec}$ の時間、3軸方向の磁

場  $B_x, B_y, B_z$  を計測した。磁場の計測と同時に、光学式の追跡装置 (Flex 3, Optitrack) を用いて参照用の位置を計測した。光学式の追跡装置で計測された位置を真の位置として、提案手法によって推定された位置との誤差を評価した。実験データの計測から推定処理まで、MATLAB R2018b を用いて処理した。

なお、磁気双極子モーメントの大きさ  $p$  については、 $\mathbf{r}^\dagger = (x^\dagger, y^\dagger, z^\dagger)$ ,  $x^\dagger = -1000, -500, \dots, 1000$  mm,  $y^\dagger = 1000, 1500, \dots, 3000$  mm,  $z^\dagger = 350$  mm であらかじめ計測した磁束密度に対して、式 (2.20) を用いて、最小自乗問題を解くことで  $p$  を決定した。

また、マーカがセンサに近づきすぎて、センサ出力の振幅が MI センサの出力の最大値および最小値である  $\pm 2.5$  V を超えてしまう場合は、以下の方法で信号の振幅を推定した：センサの出力が負から正、または、正から負に変化する時刻を 0 秒としたとき、0 秒付近のサチュレーションを起こしていない信号  $d_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) とその時刻  $t_i$  に対して、最小自乗問題  $\sum_{i=1}^M |d_i - (A \sin \omega t_i + c)|^2 \rightarrow \min$  を解くことにより、信号の振幅  $A$  と定数  $c$  を求めた。

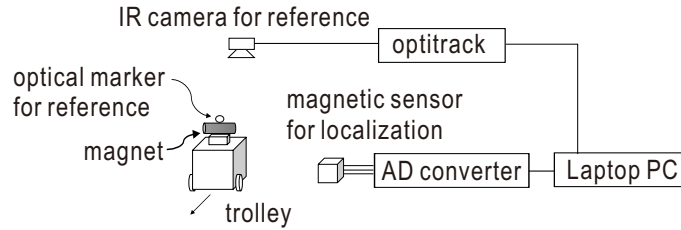


図 3.5: 実験セットアップ ([59] より引用)

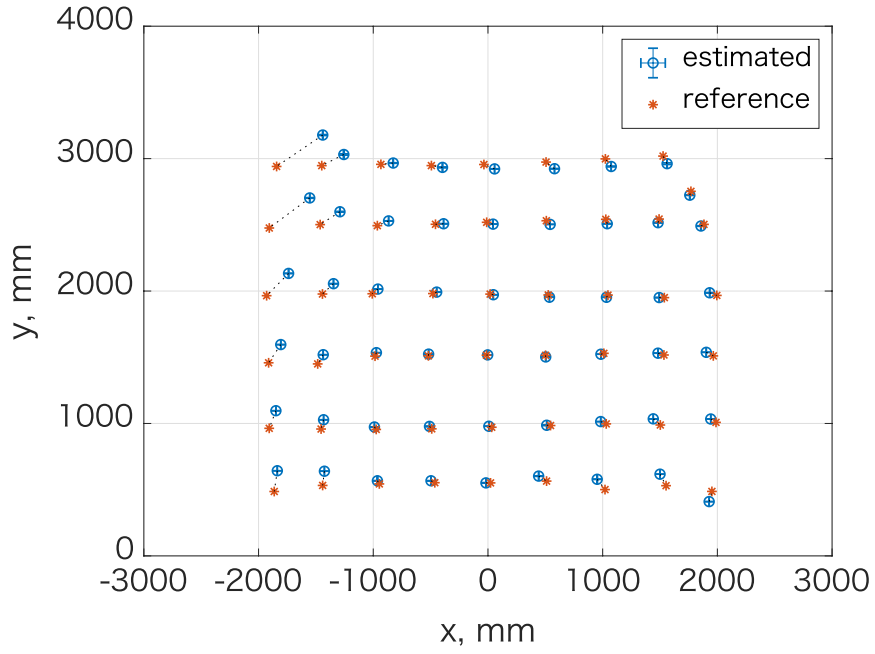
### 3.2.2 実験： $B_x + iB_y$ の正負の周波数成分に基づく定位

#### 実験条件

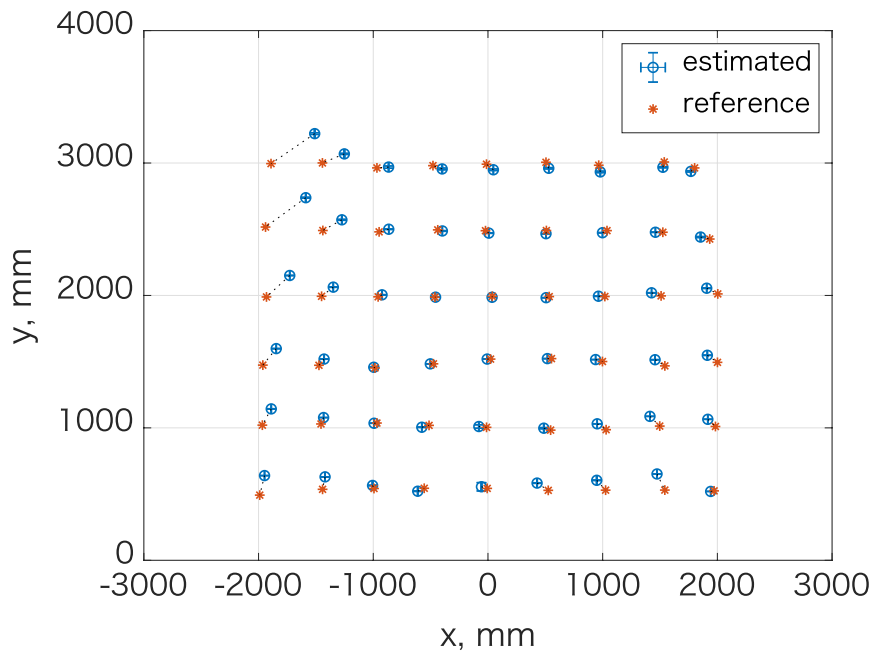
まず、 $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく定位法の精度を検証するために、マーカをおおよそ  $\mathbf{r}^* = (x^*, y^*, z^*)$ ,  $x^* = -2000, -1500, \dots, 2000$  mm,  $y^* = 500, 1000, \dots, 3000$  mm,  $z^* = 150, 350$  mm の位置に配置し、それぞれの位置で 10 回位置を推定し、図 3.6 の\*印で示す位置との誤差と標準偏差を評価した。式 (2.12) から天頂角  $\psi$ 、式 (2.15) または式 (2.17) から方位角  $\phi$  を推定した。センサとマーカの間の距離は、式 (2.21) を用いて推定した。

#### 実験結果

図 3.6 に実験結果を示す。 $B_x + iB_y$  の正負の周波数成分に基づく手法で推定された位置の平均値を○印で、光学式の追跡装置で計測した参照用の位置を\*印で示した。標準偏差はエラーバーで表した。推定された位置と参照用の位置の絶対誤差の平均と標準偏差は、 $z = 150$  mm のとき、 $91.7 \pm 85.4$  mm,  $z = 350$  mm のとき、 $94.5 \pm 82.3$  mm であった。表 3.1 に、推定された方位角、天頂角、距離、 $x$  座標、 $y$  座標、 $z$  座標と参照用の位置との誤差の平均値と標準偏差を示す。



(a)  $z = 150$  mm



(b)  $z = 350$  mm

図 3.6: 実験結果



表 3.1: 推定された位置と参照用の位置との誤差

	$\phi$ , deg.	$\psi$ , deg.	$r$ , mm	$x$ , mm	$y$ , mm	$z$ , mm
$z = 150$ mm	$2.0 \pm 1.9$	$0.6 \pm 0.3$	$19.8 \pm 11.3$	$63.2 \pm 75.2$	$48.7 \pm 54.2$	$23.2 \pm 14.6$
$z = 350$ mm	$2.3 \pm 2.0$	$0.5 \pm 0.4$	$21.4 \pm 13.4$	$71.5 \pm 71.8$	$46.2 \pm 52.3$	$19.6 \pm 13.1$

### 考察

図 3.6 および表 3.1 より、4000 mm×2500 mm の範囲において、初期位相を把握することなく、マーカの位置を正確かつ安定に推定することができた。参考までに原点に配置したセンサからマーカまでの直線距離を求めたところ、 $z = 150$  mm の条件では、最小 563.0 mm、最大 3474.0 mm、平均 2180.0 mm、 $z = 350$  mm の条件では、最小 627.8 mm、最大 3557.5 mm、平均 2218.0 mm であった。この結果は、工場や倉庫などの屋内において、移動体の位置を推定するのに十分な精度だと思われる。

また、図 3.6 に示す計測点における標準偏差の平均値は、 $z = 150$  mm の条件では、12.1 mm、 $z = 350$  mm の条件では、14.5 mm と非常に小さかった。使用する磁石の強度や実験環境の SN 比が異なるため、一概には定量的な比較はできないが、既存手法 [39] ではセンサとマーカの距離が離れるにつれて標準偏差が増大する傾向があった。提案手法では、直交検波を用いることにより、センサとマーカの距離が遠く SN 比が低い状況でも有効な位置推定を実現したと考えられる。

図 3.6 より、推定値は、参照用の位置に対して、 $x > 0$  の領域では  $x$  軸に負の方向に、 $x < 0$  の領域では  $x$  軸に正の方向に推定される傾向があった。これは実験に使用した  $B_x$  を計測するセンサと  $B_y$  を計測するセンサの感度の比による誤差であると思われる。 $B_x$ 、 $B_y$  を計測するセンサの出力をキャリブレーションすることで、この誤差は小さくなると思われる。また、 $x = -2000$  mm のときの誤差が大きいことがわかる。これは、 $x = -2500$  mm 付近に鉄製の什器が存在することに起因すると思われる。什器の存在により、観測される  $B_x$  の時系列の振幅が本来の値よりも小さくなり、方位角が実際の位置よりも小さく推定されたと考えられる。磁場の回転周波数成分が環境中の磁性体によって歪められるとすれば、それは推定精度に影響すると考えられる。しかしながら、実験環境中には様々な磁性体が存在し、例えば、図 3.6 で  $y = 3500$  mm の直線上にスチール製の事務机が並んでおり、そして、 $x = -2500$  mm の付近には、鉄製の除振台がある。しかしながら、定位結果に影響を与えているのは、1100 mm×700 mm の鉄板を備える除振台のみであり、磁性体の巨大な塊に対しては、局所的ながら影響を考慮すべきであると考えられる。奈良らは、固定双極子がつくる磁場に対する磁性体の影響を等価多重極でモデリングする手法 [63] を提案しており、同様の議論を回転双極子に対して適用して、磁性体の影響を詳細に解析することは今後の課題としたい。

図 3.7 に  $(x, y, z) = (0, 3000, 150)$  mm において観測された磁束密度の時系列を示す。MI センサの感度は  $1 \text{ V}/\mu\text{T}$  なので、この例では、おおよそ  $0.3 \mu\text{T}$  の磁束密度が観測されてい

ることになる。図 3.8 にセンサ-マーカ間の距離と観測された MI センサの信号強度の関係を示す。MI センサの感度は  $1\text{V}/\mu\text{T}$  であり [62]，図 3.8 のグラフより，3 m の距離でおよそ  $0.1\ \mu\text{T}$  の磁束密度が観測されている。ここで，本センサは nT オーダの磁束密度の変動を観測できる [62] ため，現状の磁束密度の 100 分の 1 程度まで観測できるとすれば，現在の 4~5 倍程度の距離まで観測可能であることが期待される。また，既存手法と同様に原点に作られる  $xy$  方向磁場の強度  $\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  の最大値に基づいて方位角を推定したところ，センサ-マーカ間の距離が 3557 mm の地点において，推定された方位角の最大と最小の差は  $20.1^\circ$ ，標準偏差は  $6.9^\circ$  であった。提案手法で推定された方位角の最大と最小の差は  $0.3^\circ$ ，標準偏差は  $0.1^\circ$  であり，提案手法ではセンサ-マーカ間の距離が大きくとも安定して推定可能である。

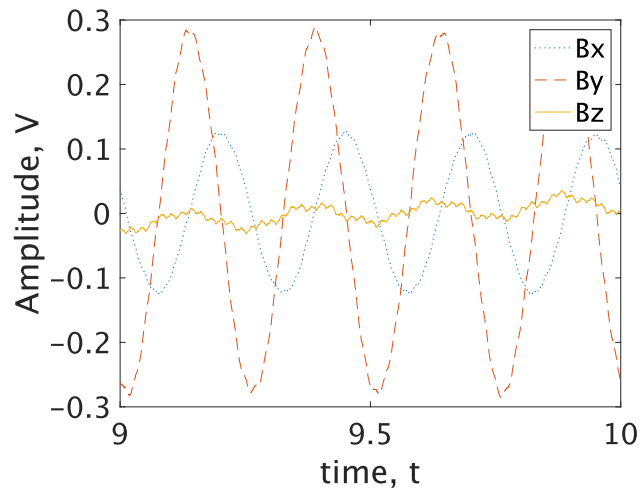


図 3.7: 観測された磁束密度（[59] より引用）

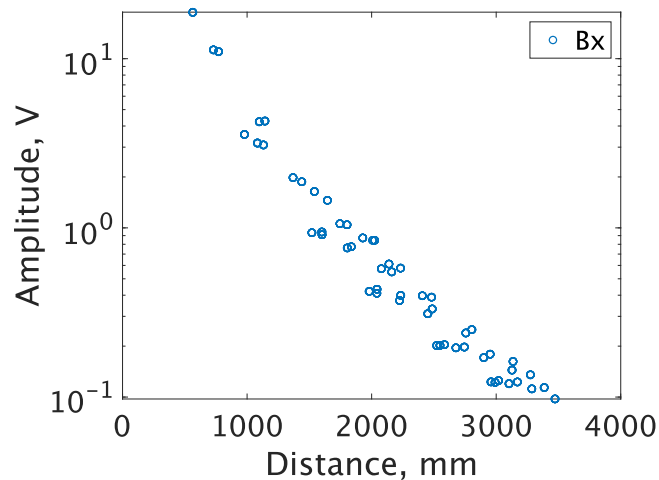


図 3.8: マーカ距離と観測される信号強度の関係（[59] より引用）

### 3.2.3 実験: $B_x + iB_y$ の正の周波数成分, 負の周波数に基づく推定

#### 実験条件

図 3.9, 図 3.10 に\*で示した位置にマーカを置き, それぞれの位置を定位した. マーカの高さは  $z = 350$  mm であった. 天頂角と距離は, それぞれ式 (2.12), 式 (2.21) から求めた. 方位角は, 式 (2.18), 式 (2.19) を用いて推定した.

#### 実験結果

図 3.9, 図 3.10 に推定結果を示す. 観測された磁場から推定された結果と光学式の追跡装置で観測した結果の差を誤差として求めた. 表 3.2 にそれぞれの手法の誤差をまとめた. なお, センサ近傍の 8 点でのみ, 観測された磁場がセンサの計測可能範囲を超えてサチュレーションを起こしていた.

表 3.2: 定位式ごとの誤差

用いた定位式	式 (2.18)	式 (2.19)
3次元位置	$49.9 \pm 32.3$	$166.5 \pm 110.1$
$x$ , mm	$27.8 \pm 22.4$	$98.5 \pm 93.5$
$y$ , mm	$32.9 \pm 30.6$	$118.3 \pm 84.6$
$z$ , mm	$12.5 \pm 9.2$	$12.5 \pm 9.2$

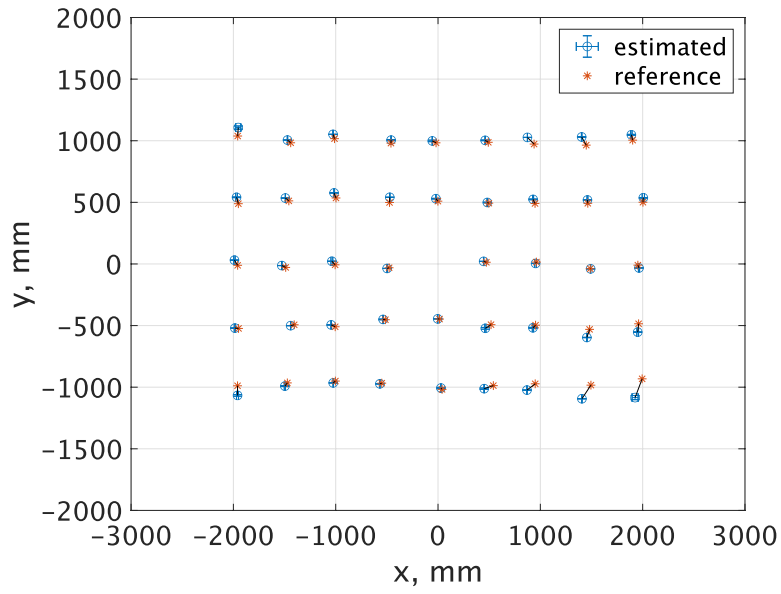


図 3.9: 式 (2.18) を用いた定位結果

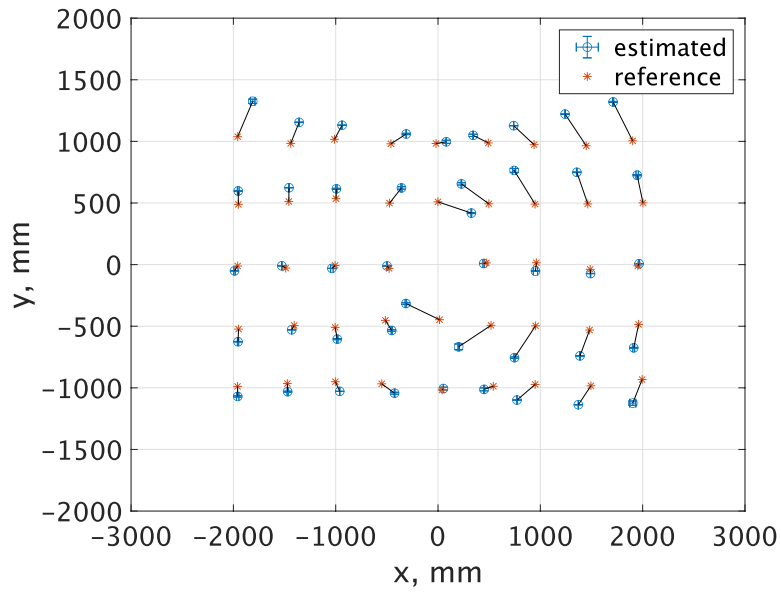


図 3.10: 式 (2.19) を用いた定位結果

### 考察

本項では、式 (2.18)、式 (2.19) を用いて方位角を推定した場合の 3 次元定位精度について検証した。式 (2.18) を用いた場合、誤差の平均値は 49.9 mm、標準偏差は 32.3 mm であった。式 (2.19) を用いた場合、誤差の平均値 166.5 mm、110.1 mm であった。式 (2.19) を用いた場合、式 (2.18) を用いた場合に比べて、定位領域内全域で比較的誤差が大きい。特に  $(x, y) = (0, 500)$ ,  $(0, -500)$  mm の地点での誤差が大きい。この 2 点での天頂角は  $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  に近く、第 2 章のシミュレーションで誤差の大きかった領域と一致する。センサからの距離が離れると誤差が大きくなる点も、第 2 章のシミュレーションで示した傾向と同様である。定位領域内に  $\psi = \tan^{-1} \sqrt{2}$  となる点を含むような環境でマーカ位置を推定する場合は、式 (2.18) を用いることが望ましいと考えられる。

磁気マーカの回転角周波数  $\omega$  を未知として、観測される磁束密度の時系列に FFT を施した結果から得られる最大のピーク周波数を検波周波数として位置を推定した。これは、あらかじめ磁気マーカの回転角周波数を把握せずともマーカ位置を推定することを可能にする。また、ノイズによって回転角周波数がずれるような場合でも、推定毎に検波周波数を求めることで、頑健にマーカ位置を推定できると考えられる。

本節では、1 つのセンサで少なくとも 2500 mm×4000 mm の範囲において平均誤差 100 mm 以下で位置推定可能であることを示した。このセンサを矩形の領域の頂点に配置すれば、少なくとも 5000 mm×8000 mm の範囲での定位が可能になると考えられる。この 4 つのセンサの組を最小ユニットとして、ユニットを並べて複数配置すれば、さらに広範囲の定位が可能になると思われる。

#### 3.2.4 実験: 移動するマーカの追跡

前項の実験では、センサが磁場の時系列を計測している間、マーカは静止していた状態を保っていた。しかしながら、屋内での移動ロボットなどの移動体の位置推定の応用を考えると、時系列を計測している間もマーカは移動している可能性がある。そこで、本節では、移動するマーカの位置の追跡可能性の検証を目的に実験した結果を述べる。

##### デモアプリケーションの実装

マーカをリアルタイムに定位するデモアプリケーション (図 3.11) を製作した。アプリケーションは、MATLAB 2019b を用いた実装した。アプリケーションは、AD ボードを制御し、データをリアルタイムに取得し、提案手法に基づいて 3 次元位置を推定する。同時に、光学式の追跡装置とも連動して、光学式のマーカの位置も同時に表示することが可能である。アプリケーション画面には、定位したマーカの 2 次元位置と、観測された磁場の波形、リサージュ、FFT の結果を示している。

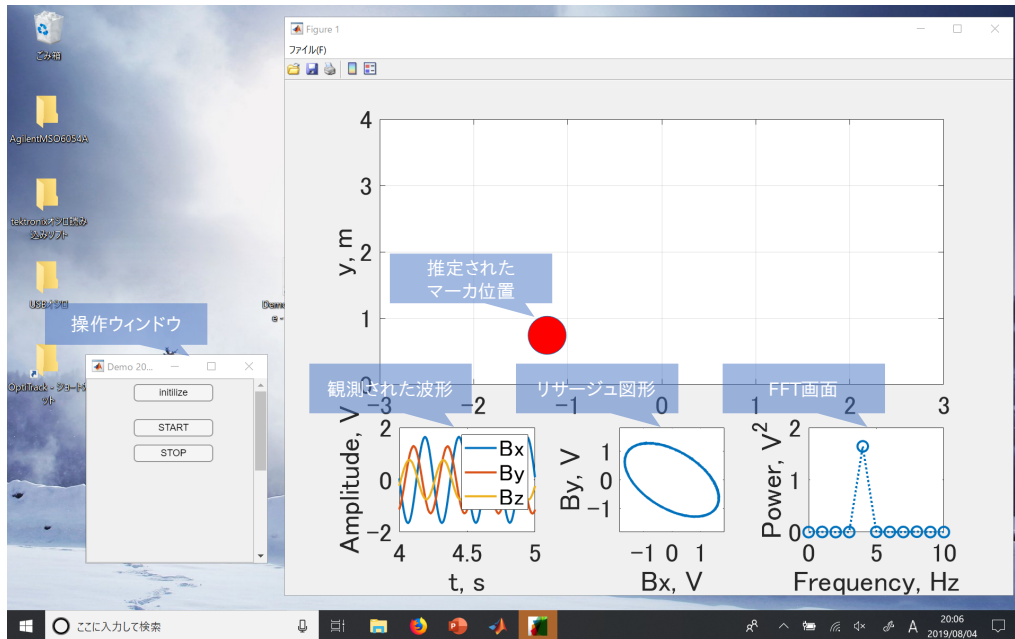


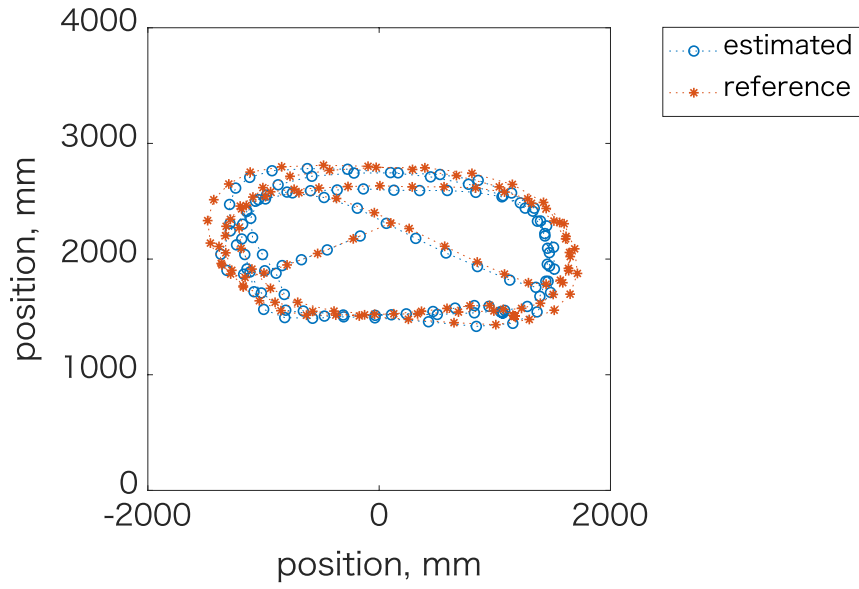
図 3.11: デモアプリケーション

### 実験条件

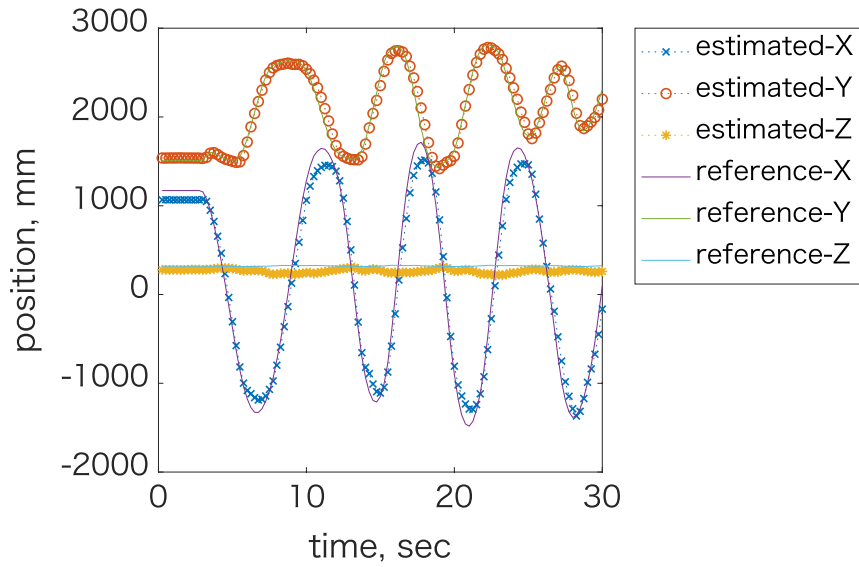
移動する対象の追跡精度を検証するために、 $4000\text{ mm} \times 2500\text{ mm}$  の範囲において、 $xy$  平面内でマーカを移動させながら  $0.25$  秒間隔で位置を推定した。ただし、 $NT = 0.25\text{ s}$  とした。方位角は、式 (2.15)、式 (2.17) に基づいて推定した。

### 実験結果

図 3.12 に実験結果を示す。図 3.12a に、提案手法で推定した位置の軌跡と、参照用の位置の軌跡を示す。図 3.12b に、各時刻の  $x$  座標、 $y$  座標、 $z$  座標を示す。参照用の位置から求められたマーカの瞬時時速の平均は、 $3.1\text{ km/h}$  ( $0.88\text{ m/s}$ )、最大は  $6.1\text{ km/h}$  ( $1.7\text{ m/s}$ ) であった。120 回定位した結果、最大誤差は、 $321.3\text{ mm}$ 、平均誤差は、 $162.7\text{ mm}$ 、誤差の標準偏差は、 $74.9\text{ mm}$  であった。



(a) 位置推定精度



(b) 応答性

図 3.12: 実験結果

## 考察

図 3.12 より，平均 3.1 km/h (0.88 m/s)，最大 6.1 km/h (1.7 m/s) で移動する磁気マーカの位置を推定することができた．図 3.12b より， $x$  座標が正の領域では  $x$  座標の誤差は負となり， $x$  座標が負の領域では  $x$  座標の誤差は正になっている．これは，静止した状態の実験の誤差の傾向と一致する．また，静止した状態の実験に比べて平均誤差が大きいのには， $B_x, B_y, B_z$  を計測している間にもマーカが移動していることによる誤差だと思われる．マーカが移動中に観測される磁場を図 3.13 に示す．回転するマーカが水平方向に移動することにより，観測される磁束密度の波形の振幅は，1 周期のなかでも変化する．サンプリング期間の移動による振幅の変化が誤差の要因と思われる．しかし，その誤差は，工場や倉庫などで稼働する一般的な移動ロボットなどの移動体の大きさに比べて小さい．また， $y$  座標に比べて  $x$  座標の誤差が大きという誤差傾向は，静止した状態の実験の誤差傾向と一致する．なお，図 3.12b において，計測開始直後の数秒間，マーカは静止しており，そのときの誤差は移動に起因するものではない．

本項では，主に平行移動する対象の追跡を想定したが，空中を移動するドローンなどの追跡を想定した場合，対象が回転移動する可能性がある．対象がマーカの角周波数に近い角周波数で回転した場合，磁気センサで観測される磁場の周波数成分が変化し，誤差が大きくなる恐れがある．この誤差は，マーカの角周波数を対象の回転に比べて十分高くしておくことで回避可能である．マーカの角周波数を高めるための電磁式のマーカについては，3.3 節で後述する．

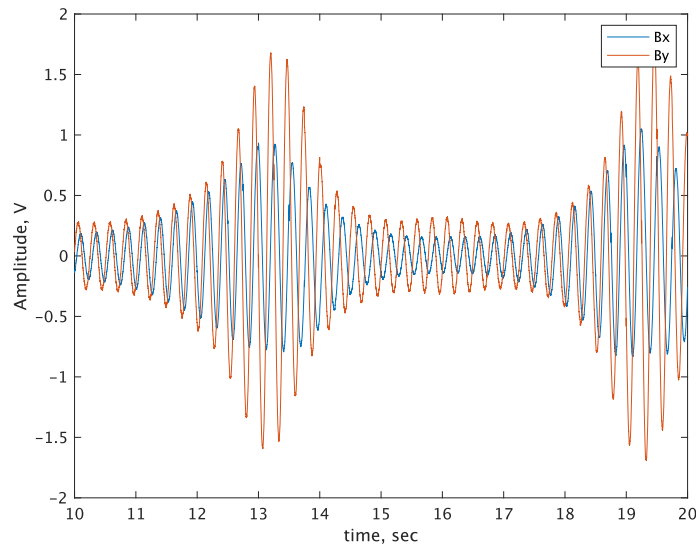


図 3.13: マーカ移動中に観測される磁束密度



### 3.2.5 実験: 環境中の非磁性の金属の影響

周辺の金属板などの存在によるマルチパスの影響を受けにくいというのは、低周波磁場を用いる利点の1つである。本項では、センサを囲むように非磁性の金属板を配置したときの影響を検証する。

#### 実験条件

図 3.14 に示すように、センサを非磁性の金属板（アルミ板）で囲んだ状態で位置を推定した。方位角は、式 (2.15), 式 (2.17) に基づいて推定した。

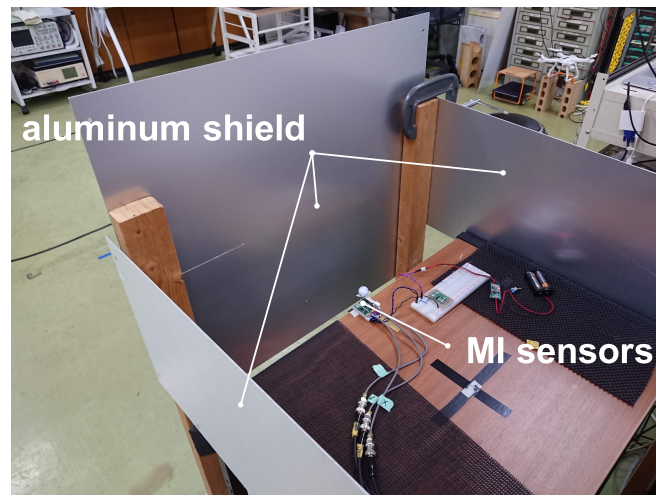


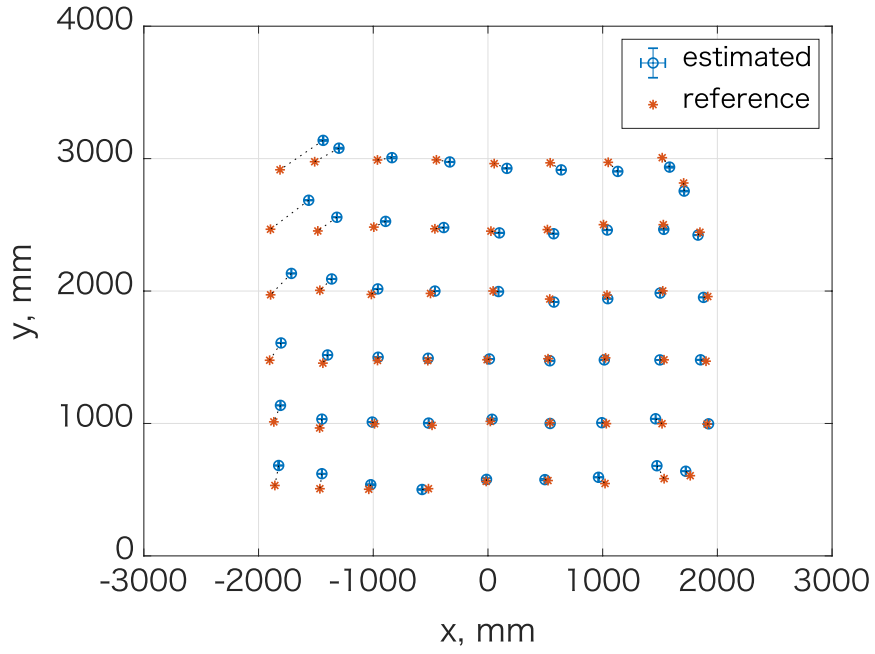
図 3.14: 実験の様子 ([59] より引用)

#### 実験結果

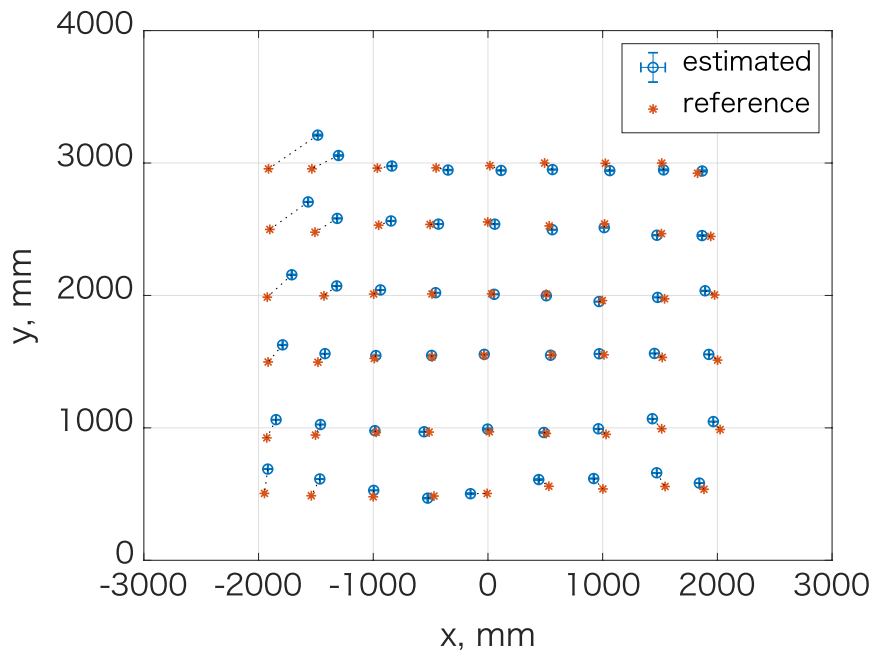
図 3.15 に実験結果を示す。提案手法で推定された位置の平均値を○印で、光学式の追跡装置で計測した参照用の位置を\*印で示した。標準偏差はエラーバーで表した。推定された位置と参照用の位置の絶対誤差の平均と標準偏差は、 $z = 150 \text{ mm}$  のとき、 $94.7 \pm 81.5 \text{ mm}$ 、 $z = 350 \text{ mm}$  のとき、 $107.6 \pm 86.7 \text{ mm}$  であった。また、比較のために表 3.3 に、アルミ板がない場合とある場合の実験結果をまとめた。

表 3.3: 推定された三次元位置と参照用の位置との誤差

	誤差, mm (アルミ板なし)	誤差, mm (アルミ板あり)
$z = 150 \text{ mm}$	$91.7 \pm 85.4$	$94.7 \pm 81.5$
$z = 350 \text{ mm}$	$94.5 \pm 82.3$	$107.6 \pm 86.7$



(a)  $z = 150$  mm



(b)  $z = 350$  mm

図 3.15: センサ周辺に非磁性の金属板が存在する場合の定位結果

### 考察

図 3.15 および表 3.3 より，センサがアルミ板で囲まれるような状態であっても，4000 mm×2500 mm の範囲において，アルミ板が存在しない場合と同等の精度で磁気マーカの位置を推定できることがわかる．環境中の非磁性の金属の存在に影響されることなく，精度良く推定できることは，磁場を用いる利点である．また，図 3.15 より， $x = -2000$  mm のときの誤差が大きいが， $x = -2500$  mm 付近に鉄製の什器が存在することに起因すると思われる．

### 3.2.6 デモンストレーション：部屋の内部からの電磁場源定位

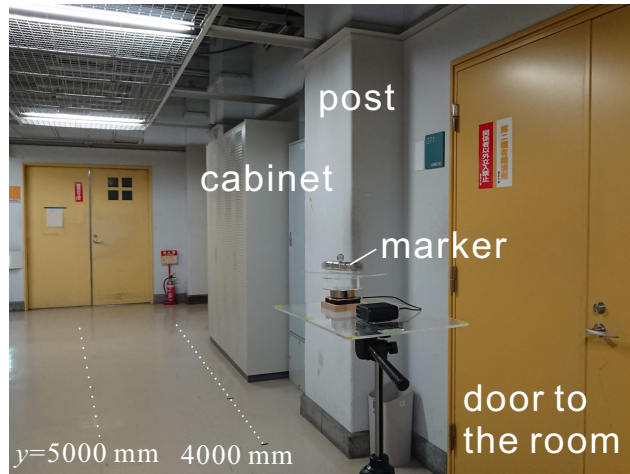
磁場は，マーカとセンサの間に遮蔽物があっても，遮蔽物の材質によっては透過し，観測することができる．これは，超音波や比較的周波数の高い電波を用いた手法に比べて，非常に大きな利点となる．本節では，デモンストレーションとして，部屋の内部に配置されたセンサを用いて，外部に設置されたマーカを定位し，磁場を用いる手法の可能性を検討する．

#### 実験条件

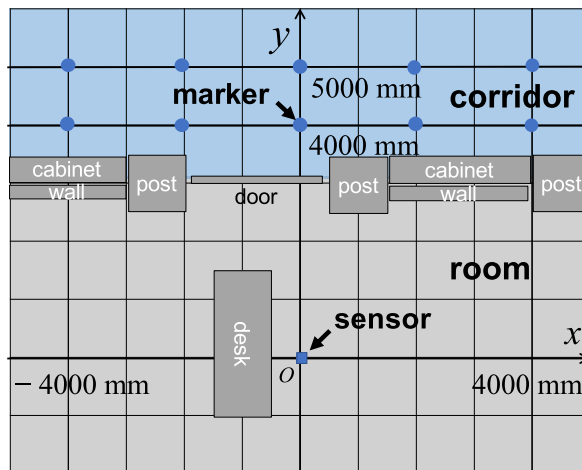
センサとマーカが完全に遮蔽されるような状態での実験として，センサを置いた部屋の外にマーカを置いた状態で，マーカの位置を推定した．図 3.16a，図 3.16b に示すように，磁気マーカを部屋の外に配置した．センサとマーカは，鉄筋コンクリートの壁と鉄製の扉，鉄製の柵で隔離された．マーカは， $\mathbf{r}^+ = (x^+, y^+, z^+)$ ， $x^+ = -4000, 2000, \dots, 4000$  mm， $y^+ = 4000, 5000$  mm， $z^+ = 860$  mm の  $xy$  平面に平行な平面上を移動させた．部屋の中で観測された磁束密度から，部屋の外に置かれたマーカの位置を 10 回推定し，その誤差と標準偏差を評価した．部屋の外では光学式の追跡装置を使用できなかったため，参照用の位置はメジャーを用いて計測した．式 (2.15)，式 (2.17) 式に基づいて方位角を推定した．

#### 実験結果

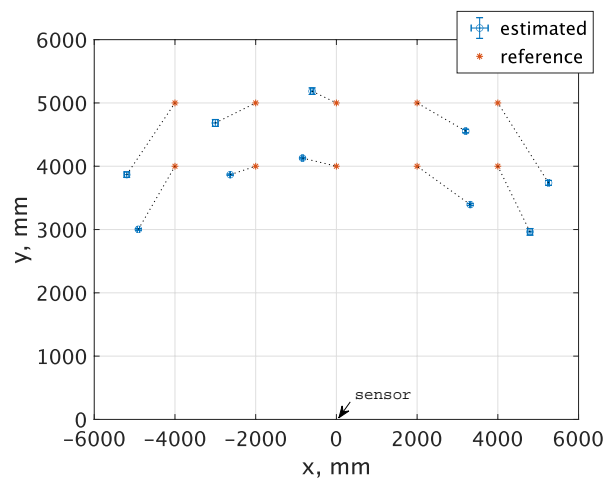
図 3.16c に実験結果を示す．提案手法で推定された位置の平均値を○印で，参考にメジャーで計測した参照用の位置を\*印で示した．標準偏差はエラーバーで表した．



(a) 実験環境：部屋の外に置かれたマーカは直線上を移動させた。右手のドアの先の部屋にセンサは配置されている。



(b) マーカとセンサの配置：センサは部屋の内部に，マーカは部屋の外部に設置されている。



(c) 実験結果

図 3.16: 実験環境と実験結果

### 考察

図 3.16c より，提案手法は部屋の外に配置されたマーカのおおよその位置も推定可能であった．マーカとセンサの間に壁などの遮蔽物があったとしても位置を推定できるという，従来の手法に比した磁気マーカを用いた手法の利点を示しており，遮蔽物の多い倉庫などで移動体を追跡するのに提案手法は有効であると思われる．図 3.16c を見ると， $x^+ = -4000, 2000, 4000$  mm の地点における誤差が，他の地点に比べて大きい．これは，鉄製の棚が近傍に存在することに由来していると思われる．

## 3.3 電磁式マーカの方向推定

磁気双極子モーメントが回転するようなマーカを実現するには，前節までのように静磁石を物理的に回転させるだけではなく，電磁石を用いることも考えられる．2 軸が直交するバーコイルアンテナそれぞれに対して， $90^\circ$ 位相のずれた正弦波を入力することによって，磁気双極子モーメントが水平方向に回転するような磁場を再現することができる（図 3.17）．例えば，雪崩埋没者の探索を考えたとき，機械的に回転する磁石を持ち歩くことは考えにくく，電磁石を用いたマーカを使うことが妥当である．本節では，雪崩埋没者の探索を念頭に，電磁式のマーカを使った方向推定の可能性について述べる．

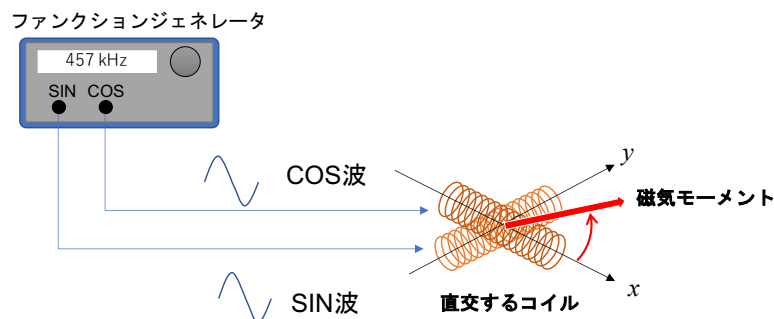


図 3.17: コイルを用いた回転双極子

### 3.3.1 電磁マーカ定位の問題設定

電磁式のマーカは，機械式のマーカと双極子モーメントの回転方法が異なるだけであり，基礎理論は第 2 章で述べたものと同様である．本節では，2 軸の直交するバーコイルアンテナを用いて双極子回転型電磁場源を実現する．センサには，3 軸のバーコイルアンテナを用いる．図 3.18 に示すように原点に配したセンサによって観測される 3 軸磁場から電磁場源への方位角  $\phi$  を求める．ファンクションジェネレータの出力信号は推定に使用せず，双極子モーメントの初期位相は未知の状態では，方位角を求める．

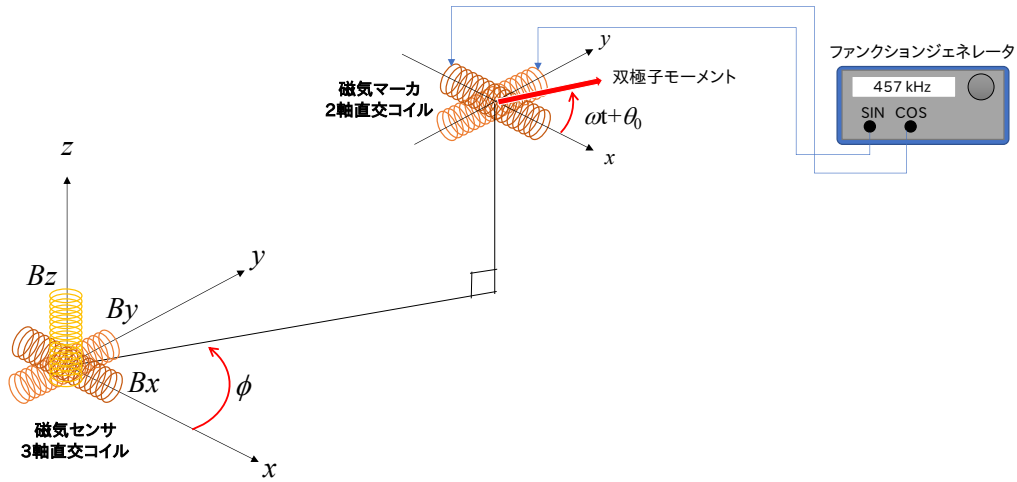


図 3.18: 電磁マーカの定位の問題設定：ファンクションジェネレータの出力信号は推定に使用せず、双極子モーメントの初期位相は未知の状態で、方位角を求める。

### 3.3.2 実装

#### センサ

センサユニットは、雪崩ビーコンからフェライトコアとバーコイルアンテナ、共振回路を取り出し、3つのバーコイルアンテナを直交させて配置して製作した（図 3.19）。それぞれのバーコイルアンテナは、ビーコンの周波数 457 kHz で感度が最大になるよう共振回路が調整されている。

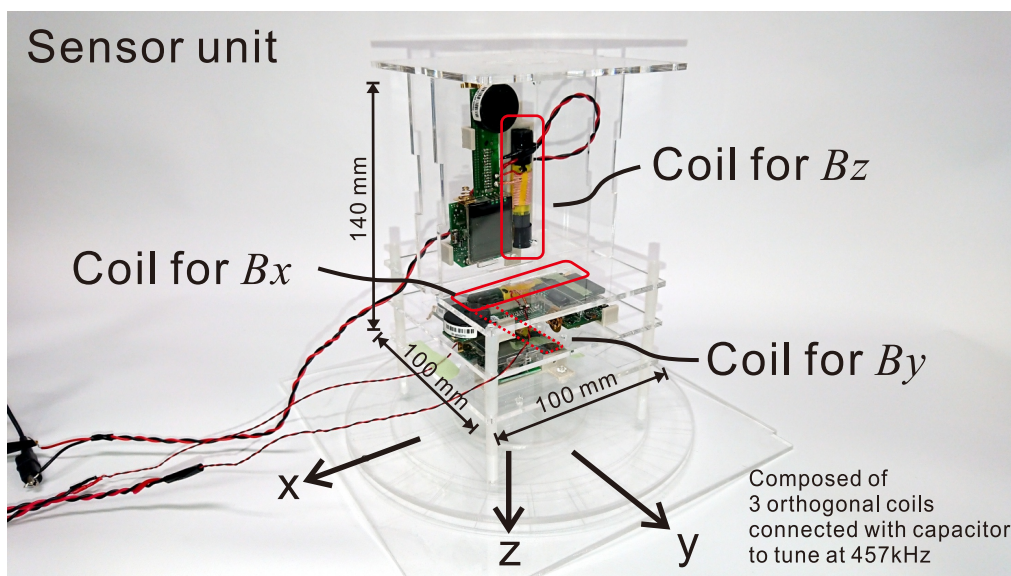


図 3.19: センサユニット

### マーカ

マーカには、2軸が直交するように配置されたバーコイルアンテナを用いた。それぞれのコイルに位相が $\pi/2$ ずれた正弦波をファンクションジェネレータから入力し、磁気双極子モーメントが回転するような磁場を発生させた。なお、コイルをインダクタとみなして、 $330\ \mu\text{F}$ のコンデンサを接続して、LC回路を構成し、共振周波数が457 kHzになるよう調整した。

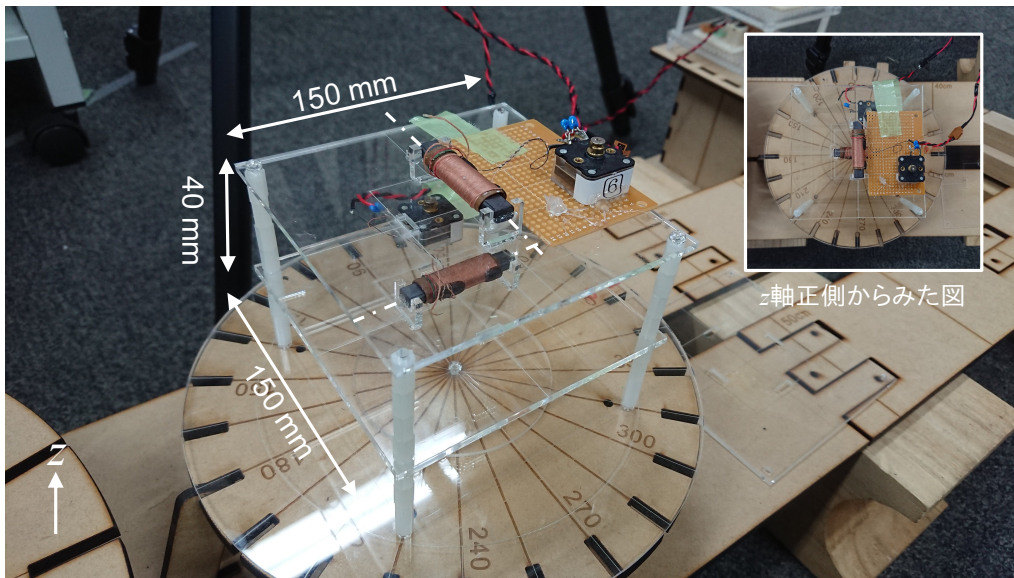


図 3.20: マーカ

### 実験装置

図 3.21 に実験装置を示す。磁場の発生には、ファンクションジェネレータ (WF1974, エヌエフ回路設計ブロック) を用い、 $A \sin(2\pi ft)$ ,  $A \cos(2\pi ft)$  の信号を図 3.20 に示すコイルにそれぞれ入力した。なお、振幅  $A = 10\ \text{V}$ 、周波数  $f = 457\ \text{kHz}$  とした。

磁場の観測には、オシロスコープ (TDS2024B, テキサスインスツルメンツ) を用いて、図 3.19 に示すセンサユニットからの 3 つの信号を同期して観測した。サンプリング周波数は 250 MHz、サンプリング期間は  $1.0 \times 10^{-5}$  秒として、4.57 波長のデータを計測した。

### 3.3.3 実験

#### 実験条件

本実験では、センサを原点に配置し、マーカを以下の 2 つの条件の位置に配置した。

- 条件 1:  $x = 600\ \text{mm}$ ,  $y = 0\ \text{mm}$ ,  $z = 0\ \text{mm}$
- 条件 2:  $x = 100\ \text{mm}$ ,  $y = 0\ \text{mm}$ ,  $z = 200\ \text{mm}$

センサを  $z$  軸回りに水平方向に  $30^\circ$  刻みで回転させながら、磁場の計測と方向の推定を繰り返す。

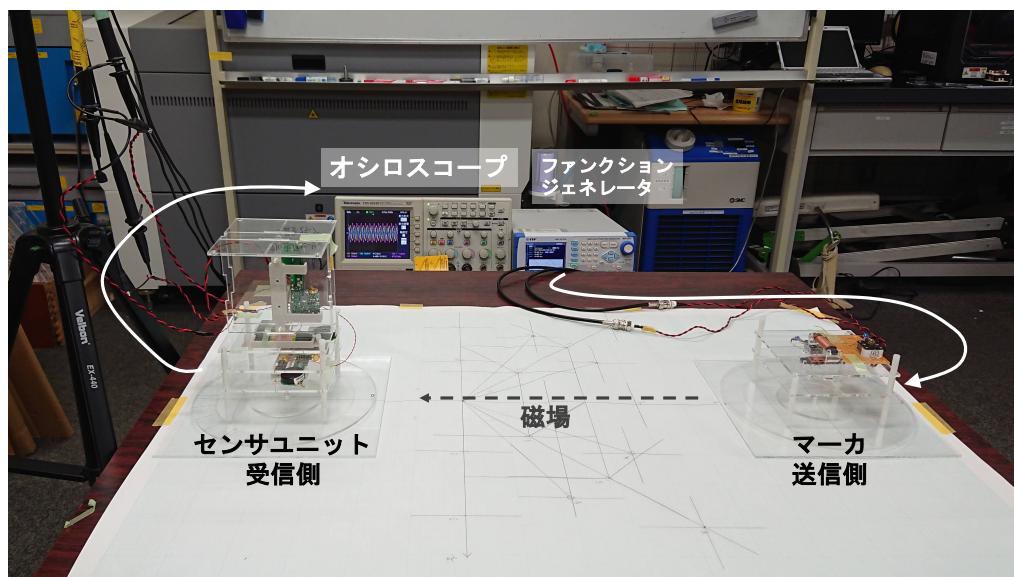


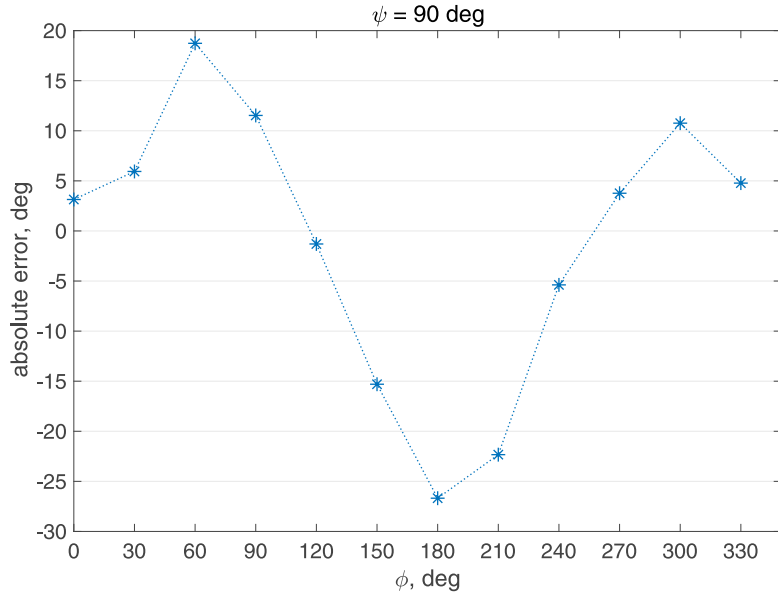
図 3.21: 実験装置

返した。

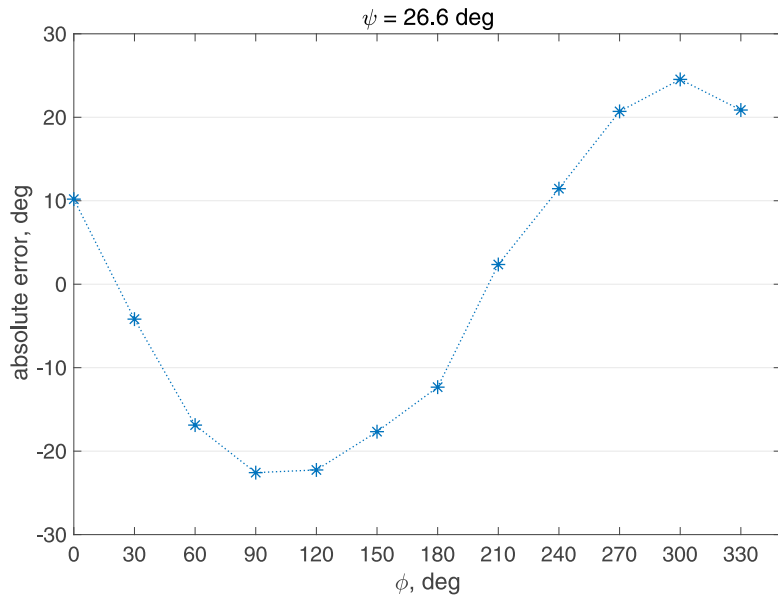
#### 実験結果

図 3.22 に、実験結果を示す。センサから見たマーカの方角に対する誤差を示している。推定した方位角と実際の方位角の絶対誤差の平均値は、条件 1 で  $15.5^\circ$ 、条件 2 で  $10.8^\circ$  であった。





(a) case 1



(b) case 2

図 3.22: 実験結果

### 3.3.4 考察

雪崩災害においては、埋没者を15分以内に雪中から救助することが求められる [64]。迅速な救助のための要点となるのは、探索者が雪表面から見えない埋没者の位置をいかに素早く把握し、発見するかである。一度、発見してしまえば、探索者は携行しているスコップなどで、瓦礫などに比べて比較的容易に救出できる。

市販されている雪崩ビーコンの多くは、内部に3軸のバーコイルアンテナを備えている (図 3.23)。しかしながら、実際には姿勢に応じてバーコイルアンテナを切り替えて、1軸しか使用していない。1軸のバーコイルアンテナ (磁気双極子) から発せられる磁力線に従って探索する場合、位置や姿勢によっては埋没者まで大回りして探索してしまう可能性がある。3軸のバーコイルアンテナをすべて使用できれば、それぞれに inputs する電流を制御することで、本章で論じたような  $xy$  平面に平行に双極子モーメントが回転するような電磁場源を再現することができる。さらに、雪崩ビーコンの機種によっては、加速度センサを内部に備えているものもあり、姿勢に応じてコイルに inputs する電流を調整すれば、やはり  $xy$  平面に平行に回転する双極子回転型電磁場源を再現することができる。そうすれば、本章で述べた手法によって、センサから見た雪崩ビーコンへの方向を推定することが可能になり、直線的に埋没者のもとへ探索することができる。

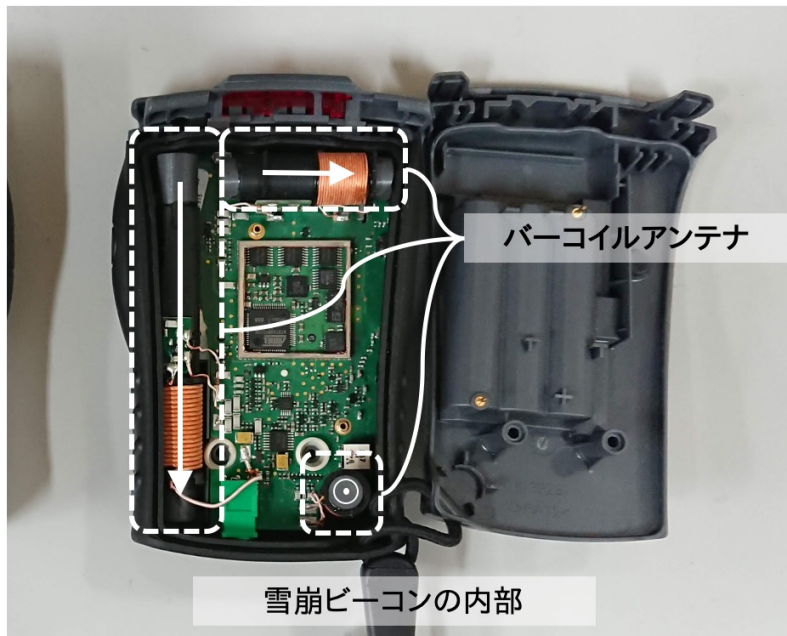


図 3.23: 雪崩ビーコンの内部

本節では、電磁マーカを用いて、センサから見たマーカへの方位角を推定できることを示した。第2章で示した基礎理論は、機械式、電磁式の両方の双極子回転型電磁場源に対して有効であった。用途に応じて、特徴の異なる電磁場源を選択可能である。

## 3.4 結言

本章では、第2章で提案した基礎理論の有効性を実機を用いて検証した。近接磁場源を用いた定位では、距離の3乗に反比例して減衰する磁場をSN比高く計測するために、強い磁場源と感度の高いセンサの製作が重要になる。本章では、ネオジム磁石を用いた機械式のマーカとMIセンサを用いたセンサユニットについて述べた。

製作した磁場源とセンサユニットを用いて、まず、式(2.15)、式(2.17)に基づいて双極子回転型磁場源を定位したところ、 $z = 150 \text{ mm}$ ,  $350 \text{ mm}$ の平面内でそれぞれ平均誤差  $91.7 \text{ mm}$ ,  $94.5 \text{ mm}$  で推定可能であった。式(2.15)、式(2.17)は、 $0 \leq \phi < \pi$ の範囲でしか方位角を推定できないが、感度の低くなりがちな  $B_z$  の値を用いることなく推定できるという利点がある。機械式のマーカを用いた実験では、 $3 \text{ m}$ の距離でおよそ  $0.1 \mu\text{T}$  の磁束密度が観測された。MIセンサの仕様から、現状の4~5倍の範囲で磁場を観測可能と考えられる。次に、式(2.18)に基づいて定位したところ、式(2.18)は平均誤差  $49.9 \text{ mm}$ 、式(2.19)は平均誤差  $166.5 \text{ mm}$  であった。また、静止したマーカだけでなく、移動するマーカを追跡することもできることを示した。移動するマーカを追跡できることは、工場内での移動ロボットの追跡などへ幅広い応用への展開の可能性を示している。さらに、非磁性の金属でセンサを囲ったとしても精度は変わらなかった。そして、実環境を考慮した検証として、部屋の内部から外部に置かれたマーカのおおよその位置を推定できることを示した。これは遮蔽物の多い環境であっても磁場を用いた手法では、頑健に推定できる可能性を示している。

3.3節では、電磁式のマーカを用いた方位角の推定について述べた。雪崩ビーコンの通信周波数と同一の  $457 \text{ kHz}$  を回転周波数とする電磁式のマーカを用いた実験で、方位角を平均誤差  $10.8^\circ$  で推定した。電磁式のマーカには、可動部分が少なく持ち運びが容易で、電流の強さを変化させることで通信距離を調整できるという利点がある。双極子回転型電磁場源を用いることにより、指向性のない場を周囲に発生させることが可能で、直線的な探索を可能にした。これは、雪崩探索などにおいて、既存の雪崩ビーコンと比較して、探索時間を短くできる可能性があり、有用であると考えられる。適用する用途にあわせて機械式と電磁式のマーカを選択することが良いだろう。

磁場を用いた位置推定には、非磁性の金属の影響や人体などの水分による減衰の影響を受けにくいという特徴があり、様々な環境での位置推定を可能にする。本章で例示した工場での移動ロボットの追跡や雪崩埋没者の探索だけでなく、商業施設などの人が密集する場所での商品の探索や海中での無人探査機の制御など、幅広い応用への展開が期待される。

## 第 4 章

# 電磁場源定位を応用した携帯端末の位置推定

### 4.1 緒言

前章で述べたようなマーカ位置の推定ではなく、センサ位置を推定する場合も様々な応用がある。例えば、センサを搭載したドローンを制御したり、手に持ったスマートフォンのセンサを使って自身の位置を推定してナビゲーションしたり、さらには、瓦礫に埋もれた人のスマートフォンを探索するようなことまで考えられる。こうした応用では、センサを手に持っていたり、かばんに入れていたりするため、センサの姿勢が傾いている状態での自己位置推定が不可欠である。つまり、センサ座標系と世界座標系が一致しないような状況での自己位置推定が必要になる。前章までは、センサは原点に配置され、マーカの回転軸とセンサの  $z$  軸は平行であると仮定していた。本章では、第 2 章で述べた手法を拡張し、世界座標系とセンサ座標系が一致しない状況で観測される磁場を補正し、センサ位置を推定する。異なる状況に合わせて 3 種類の補正法を提案し、実機を用いて検証する。

### 4.2 背景

大地震などの大規模な災害時には倒壊した家屋などに取り残される人が多数発生する。72 時間以内に救出することが望まれており、早期に発見することが望まれている。しかしながら、瓦礫などの遮蔽物に囲まれた人は、当然カメラなどの光学的な手段では探索することができない。そこで、電磁波などの遮蔽に頑健な手段を用いて探索することになる。比較的高い周波数の電磁波を用いた地中レーダによる探索が提案されている [15]。生体のわずかな振動を捉えることができ、深さ方向の位置だけでなく呼吸などの生体情報を計測できるという利点がある一方で、水分による減衰や金属による反射の影響を受けやすいという課題がある。そこで、比較的低周波数の低い低周波磁場源を用いた探索を検討する。

低周波磁場源を用いた探索としては、前章で述べたような雪崩ビーコンなどの低周波磁場源を埋没者に事前に所持させておき、いざ探索するとなったときに、埋没者のもつ磁場源から発

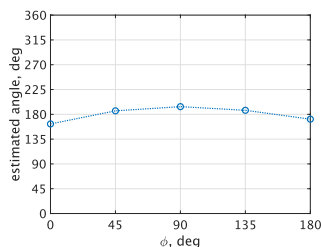
せられる磁場を頼りに探索することが考えられる。しかしながら、大地震などの災害時の探索では、こうした雪崩災害時の探索とは状況が異なり、日常生活のいつ発生するか予知が難しいことから、あらかじめ雪崩ビーコンなどの磁場源を埋没する可能性のある人に持たせておくことは考えにくい。そこで、本章では、日常的に所持しているスマートフォンを用いた探索方法を提案する。埋没者は磁気センサを備えたスマートフォンを所持しているとして、探索者が低周波電磁場源（マーカ）を移動させながら、スマートフォンの磁気センサで観測された磁場の情報をもとに探索していく。スマートフォンを用いた探索には、

- 地磁気のような非常に小さな磁場を観測可能な高感度磁気センサを利用可能
- 加速度センサを利用することで、スマートフォンの姿勢を把握可能
- 携帯回線や Wi-Fi などの通信手段を用いて、観測結果を探索者に送信可能

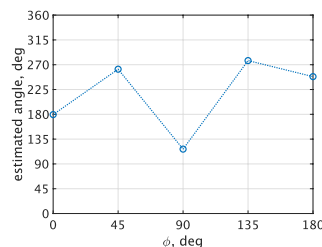
といった、さまざまな利点がある。

一方で、スマートフォンの姿勢が未知の状態では探索しなければならないことから、姿勢が未知の状態では観測された磁場の補正方法を検討する必要がある。スマートフォンに搭載された加速度センサを用いることで、水平方向の姿勢（ $x$  軸、 $y$  軸回りの回転）は比較的簡単に補正することができる。問題となるのは、 $z$  軸回りの回転の補正である。地磁気を用いる方法があるが、地磁気は周囲の磁性体の配置などによって一定の方向を向かない。図 4.1 に付近に磁性体がある場合とない場合に観測される地磁気ベクトルで方位角を補正した結果を示す。世界座標系で方位角  $\phi = 180^\circ$  の地点に機械式の磁気マーカを設置し、タブレット（iPad Air, Apple）に搭載された地磁気センサで回転磁場を観測した。 $z$  軸回りの回転角  $\gamma$  を  $0$  から  $180^\circ$  の範囲で回転させ、観測される回転磁場の直流成分を地磁気とみなして、推定された方位角を補正した。正しく補正されれば、 $\gamma$  に依らずに、 $\phi = 180^\circ$  と推定される。図 4.1a に示すように、周囲に磁性体がない場合は、タブレットの姿勢を変化させても正しく  $180^\circ$  付近に推定されており、地磁気による回転角の補正が見込める。一方で、周囲に磁性体が存在する場合は、観測される地磁気が一定の方向を向かないため誤差が大きくなり、地磁気による補正は困難である。

本章では、まず、加速度と地磁気を用いる基本的な補正方法を説明する。そして、地磁気によらない頑健な補正方法について提案する。本章では、移動するマーカを用いる方法と複数の



(a) 付近に磁性体がない場合



(b) 付近に磁性体がある場合



(c) タブレットと重ねられた磁性体

図 4.1: 地磁気を用いて  $z$  軸回りの回転  $\gamma$  を補正した場合の方位角：磁気センサとして用いたタブレット（iPad Air, Apple）に工具などの磁性体を重ねた状態で回転磁場と地磁気を観測

マーカを用いて補正する方法を提案する。これらは、それぞれ瓦礫埋没者の探索と屋内でのスマートフォンを用いたナビゲーションを想定している。従来、スマートフォンの自己位置の推定は、GPSを用いることが多かったが、屋内ではGPSの信号を受信することができず、ナビゲーションができなかった。もし屋内での高精度な位置推定が可能になれば、GPSと併用することによって屋外から屋内へのシームレスなナビゲーションを実現することが可能になる。

また、探索者の持つ磁場源を移動させながら、広範囲を効率よく探索するためには、非常に強い磁場源を用いる必要がある。しかしながら、前章までで用いてきたような静磁石でそれを実現しようとすると、マーカは周囲に常に強い磁場を発生し続けることになる。探索者が磁性体を所持した状態で接近したり、探索時でなくても磁性体の近くをマーカが通過したりするとき、強い磁力によって磁性体がマーカに引き寄せられ、探索者にぶつかることが想定される。また、マーカが磁性体に衝突して破損するなどの二次被害が発生することが考えられる。静磁石に対して、電磁石はコイルに流す電流を制御することで、必要なときに磁場を発生させることができ、探索時以外での磁力発生による事故を防ぐことができる。しかしながら、電磁石を用いて強い磁場を発生させるためには非常に強い電流をコイルに流す必要があり、静磁石に比べて効率よく磁場を発生させることが困難である。そこで、本章では、一定の強い磁場を発生させられる静磁石と磁場を電流で制御可能な電磁石を組み合わせたハイブリッド磁場源を用いた探索方法についても述べる。

本章では、2種類の補正法を提案し、それぞれの有効性を実機を用いて検証する。本章の構成は以下の通りである。まず、センサの姿勢が傾く場合に観測される磁場とその補正問題を定義する。次に、既存手法として加速度センサと地磁気センサを用いる補正について述べた後、提案手法として移動する磁気マーカを用いる補正、複数の磁気マーカを用いる補正を提案する。そして、それぞれの補正方法の有効性を実験によって検証する。屋内での移動体の定位、瓦礫埋没者の探索、屋内ナビゲーションを想定して有効性を検証する。最後に、実用性を考えた電磁場源として、静磁石と電磁石を組み合わせたハイブリッド型磁場源を提案し、実機を用いて有効性を検証する。

### 4.3 問題設定

本章では、世界座標系を  $xyz$ 、センサ座標系を  $XYZ$  で表記する。図 4.2 に示すように、探索者の持つマーカは、原点に配置され、その磁気モーメントが

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \cos(\omega t + \theta_0) \\ p \sin(\omega t + \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

で表されるように  $xy$  平面に平行に回転する。埋没者の持つセンサ (スマートフォン) は、位置

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \psi \cos \phi \\ r \sin \psi \sin \phi \\ r \cos \psi \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

で表され、その位置で観測される磁場は、

$$\tilde{\mathbf{B}} = (B_X, B_Y, B_Z)^T = R^{-1} \mathbf{B}$$

ただし  $R = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$  (4.3)

で表される。ここで、 $\alpha, \beta, \gamma$  は、それぞれ  $X, Y, Z$  軸回りの回転角である。

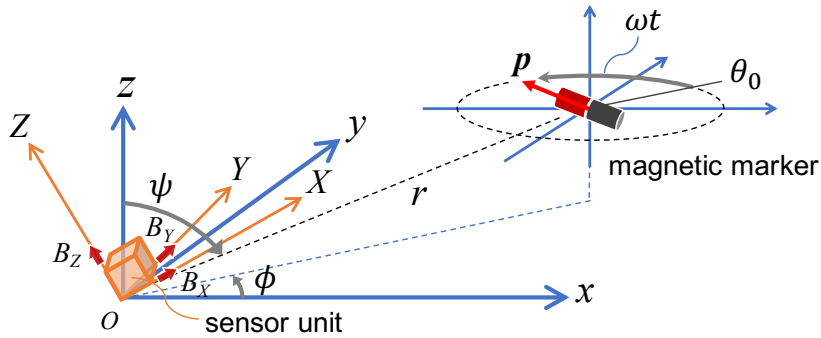


図 4.2: センサ座標系が世界座標系に対して傾いている場合

センサ座標系  $(X, Y, Z)$  が世界座標系  $(x, y, z)$  に対して傾いており、一致しない場合について考える (図 4.2).  $xyz$  軸に対する  $XYZ$  軸の回転角度をそれぞれ  $\alpha, \beta, \gamma$  とする [65] (図 4.3). このとき、世界座標系からセンサ座標系の変換は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{sensor}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}}_{R_\alpha} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \beta & 1 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}}_{R_\beta} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{R_\gamma} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{global}} \quad (4.4)$$

で表される。本章では、式 (4.3) で表される磁束密度を観測し、マーカから見たセンサの方位角  $\phi$ 、天頂角  $\psi$ 、距離  $r$  を推定する。推定されたマーカとセンサの相対的な位置から、マーカから見たセンサの位置を求めることが可能である。

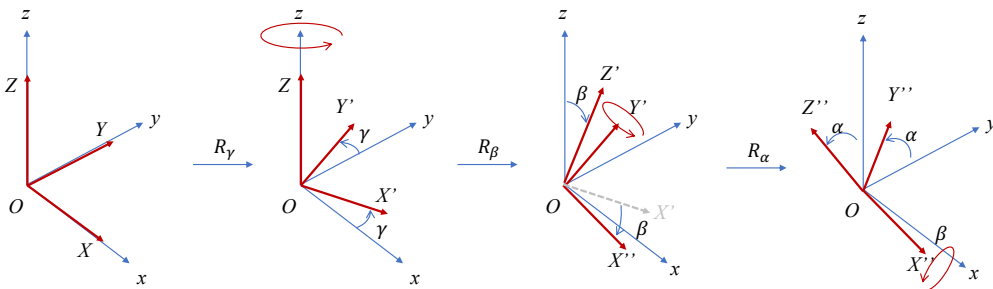


図 4.3: 座標系の回転

## 4.4 提案手法：座標系の傾きへの対応

本節では、センサ座標系が世界座標系と平行でない場合に、観測された磁場を補正して、世界座標系でのマーカもしくはセンサの位置を推定する方法を提案する。既存手法として加速度と地磁気による補正について述べた後、提案手法として磁気マーカを用いた補正法を2種類提案する：

1. 加速度と地磁気による補正 (4.4.1 節)
2. 移動する磁気マーカを用いた補正 (4.4.2 節)
3. 複数の磁気マーカを用いた補正 (4.4.3 節)

### 4.4.1 加速度と地磁気による補正

$XYZ$  座標系において、重力加速度  $\mathbf{g} = g_0(g_x, g_y, g_z)^T$  が観測されるとする。ただし、 $\sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} = 1$  であり、 $g_0$  は重力加速度の定数である。同様にして、 $XYZ$  座標系において、地磁気  $\mathbf{B} = B_0(B_X, B_Y, B_Z)^T$  が観測されるとする。ただし、 $\sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2} = 1$  であり、 $B_0$  は地磁気の大さを表す定数である。 $xyz$  座標系において、重力は常に  $(0, 0, -g_0)^T$  であることから、 $\alpha$  と  $\beta$  は、観測される  $(g_x, g_y, g_z)$  を用いて、

$$\sin \alpha = -\frac{g_y}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \quad (4.5)$$

$$\cos \alpha = -\frac{g_z}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \quad (4.6)$$

$$\sin \beta = g_x \quad (4.7)$$

$$\cos \beta = \sqrt{g_y^2 + g_z^2} \quad (4.8)$$

と表される。同様にして、 $x$  軸が東を向いているとすれば、 $xyz$  座標系において、地磁気は  $(B_0, 0, 0)^T$  となり、 $\gamma$  は  $B_X, B_Y, B_Z, \alpha, \beta$  より、

$$\sin \gamma = B_Z \sin \alpha - B_Y \cos \alpha \quad (4.9)$$

$$\cos \gamma = \frac{B_X}{\cos \beta} \quad (4.10)$$

と表される。実際には、あらかじめ世界座標系で観測した地磁気  $(B_{0x}, B_{0y}, B_{0z})^T$  を用いて、

$$\begin{pmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{pmatrix}_{\text{sensor}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}}_{R_\alpha} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \beta & 1 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}}_{R_\beta} \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{R_\gamma} \underbrace{\begin{pmatrix} B_{0x} \\ B_{0y} \\ B_{0z} \end{pmatrix}}_{\text{global}} \quad (4.11)$$

を  $\gamma$  について解けば良い。したがって、計算された  $\alpha, \beta, \gamma$  から、傾いた座標系で観測された磁場  $\tilde{\mathbf{B}} = (\tilde{B}_X, \tilde{B}_Y, \tilde{B}_Z)^T$  は、世界座標系での磁場  $\mathbf{B}$  に次式を用いて変換することが可能で



ある。

$$\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)^T = R\tilde{\mathbf{B}}$$

$$\text{ただし } R = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

ゆえに、たとえセンサ座標系が世界座標系に対して傾いたとしても、3軸加速度センサと3軸地磁気センサを用いて観測される加速度と地磁気値から、観測された磁場を世界座標系での磁場  $\mathbf{B}$  に変換することができ、式 (2.12)、式 (2.15)、式 (2.17)、式 (2.18)、式 (2.19)、式 (2.21) を用いて、 $\psi, \phi, r$  を求めることができる。

#### 4.4.2 移動する磁気マーカを用いた補正

本項は、要約では省略する。

#### 4.4.3 複数の磁気マーカを用いた方位角の補正

本項は、要約では省略する。

#### 4.4.4 提案手法のまとめ

実験による有効性の検証結果を述べる前に、3つの補正手法をまとめる (表 4.1)。いずれの手法も補正は  $x, y$  軸回りの回転角は加速度を用いて計算される。異なるのは、 $z$  軸回りの回転角  $\gamma$  の求め方である。地磁気を用いる手法は、スマートフォンのセンサなどで観測される地磁気ベクトルの向きから  $\gamma$  を求める。移動するマーカを用いる方法では、基準としたい軸上でマーカを移動させ、いくつかの地点での観測データに基づいて  $\gamma$  を求める。さらに、複数のマーカを用いる方法も、いくつかの地点での観測データに基づいて  $\gamma$  を求めるが、あらかじめ異なる周波数で回転する複数のマーカを直線上に配置しておくことで、マーカを移動させる手間がなくなる。

表 4.1: 補正方法

	(1) 地磁気を用いる方法	(2) マーカを移動させる方法	(3) 複数マーカを用いる方法
$x$ 軸回りの回転の補正	加速度		
$y$ 軸回りの回転の補正	加速度		
$z$ 軸回りの回転の補正	地磁気	1つのマーカを複数の位置に配置	複数のマーカを配置

## 4.5 実験：加速度と地磁気を用いた補正

本節では、4.4.1項で述べた加速度センサによる補正の有効性の検証を目的として、実験結果について述べる。

### 4.5.1 実験条件

図 4.4 に\*で示した位置にマーカを置き、それぞれの位置を式 (2.18) を用いて推定した。双極子回転型電磁場源からの磁場は、前章と同様に MI センサを用いて観測した。

地磁気と重力加速度は、MI センサに固定された Android スマートフォン (Xperia SO-04J, ソニーモバイルコミュニケーションズ) に内蔵された 3 軸地磁気センサと 3 軸加速度センサを用いて計測された。計測には MATLAB Mobile [61] というアプリケーションを用いた。サンプリング周波数は 10 Hz に設定し、30 秒間静止状態で地磁気と重力加速度を計測したのち、平均値を求めた。4.4.1 項で述べた変換に基づいて、観測された磁場を補正した。

### 4.5.2 実験結果

地磁気と加速度から、センサの傾きを計算したところ、 $\alpha = 29.6^\circ$ 、 $\beta = -11.6^\circ$ 、 $\gamma = 37.5^\circ$ であった。表 4.2 にセンサが傾いた場合と傾いていない場合の  $x, y, z$  座標の誤差をまとめた。

図 4.4 に推定結果を示す。観測された磁場から推定された結果と光学式の追跡装置で観測した結果の差を誤差として求めたところ、平均と標準偏差は  $129.4 \pm 48.8$  mm であった。

表 4.2: 推定された位置と参照用の位置との誤差

条件	$x$ , mm	$y$ , mm	$z$ , mm	三次元位置, mm
傾けない場合	$27.8 \pm 22.4$	$32.9 \pm 30.6$	$12.5 \pm 9.2$	$49.9 \pm 32.3$
傾けた場合	$37.5 \pm 42.2$	$52.3 \pm 60.6$	$95.6 \pm 19.9$	$129.4 \pm 48.8$

### 考察

図 4.4 において、 $x > 0$  の領域における誤差は、 $x < 0$  におけるものよりも大きい。本実験の条件では、センサ座標系は世界座標系に対して  $z$  軸が正の方向に傾いており、世界座標系で  $z = 350$  mm の平面にあるマーカはセンサ座標系の  $XY$  平面に近づく傾向があった。その結果、 $|B_z|$  が  $|B_x|$  と  $|B_y|$  に対して小さくなり、天頂角  $\psi$  と三次元位置の誤差が悪化したと考えられる。しかしながら、図 4.4 に示すように  $x$  座標と  $y$  座標は、4.4.1 節で述べた地磁気と重力加速度に基づく変換によって、精度良く推定されていることがわかる。

加速度センサによる補正が可能であることが明らかになった。しかしながら、環境中の磁性体の影響により、空間内で観測される静磁場（地磁気）の方向が一定でない場合、本節で述べた手法の適用が難しい。

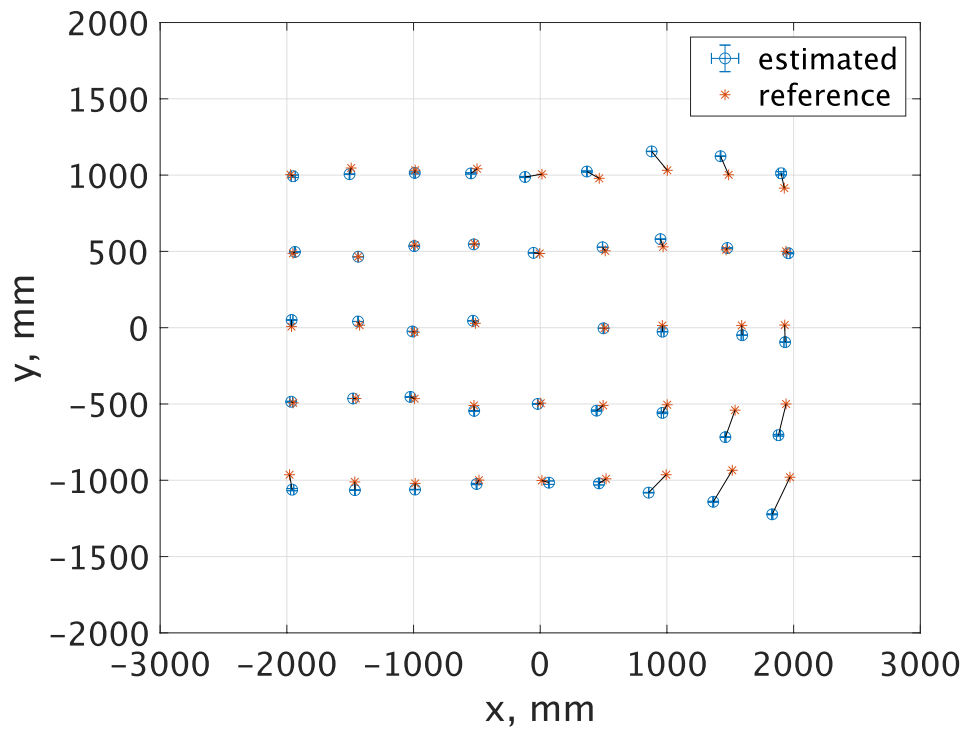


図 4.4: 実験結果

## 4.6 実験：スマートフォンの探索

本節は、要約では省略する。

## 4.7 実験：自由姿勢のスマートフォンを用いたナビゲーション

本節は、要約では省略する。

## 4.8 ハイブリッド型マーカ

本節は、要約では省略する。

## 4.9 結言

本章では、スマートフォンなどのセンサ位置を推定する手法について議論した。センサ位置を推定するためには、姿勢が未知であるセンサの傾きを補正する必要がある。本章では、センサが傾き、センサ座標系と世界座標系が一致しない場合に、加速度センサと磁気センサを併用して観測される磁場を補正する方法を提案した。傾いたセンサ座標系を補正することによる実

用上のメリットは2点ある。

1点目は、センサの設置場所の自由度を上げられることである。4.5節で想定したような屋内での移動体の追跡を実現する上では、センサは屋内の床や天井、壁面などに水平に設定されることが望ましいが、柱やポールなどの不安定な場所に設置しなければならないこともありうる。そのような場所でたとえ傾いて設置されたとしても、加速度センサの値を使って補正することができるとなれば、さまざまな場所に設置することが可能になり、便利である。本章では、4.5節で傾いたセンサを用いた実験を通して、加速度による補正の有効性を検証した。センサが傾いた状態であっても加速度センサで計測した重力加速度の情報を用いて、センサが傾いていない状態と同等の精度でマーカ位置を推定できることを示した。

2点目は、センサの自己位置を推定できることである。瓦礫埋没者の探索やスマートフォンを用いた屋内でのナビゲーションなど、センサから見たマーカの位置ではなく、センサ（スマートフォン）自身の位置を推定する応用が多くある。その場合、任意の姿勢に保持されるスマートフォンの位置を推定するためには、ロール角・ピッチ角・ヨー角を補正する必要がある。特に $z$ 軸回りの回転角であるヨー角を任意の座標系に対して補正する必要がある。本章では、ヨー角を補正する方法として、地磁気を使う方法、1つの磁気マーカを移動させる方法、複数の磁気マーカを使う方法の3つの方法について述べた。特に後半の2つの提案方法によって、空間中の任意の方向に座標系を設定することが可能になり、瓦礫埋没者の探索や屋内ナビゲーションへの応用が可能になった。3つの方法の特徴と利点を表4.3にまとめる。

(1)の方法は、スマートフォンに内蔵された地磁気センサのみで補正可能というメリットがある。一方で、この方式には環境中では地磁気が一定の方向を向いているという仮定があり、センサの近くにマーカとは別の磁場源が存在したり、磁性体の塊が存在したりする場合は、地磁気が一定の方向を向かず、利用することができない。したがって、4.5節で示したような屋内での移動体の定位など、広い空間での定位における補正に適している。

(2)の方法は、環境中に設定したい方向にマーカを移動させながら、複数の地点でその位置を推定し、得られた点群から補正用の角度を算出するものである。なるべく多くの地点で補正用のデータを観測することで、環境ノイズに左右されずにロバストな補正を実現できる。一方で、マーカの移動とセンサでの計測を繰り返す必要があり、その手間がデメリットである。探索者が新規に座標系を設定できること、環境ノイズに頑健であることから、瓦礫埋没者の探索に適していると思われる。

(3)の方法は、環境中に回転周波数の異なる複数のマーカを設置し、検波周波数を変えることで一度に複数のマーカ位置を推定し、それらの位置をもとに補正用の角度を算出するものである。一度の計測で補正が完了するというメリットがある。一方で、複数のマーカを設置する手間がかかる、一度設置したマーカを再設置するのが困難というデメリットがある。応用としては、スマートフォンのナビゲーションなどに適していると思われる。

それぞれの補正方法にはメリットとデメリットがあり、応用に応じて適切な補正方法を選択することが肝要である。

また、本章では、静磁石と電磁石の両方の利点を併せ持つハイブリッド型のマーカを提案した。必要なときに強力な磁場を発生させられ、場合によっては、静磁石の磁場をキャンセルさ

表 4.3: 補正方法の特徴と適した応用先

	(1) 地磁気を用いる方法	(2) マーカを移動させる方法	(3) 複数マーカを用いる方法
メリット	センサ側の操作のみで補正可能	補正用の点を複数取ること で、ノイズに頑健	一度の計測で補正が完了
デメリット	磁性体の近辺など、地磁気 の歪む地点では利用不可	複数回の移動と計測が必要	複数のマーカを設置する 手間がかかる
適した応用	屋内での移動体の定位	瓦礫埋没者の探索	スマートフォンを持つ人の ナビゲーション

せることもできるハイブリッド型のマーカは、瓦礫埋没者などの探索への活用が期待される。本章で述べた補正方法やハイブリッド型マーカを用いることで、瓦礫埋没者の探索や屋内での人のナビゲーションなど、第2章で述べた磁場源定位方法の応用範囲を拡大することができると考えられる。

## 第 5 章

# 電波源の探索

### 5.1 緒言

前章までは、数 Hz で発振するような比較的周波数の低い電磁場源を用いた探索について述べた。周波数の低い電磁場源は、2.45 GHz, 5 GHz の比較的周波数の高い電波に比べて、マルチパスや水分による減衰による影響が小さく頑健な探索が可能であるという利点があった。一方で、低周波電磁場源の課題は、その通信距離である。通信可能な距離は約数 m から 10 m 程度に限定されている。したがって、将来的には、環境変動に頑健な低周波電磁場源と、探索可能範囲の広い高周波電波源を組み合わせた位置推定が望まれる。そこで本章では、前章まで議論した低周波電磁場源よりも周波数は高いが、GHz 帯よりは周波数の低いサブ GHz 帯の電磁波に着目し、新たな探索手法を検討する。

近年、920 MHz 帯の周波数を Machine to Machine (M2M) の分野で活用することが検討されている [66]。今後、身近な様々なものに 920 MHz 帯の通信モジュールが搭載されると考えられる。Wi-Fi や BLE などで使用される 2.4 GHz 帯、5 GHz 帯と比べて、920 MHz 帯は、通信可能な範囲が広く、電波が回折して回り込むため死角が少なく、電波干渉も少ないという利点がある [67]。また、315 MHz 帯も通信モジュールとして使用されている [68]。もし 315 MHz 帯や 920 MHz 帯の電磁波源の位置を推定することができれば、その周波数帯域の通信端末を搭載した機器の位置を屋内で把握することが可能になる。通信端末を搭載した環境センサや移動ロボットなどの位置を把握することができ、センサの保守点検や移動ロボットの制御などに活用できると考えられる。

本章の目的は、サブ GHz 帯の電磁波源の位置を探索することである。本章では、電磁波源から発せられる Poynting ベクトルに着目する。Poynting ベクトルは、電磁波源からのエネルギーの流れを表しており、その流れを遡ることで電磁波源へ到達する方法を提案する。

坂本らは、Support Vector Machine Regression (SVR) を用いて、50 m 四方の範囲において 920 MHz 帯の周波数を使用する WI-SUN 規格の信号源位置を Received Signal Strength Indicator (RSSI) の強度から推定している [69]。SVR を用いた手法では、事前に位置が既知の信号源の RSSI を組として学習用のデータを計測しておく必要があり、推定精度がその計測の仕方に左右される。920 MHz 帯電磁波源の通信可能範囲が数十 m を超えることを考える

と、事前に大量の地点で RSSI を計測することは難しいと考えられ、電波環境が変化するような場所に対応するためにも、そのときの計測値のみから位置を推定する手法が求められる。

また、棚に設置した 920 MHz 帯の RFID タグの RSSI から、K-nearest neighbor 法を用いて位置を推定した例がある [70]。RSSI の大きさは、送信機の性能や周辺の電磁波環境によって大きく左右されることが指摘されている。屋内での位置推定を考えたとき、人や物の移動による電磁波環境の変化が想定され、こうした外乱に頑健な手法が望まれる。本章では、電磁波源の発する Poynting ベクトルに着目して、それを計測することによって、電磁波源の位置を探索する手法を提案する。

## 5.2 提案手法

### 5.2.1 問題設定

本章では、角周波数  $\omega$  で発振する電波源が原点に存在するとする。ソースの姿勢は、 $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$  で表される。電場センサは、局所的な領域  $\Omega$  内に配置されているとする。Maxwell の方程式より次式が成り立つ。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (5.2)$$

ここで、 $\gamma$  は複素誘電率、 $\mu$  は透磁率を表している。本章では、自由空間での探索を想定して、 $\gamma = i\omega\epsilon_0$  とする。ただし、 $\epsilon_0$  は、真空の誘電率である。

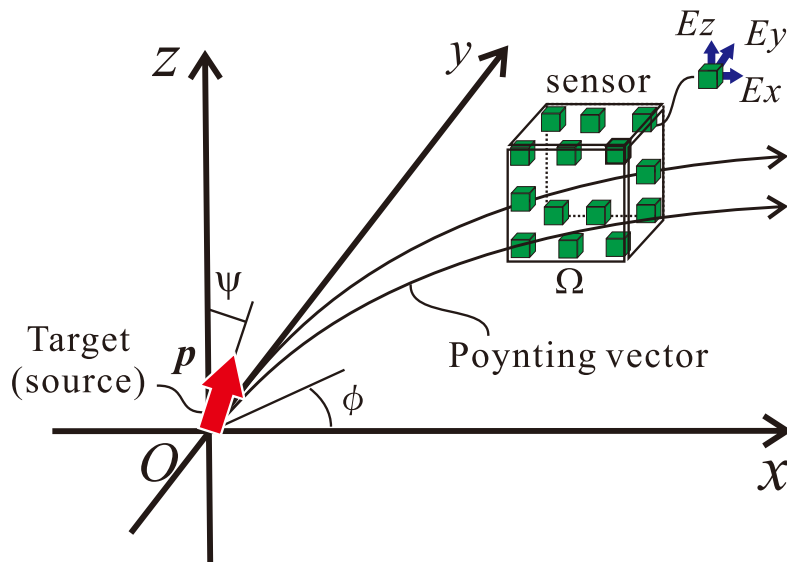


図 5.1: 問題設定

### 5.2.2 Poynting ベクトルに基づく探索

磁場ベクトルを  $\mathbf{H}$ 、電場ベクトルを  $\mathbf{E}$  としたとき、Poynting ベクトル  $\mathbf{S}$  は次式で表される。

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (5.3)$$

Poynting ベクトルは、単位時間あたりに単位面積を通るエネルギーを示している。ある地点の Poynting ベクトルを計測することができれば、その地点での Poynting ベクトルの向きを計測し、そのベクトルの逆向きに進み、さらに Poynting ベクトルの向きを計測し、逆向きに進むということを繰り返すことで、電磁波源に到達できると考えられる。

Poynting ベクトルを得るためには、磁場ベクトルと電場ベクトルを計測する必要がある。しかしながら、それぞれのベクトルの3方向成分それぞれをセンサで計測する場合、合わせて6チャンネルの値を計測する必要がある。もしチャンネル数を削減することができれば、システムを簡素化することが可能となる。そこで、本章では、電場の計測により、磁場を置き換えることを検討する。これにより、センサ数を削減しつつ、安定して Poynting ベクトルを計測することを考える。

### 5.2.3 磁場の再構成

電場から磁場を再構成するために、電場と磁場の関係性を表す方程式を導く。  
ベクトル解析の公式より、

$$\nabla \cdot (\mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F})) = \mathbf{H} \cdot \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) + (\nabla \cdot \mathbf{H})(\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (5.4)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F})) = (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) - \mathbf{H} \cdot (\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F})) \quad (5.5)$$

が成り立つ。ここで、 $\mathbf{H}$  は磁場ベクトル、 $\mathbf{F}$  は荷重のベクトルである。足し合わせることによって、

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (\mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F})) + \nabla \cdot (\mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F})) \\ &= \mathbf{H} \cdot \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) + (\nabla \cdot \mathbf{H})(\nabla \cdot \mathbf{F}) + (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) - \mathbf{H} \cdot (\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F})) \end{aligned} \quad (5.6)$$

を得る。ここで、 $\nabla^2 \mathbf{F} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{F})$  を満たすので、式 (5.6) は、

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot (\mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F})) + \nabla \cdot (\mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F})) \\ &= \mathbf{H} \cdot \nabla^2 \mathbf{F} + (\nabla \cdot \mathbf{H})(\nabla \cdot \mathbf{F}) + (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) \end{aligned} \quad (5.7)$$

となる。式 (5.7) の両辺を領域  $\Omega$  で積分することにより、

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega} \nabla \cdot (\mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F})) dv + \iiint_{\Omega} \nabla \cdot (\mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F})) dv \\ &= \iiint_{\Omega} \mathbf{H} \cdot \nabla^2 \mathbf{F} dv + \iiint_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{H})(\nabla \cdot \mathbf{F}) dv + \iiint_{\Omega} (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) dv \end{aligned} \quad (5.8)$$



が得られる。ガウスの定理より、式 (5.8) は、

$$\begin{aligned} & \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F}) \cdot \mathbf{n} dS + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \mathbf{n} dS \\ &= \iiint_{\Omega} \mathbf{H} \cdot \nabla^2 \mathbf{F} dv + \iiint_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{H})(\nabla \cdot \mathbf{F}) dv + \iiint_{\Omega} (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) dv \end{aligned} \quad (5.9)$$

となる。自由空間で  $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$  と式 (5.1) から、

$$\begin{aligned} & \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F}) \cdot \mathbf{n} dS + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \mathbf{n} dS \\ &= \iiint_{\Omega} \mathbf{H} \cdot \nabla^2 \mathbf{F} dv + \iiint_{\Omega} \gamma \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) dv \end{aligned} \quad (5.10)$$

となる。ここで、 $\mathbf{F}$  を

$$\mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad f = \frac{1}{4\pi|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|}$$

ととると、

$$H_x = - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F}_x) \cdot \mathbf{n} dS - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F}_x) \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_{\Omega} \gamma \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}_x) dv \quad (5.11)$$

となり、 $x$  方向の磁場を再構成する式を得る。同様に、 $\mathbf{F}$  を

$$\mathbf{F}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ f \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{pmatrix}$$

とすると

$$H_y = - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F}_y) \cdot \mathbf{n} dS - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F}_y) \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_{\Omega} \gamma \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}_y) dv \quad (5.12)$$

$$H_z = - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H}(\nabla \cdot \mathbf{F}_z) \cdot \mathbf{n} dS - \iint_{\partial\Omega} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{F}_z) \cdot \mathbf{n} dS + \iiint_{\Omega} \gamma \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}_z) dv \quad (5.13)$$

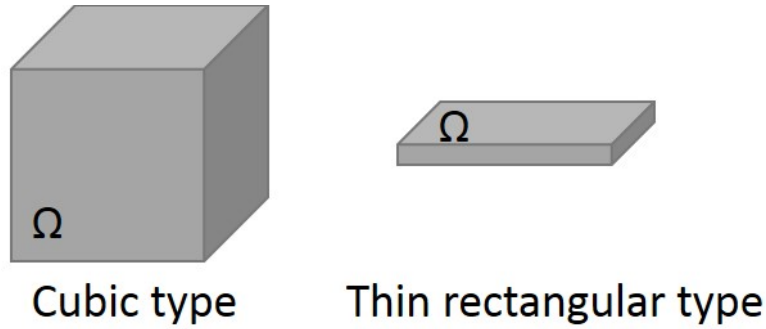
を得る。領域  $\Omega$  内で電場  $\mathbf{E}$  が観測できれば、式 (5.11) から式 (5.13) の第 3 項は計算することができる。式 (5.11) から式 (5.13) の第 1, 2 項は、十分小さいとして無視する。または、第 3 項を無視して求めた  $\mathbf{H}$  を初期解として式 (5.11) から式 (5.13) に再度代入して再帰処理を繰り返すことにより近似解を得られる。本章では、第 1, 2 項を無視して、電場から磁場を求め、観測した電場と再構成された磁場から Poynting ベクトルを求める。

### 5.3 シミュレーション

センサユニットの構成を検討するためにシミュレーションを実施した。図 5.2 に示すような立方体と偏平な直方体領域を積分領域  $\Omega$  として、再構成の精度を比較した。

本章では、体積積分の項が支配的であるとして、磁場の要素を次式で近似した。

$$H_k(\mathbf{r}'_i) \approx i\omega\varepsilon \iiint_{\Omega} \mathbf{E}(\mathbf{r}_j) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}_k) dv, \quad k = x, y, z \quad (5.14)$$

図 5.2: 積分領域  $\Omega$  とする 2 種類の領域

さらに、ダイポールアンテナを用いて電場を観測することを想定して、積分を離散化して次式を用いてシミュレーションした。

$$H_k(\mathbf{r}'_i) \approx i\omega\varepsilon \sum_j \mathbf{E}(\mathbf{r}_j) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}_k(\mathbf{r}'_i, \mathbf{r}_j)), \quad k = x, y, z \quad (5.15)$$

図 5.3a, 図 5.3b に示す領域内の端点の位置で 3 軸の電場を観測し、磁場を再構成する。



図 5.3: それぞれの条件での観測点の位置：図中の立方体の位置で電場ベクトルを観測する

### 5.3.1 シミュレーション条件

電磁波源は、原点に配置されているとした。本章では、電磁波源の傾きは、図 5.4 に示すように  $x$  軸からの角度を方位角  $\phi$ ,  $z$  軸からの角度を天頂角  $\psi$  とする。本節のシミュレーションでは、方位角  $\phi = 45^\circ$ , 天頂角  $\psi = 45^\circ$  とした。 $\Omega$  の一辺の長さは 100 mm とした。 $\Omega$  の一辺上に配置するセンサの数は 3, 5, 11, 21 の 4 条件で比較した。つまり、直方体型の領域の場合、センサの数は、 $3^3, 5^3, 11^3, 21^3$  であり、扁平な直方体の領域の場合、 $3^2, 5^2, 11^2, 21^2$  となる。

再構成された Poynting ベクトルを  $xy$  平面に射影したときの偏角の誤差を評価した。 $(-5 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m}, -5 \text{ m} \leq y \leq 5 \text{ m}, z = 1 \text{ m})$  の 120 地点で評価した。

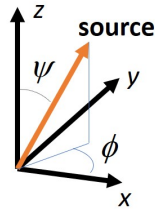


図 5.4: 電磁波源の姿勢

### 5.3.2 シミュレーション結果

図 5.5 にシミュレーション結果を示す。扁平な直方体型のセンサは、1 辺あたりのセンサの個数を変化させてもほぼ一定だった一方で、立方体型のセンサは、センサの個数を増やすと誤差が小さくなる。扁平な直方体型のセンサの誤差は、立方体型のセンサに比べて大きいものの、誤差は  $10^\circ$  以下である。計測点はなるべく少ないほうが良い。この 9 点の観測点で再構成した Poynting ベクトルを図 5.6 に示す。9 点で観測された電場から、式 (5.15) を用いて磁場を再構成したとしても、Poynting ベクトルが得られることがわかる。そこで、次節以降では、扁平な直方体領域を仮定して、領域内の 9 点で電場を観測することを考える。

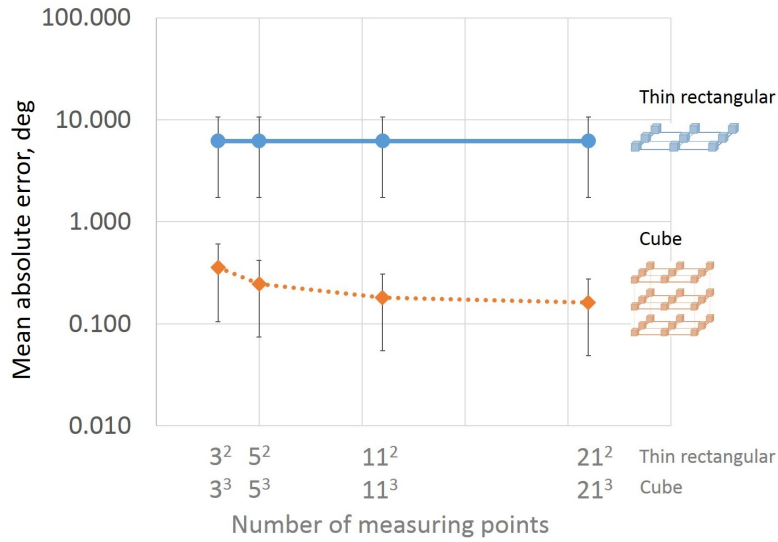


図 5.5: シミュレーション結果

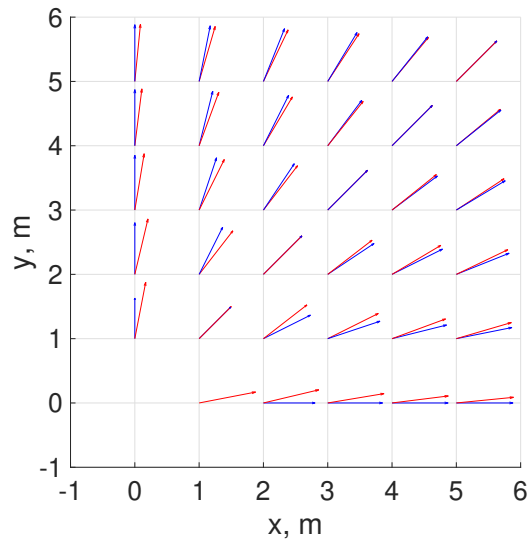


図 5.6: Poynting ベクトルの再構成結果 ( $z = 1$  m)

## 5.4 実験

### 5.4.1 実験装置

領域  $\Omega$  の一辺の長さは 100 mm とし、100 mm 四方の正方形の領域に、図 5.7 に示すように 9 点の観測点を設定した。この 9 点の観測点で 3 軸方向の電場  $E_x, E_y, E_z$  を観測した。電場の観測には、ダイポールアンテナを使用し、その長さは 100 mm であった。図 5.8 に実験装置の構成を示す。図 5.9 に実験装置の外観を示す。オシレータからは、正弦波を送信用のアンテナに入力するとともに、IQ 検波器に入力した。受信アンテナで観測された信号は、IQ 検波器に入力された後、直交検波によって IQ 信号に変換され、オシロスコープで記録された。オシレータの周波数は、920 MHz とした。

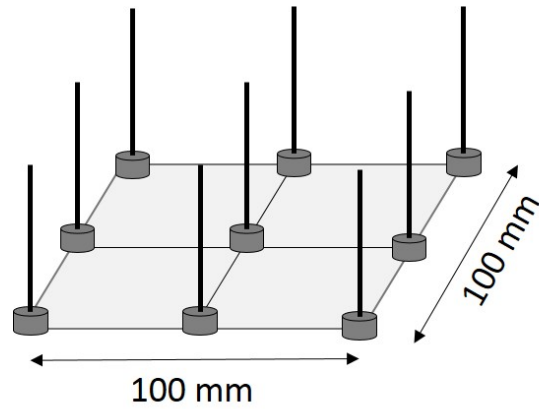


図 5.7: 受信アンテナの配置 ( $E_z$  の計測の場合)

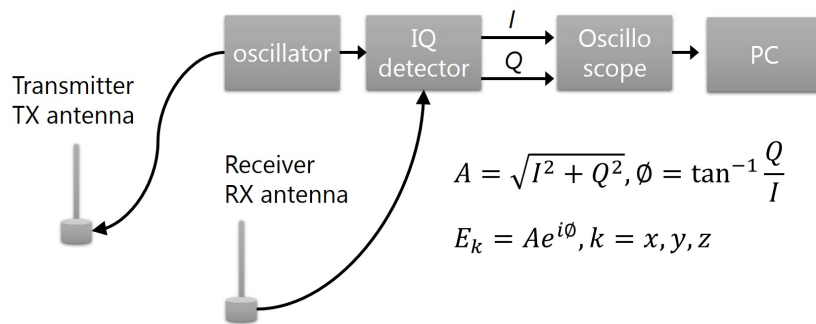


図 5.8: 実験装置の接続

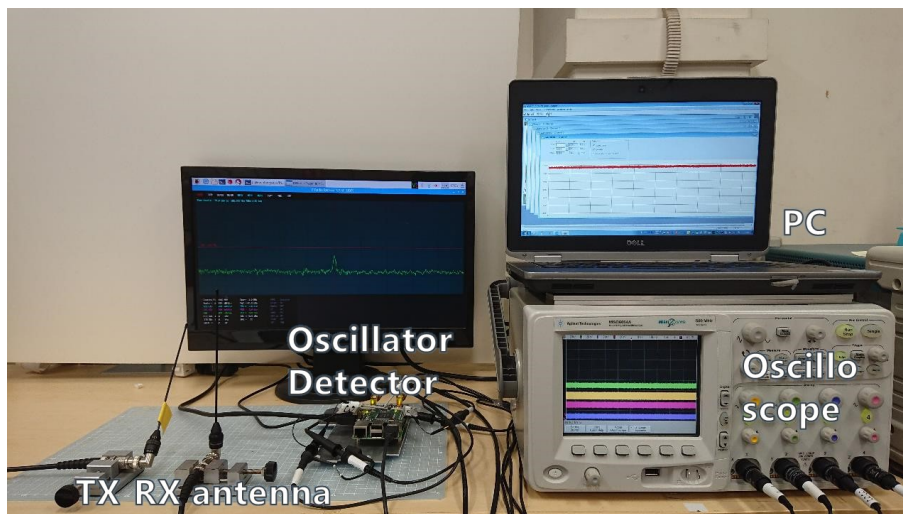


図 5.9: 実験装置

## 5.4.2 実験条件

電磁波源は、原点に配置されているとした。電磁波の姿勢は、天頂角  $\psi = 45^\circ$ 、方位角  $\phi = 90^\circ$  とした。  $(x, y) = (2 \cos \theta, 2 \sin \theta)$ ,  $\theta = 0, 30, 60, 90^\circ$  の4点で誤差を評価した。

## 5.4.3 実験結果

図 5.10 に、実験結果を示す。  $\theta = 60^\circ$  の点を除いて、精度良く推定された。

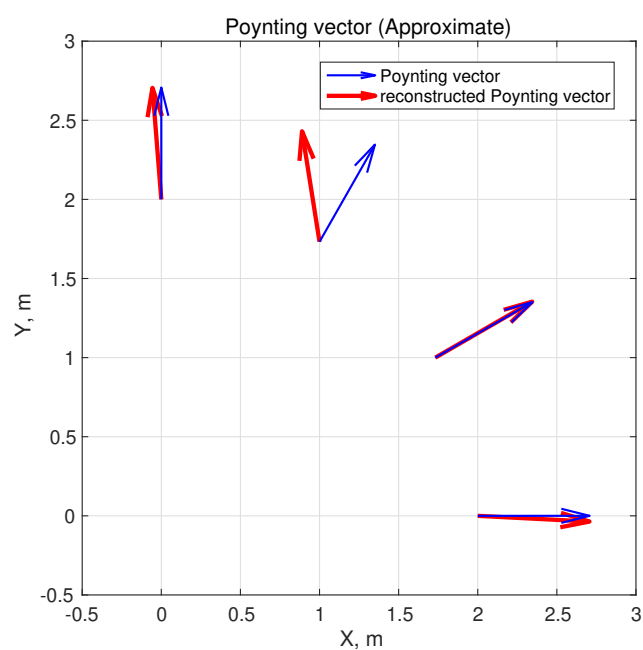


図 5.10: 実験結果

## 5.5 考察

図 5.10 より，実機を用いた実験でも，電場ベクトルから磁場を再構成し，Poynting ベクトルを得られることが明らかになった． $\theta = 60^\circ$  での誤差が大きい要因は，ノイズによるものと思われる．本章での実験は，電波暗室ではなく，一般的な実験室で実施されたため，外部から到来する 920 MHz 帯の電波の影響を受けやすい環境であった．誤差は大きいものの，誤差の大きさは  $90^\circ$  を超えなかったため，現在のシステムの精度であっても，電波源とは異なる方向に誤って探索を進めることにはならないと思われる．

ここで，誤差の傾向を考察するために，数値シミュレーションを追加で実施した．シミュレーションの条件は以下の通りである．電磁波源は，原点に配置した．電磁場源の姿勢は，方位角  $\phi = 90^\circ$ ， $\psi$  は  $0$  から  $90^\circ$  まで変化させた． $(-5 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m}, -5 \text{ m} \leq y \leq 5 \text{ m}, z = 1 \text{ m})$  の 120 の地点で Poynting ベクトルを推定し，絶対誤差の平均値を求めた．シミュレーション結果を図 5.11 に示す． $\psi = 45^\circ$  で誤差が最大になることがわかった．実際にダイポールアンテナを設置する際は，鉛直方向 ( $\psi = 0^\circ$ )，水平方向 ( $\psi = 90^\circ$ ) に固定することが多いであろうから，実用上問題ないと思われる．

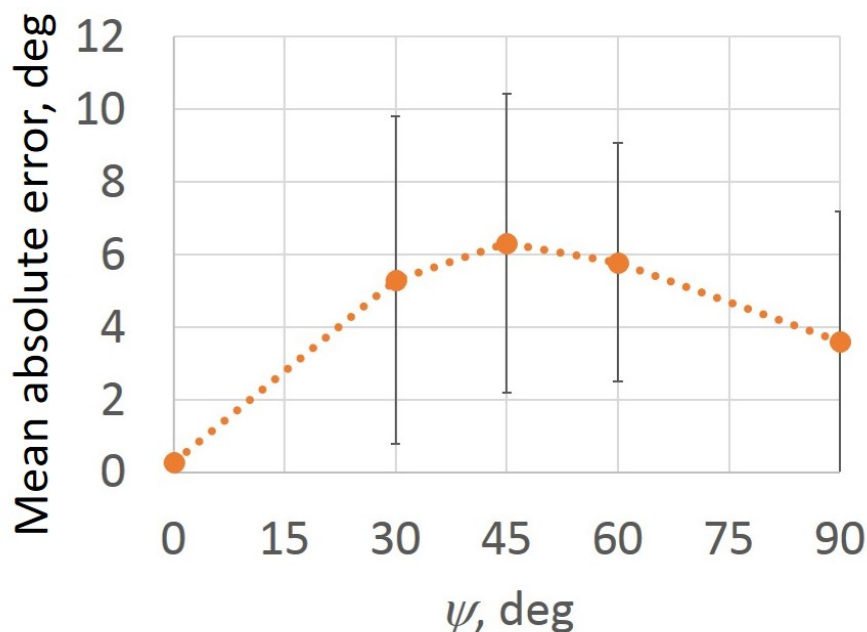


図 5.11: シミュレーション結果

## 5.6 結言

本章では、近年普及の進む 920 MHz 帯の電波源に着目し、電波源探査法を提案した。電磁波のエネルギーの流れを表す Poynting ベクトルを遡ることによって、電波源の位置を探査する。Poynting ベクトルは、電場ベクトルと磁場ベクトルの両方を計測する必要があるが、提案手法では、電場ベクトルから磁場ベクトルを再構成することによって、電場ベクトルのみを計測するだけで、Poynting ベクトルを得られる。

まず、数値シミュレーションによって、積分領域の形状が Poynting ベクトルの推定に与える影響を検証した。偏平な領域と立方体型の領域を比較したところ、立方体型の形状のほうが誤差が小さいという結果が得られた。しかしながら、偏平な領域であっても、得られる Poynting ベクトルの誤差は  $10^\circ$  以内であった。偏平な直方体の領域内で、9 点の観測点を設定し、それぞれの観測点で 3 軸の電場を観測し、Poynting ベクトルを推定したところ、電場ベクトルのみから Poynting ベクトルを得られた。

本章では、実機を用いた実験により、提案手法の有効性を検証した。100 mm 四方の正方形の領域内に 9 点の観測点を設定し、これをセンサユニットとみなし、3 軸方向の電場ベクトルを観測した。観測された電場ベクトルから磁場を提案手法に基づいて再構成し、Poynting ベクトルを求めたところ、電波源から 2000 mm 離れた位置において、電波源とは逆向きのベクトルを正しく推定することができた。今度、920 MHz 帯の通信モジュールを搭載した環境センサなどが普及したとき、その位置を電場のみから推定することが可能になるとと思われる。



## 第6章

# 結論

本論文では、双極子回転型電磁場源の3次元定位の基礎理論の提案と実験による検証、基礎理論を拡張したセンサの自己位置推定について述べた。

倉庫や工場などの屋内空間での正確な位置情報の把握は、倉庫や工場などでの移動ロボットの制御や雪崩や瓦礫に埋もれた人の探索など、多岐にわたる。本論文では、「センサを用いたマーカ位置の推定」、「マーカを用いたセンサ位置の推定」の両方の位置推定を対象にした。従来の手法では、どちらの場合においても、オクルージョンやマルチパスの影響を回避しながら、指向性のない探索を実現した例はなかった。本論文では、磁場を用いることにより周辺環境に左右されにくい頑健性を確保しながら、磁気双極子モーメントを回転させることにより、探索範囲を局所化させずに広範囲を探索する手法を提案した。

第2章では、双極子回転型電磁波源の定位方法について、理論とシミュレーションによる検証を述べた。双極子回転型電磁場源の発する磁場のフーリエ成分を用いて、センサを原点に配置したときの電磁場源の方位角、天頂角、距離が求められることを述べた。双極子回転型電磁場源の初期位相が未知であっても定位可能である。また、提案手法はオクルージョンやマルチパスなどの周辺環境の影響を受けにくく、指向性もない。本論文では、観測される磁場の正または負の周波数成分に基づいて、原点に配置したセンサからマーカへの方位角、天頂角、距離を推定する手法を提案した。また、誤差傾向を数値シミュレーションによって明らかにした。 $B_x + iB_y$ の正負の周波数成分に基づく手法は、少ない観測量で方位角を求められるという利点がある、一方で、定位範囲が $0 \leq \phi < \pi$ に限定されるという課題があった。 $B_x + iB_y$ の負の周波数成分・正の周波数成分に基づく手法は、 $0 \leq \phi < 2\pi$ の範囲で定位可能であった。本論文で提案した水平面内で回転する磁気双極子をマーカとして用いる手法を基礎として、今後、鉛直方向成分を考慮して3次元的に磁気モーメントが変化するマーカを用いる手法に発展させることを期待される。

第3章では、第2章で述べた定位方法の有効性を実機を用いて検証した。まず、静磁石をモータで回転させる双極子回転型電磁波源とMIセンサを用いた高感度なセンサユニットの製作について述べた。次に、 $2000\text{ mm} \times 4000\text{ mm}$ の範囲において電磁場源を定位し、誤差 $100\text{ mm}$ 以内で推定可能であることを述べた。さらに、センサがアルミ板のような非磁性の物体に囲まれていたとしても、精度が悪化しないことを実験的に検証した。これは、比較的周波

数の高い電波を用いた手法に比べて、大きな利点となり、実環境での有効性の高さを示すものであった。さらに、部屋の内部に置かれたセンサを用いて、部屋の外に置かれたマーカの位置を推定したところ、およそその位置を推定することができた。また、双極子回転型電磁場源は、直交するコイルに位相の異なる正弦波を入力することでも実現できる。電磁式双極子回転型電磁場源として 457 kHz の交流磁場を発生するマーカを提案し、バーコイルアンテナで構成されるセンサを用いた位置推定についても検討した。457 kHz 程度の比較的周波数の低い電磁波は、人体や水による電波強度の減衰が小さいことから、雪崩が発生したときに埋没した人を探索する雪崩ビーコンなどの発信機に利用されており、実験結果は雪崩埋没者探索への提案手法の応用の可能性を示唆するものだった。磁気を用いた定位システムの普及のためには、環境への磁気マーカの設置が課題となる。提案手法によってマーカとセンサを同期させることなく位置推定可能になったことで、既存の回転体を磁気マーカとして活用でき、磁気を用いた定位システムの普及が期待される。

第4章では、センサの自己位置推定のための補正法を提案した。ドローンの制御や屋内ナビゲーション、瓦礫埋没者の探索など、センサ自己位置の推定は応用範囲が広い。こうした状況では、センサとして用いられるスマートフォンなど傾いて保持され、センサ座標系と世界座標系が一致しないことが考えられる。そこで、第4章では第2章で述べた磁場源定位法を拡張し、センサ座標系が世界座標系と一致しない場合に、傾いた座標系で計測された磁場を補正することで、センサの自己位置推定を実現した。本論文では、2つの補正手法を提案し、それぞれのメリットとデメリットを明らかにしながら、実機を用いた実験によって有効性を検証した。瓦礫埋没者探索を想定した複数のスマートフォンの同時位置推定、屋内ナビゲーションを想定した複数の電磁場源を用いたスマートフォンの自己位置推定を実験により検証した。

第5章では、電波源の探索について述べた。Poynting ベクトルをもとに 920 MHz の発信機の位置を探索する方法を提案した。Poynting ベクトルは、電磁波のエネルギーの流れを表すベクトルであり、この Poynting ベクトルを観測しながら、ベクトルの流れを遡るように移動することで、最終的に電磁波源の位置に到達する手法を提案した。Poynting ベクトルは、電場と磁場の外積で表現されるが、両者を同時に計測する場合、電場を計測するダイポールアンテナと磁場を計測するループアンテナの2種類のアンテナが必要になり、センサユニットが複雑で大きくなるという課題があった。そこで、本論文では、電場ベクトルから磁場ベクトルを推定することで、電場ベクトルを観測するだけで Poynting ベクトルを求める方法を提案した。シミュレーションの結果、電場ベクトルのみから Poynting ベクトルを再構成することが可能であった。また、実機を用いて電場ベクトルを観測し、Poynting ベクトルを求めたところ、電波源とは逆向きのベクトルを正しく推定することができた。将来的には、第5章で述べた計測可能な範囲の広い高周波電波源探索と第2章-第4章で述べた精度の高い低周波電磁場源定位を組み合わせることにより、遠距離から近距離まで連続して高精度に探索可能な定位システムを実現できるであろう。

以上、本論文では、第一に、オクルージョンに強く、探索精度に指向性がなく、同期の必要のない定位を実現するための双極子回転型電磁場源を用いた3次元定位の基礎理論を第2章で提案した。これは、センサから見たマーカ位置の推定と、マーカから見たセンサ位置の推定

の両方の推定の基礎となる理論となった。また、第3章で数 m 四方を定位可能な双極子回転型電磁場源の実現方法についても検討し、実機を用いた検証により、基礎理論の有効性を評価した。

第二に、第4章で3次元定位法の基礎理論をスマートフォンなどのセンサの自己位置推定に拡張するための姿勢補正法を提案した。センサの自己位置は、瓦礫埋没者探索や屋内ナビゲーションの実現に必須である。こうした応用では、センサ（スマートフォン）の姿勢が傾いて保持されるため、傾いた座標系で観測された磁場を補正する必要がある。応用に合わせた補正法を提案するとともに、実機を用いた検証により提案する補正法の有効性を評価した。

本論文では、双極子回転型電磁場源を用いることで、環境中の金属などによるマルチパスや人体などによる減衰、什器による遮蔽の影響を受けにくい定位を実現した。現在、工場内などの限られた空間でしか稼働していない移動ロボットが、将来、オフィスや家の中で稼働することになったとき、複雑な周辺環境に対応した定位方法はロボットの安全な制御に貢献できるであろう。また本論文では、双極子回転型電磁場源を用いて、環境中のセンサを用いたマーカ位置の推定と、環境中のマーカを用いたセンサの自己位置の推定の両方を実現した。これにより、雪崩埋没者の探索のようにあらかじめ携帯させたおいたマーカの位置を推定することも、瓦礫埋没者の探索のようにスマートフォン（センサ）の位置を推定することも可能になった。第1章で述べた買い物の例で言えば、ショッピングモール内にマーカを配置しておけば、スマートフォンを使って自己位置を推定して、店舗までナビゲーションすることが可能になり、店舗内でも棚にマーカを取り付けておけば、目的の商品が置かれた棚に向かって探索することが可能になる。将来、自宅からショッピングモールの店舗の棚に置かれた商品まで、途切れることなくナビゲーションされるようになる可能性がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方のお世話になりました。

指導教員である奈良高明教授には、常に温かいご指導をいただきました。学問を究めることの難しさ、その先にある面白さを教えていただきました。充実した実験環境と知識を吸収する機会を与えていただいたことに感謝申し上げます。実験が行き詰まれば一緒に悩み、成功すれば一緒に喜んでくださる先生のもとであったからこそ、モチベーションを保ちながら研究を進めることができました。深く感謝いたします。

本論文審査をしていただいた、大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻 篠田裕之教授、稲見昌彦教授、池内真志講師、大学院工学系研究科電気系工学専攻 関野正樹准教授に感謝いたします。

長谷川圭介講師には、様々な場面で助言をいただきました。検討会ではいつも建設的で前向きなコメントをいただき、実験を改善することができました。ありがとうございます。

宮廻裕樹助教には、審査の発表に向けて助言をいただきました。ありがとうございます。

システム第三研究室（奈良・長谷川研究室）の皆様には、大変お世話になりました。特に、中村晶洋さん、中根悠さんとは、同じ磁場源探査を研究する中で実験ノウハウを共有しながら研究を進められました。ありがとうございます。

また、日本電信電話株式会社の皆様には、社会人博士として研究することに理解をいただきました。仕事をしながら安心して研究をすることができました。ありがとうございます。

最後に、いつも見守ってくれていた家族に感謝します。

## 参考文献

- [1] Michael M. Walker, Todd E. Dennis, and Joseph L. Kirschvink. The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 12, No. 6, pp. 735–744, 12 2002.
- [2] Carla R. Medeiros, Jorge R. Costa, and Carlos A. Fernandes. RFID smart shelf with confined detection volume at UHF. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 7, pp. 773–776, 2008.
- [3] Y. Nishida, H. Aizawa, T. Hori, N.H. Hoffman, T. Kanade, and M. Kakikura. Ultra-sonic tagging system for observing human activity. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, Vol. 1, pp. 785–791. IEEE.
- [4] Heba Abdelnasser, Reham Mohamed, Ahmed Elgohary, Moustafa Farid Alzantot, He Wang, Souvik Sen, Romit Roy Choudhury, and Moustafa Youssef. Semantic-SLAM: Using Environment Landmarks for Unsupervised Indoor Localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 15, No. 7, pp. 1770–1782, 7 2016.
- [5] Rui Zhang, Fabian Höflinger, and Leonhard Reindl. TDOA-Based localization using interacting multiple model estimator and ultrasonic transmitter/receiver. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, pp. 2205–2214, 2013.
- [6] P. Piniés and J.D. Tardos. Fast localization of avalanche victims using sum of Gaussians. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pp. 3989–3994. IEEE, 2006.
- [7] Takashi Tsubouchi. Introduction to Simultaneous Localization and Mapping. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31, No. 3, pp. 367–374, 6 2019.
- [8] Marius Beul, David Droeschel, Matthias Nieuwenhuisen, Jan Quenzel, Sebastian Houben, and Sven Behnke. Fast Autonomous Flight in Warehouses for Inventory Applications. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 3121–3128, 10 2018.
- [9] Wael Elloumi, Abdelhakim Latoui, Raphael Canals, Aladine Chetouani, and Sylvie Treuillet. Indoor Pedestrian Localization With a Smartphone: A Comparison of Inertial and Vision-Based Methods. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 13, pp.

- 5376–5388, 7 2016.
- [10] Seo-Yeon Hwang and Jae-Bok Song. Monocular Vision-Based SLAM in Indoor Environment Using Corner, Lamp, and Door Features From Upward-Looking Camera. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4804–4812, 10 2011.
- [11] Hyukdoo Choi, Kwang Woong Yang, and Euntai Kim. Simultaneous global localization and mapping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 1160–1170, 2014.
- [12] Haoyao Chen, Dong Sun, Jie Yang, and Jian Chen. Localization for multirobot formations in indoor environment. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 561–574, 8 2010.
- [13] Chi Zhang and Xinyu Zhang. Visible Light Localization Using Conventional Light Fixtures and Smartphones. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 18, No. 12, pp. 2968–2983, 12 2019.
- [14] Biel Piero E.Alvarado Vasquez, Ruben Gonzalez, Fernando Matia, and Paloma De La Puente. Sensor Fusion for Tour-Guide Robot Localization. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 78947–78964, 2018.
- [15] 佐藤源之. 地下電磁計測による社会貢献. 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J103-C, No. 3, pp. 186–193, 3 2020.
- [16] Alanson P Sample, Craig Macomber, Liang-ting Jiang, and Joshua R Smith. Optical Localization of Passive UHF RFID Tags with Integrated LEDs. pp. 116–123, 2012.
- [17] John Krumm, Steve Harris, Brian Meyers, Barry Brumitt, Michael Hale, and Steve Shafer. Multi-Camera Multi-Person Tracking for EasyLiving 1 . Practical Problems of Tracking. *Group*, pp. 1–8, 2000.
- [18] Anil Kumar and Pinhas Ben-Tzvi. Spatial Object Tracking System Based on Linear Optical Sensor Arrays. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 22, pp. 7933–7940, 2016.
- [19] Jahyoung Koo and Hojung Cha. Localizing WiFi Access Points Using Signal Strength. *IEEE Communications Letters*, Vol. 15, No. 2, pp. 187–189, 2 2011.
- [20] Chen Feng, Wain Sy Anthea Au, Shahrokh Valaee, and Zhenhui Tan. Received-Signal-Strength-Based Indoor Positioning Using Compressive Sensing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 11, No. 12, pp. 1983–1993, 12 2012.
- [21] 浦野健太, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫. 配布型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 1, pp. 58 – 75, 2019.
- [22] Guoliang Shao, Yuchao Tang, Lin Tang, Qiqi Dai, and Yong-Xin Guo. A Novel Passive Magnetic Localization Wearable System for Wireless Capsule Endoscopy. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, No. 9, pp. 1–1, 5 2019.
- [23] Yutaro Osaki, Shuichiro Hashi, Shin Yabukami, Hiroyasu Kanetaka, and Kazushi Ishiyama. Wireless Magnetic Position-Detection System With Four Excitation Coils. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 14, pp. 4412–4419, 7 2017.

- [24] T. Nara, Y. Takanashi, and M. Mizuide. A sensor measuring the Fourier coefficients of the magnetic flux density for pipe crack detection using the magnetic flux leakage method. *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, No. 7, p. 07E305, 2011.
- [25] Takaaki NARA, Yuushi TAKANASHI, and Hirotoishi WATANABE. Localization of a Radio-Frequency Identification Tag from Measurements of the Fourier Coefficients of Its Magnetic Flux Density. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 5, No. 4, pp. 226–232, 2012.
- [26] Kazunori ODANI, Yusuke HIGUCHI, Masahiro ITO, Takaaki NARA, and Shigeru ANDO. Position and Posture Estimation of a Smartphone by Linear Weighted Integral Sensors. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 51, No. 10, pp. 668–677, 2015.
- [27] Akihiro Chiba and Takaaki NARA. Two-dimensional Localization of an RFID Tag by Using a Weighted Integral Sensor on a Square Boundary. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 48, No. 12, pp. 822–829, 2012.
- [28] Akihiro Chiba and Takaaki Nara. 2-D Localization of Radio Frequency Identification Tags From Measurements of the Weighted Integrals of the Magnetic Flux Density. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 9, pp. 1–8, 9 2014.
- [29] Takaaki Nara, Hirotoishi Watanabe, and Wataru Ito. Properties of the Linear Equations Derived From Euler’s Equation and Its Application to Magnetic Dipole Localization. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 11, pp. 4444–4447, 11 2012.
- [30] Nabil M. Drawil, Haitham M. Amar, and Otman A. Basir. GPS localization accuracy classification: A context-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 262–273, 2013.
- [31] Xiaoyue Hou and Tughrul Arslan. Monte Carlo localization algorithm for indoor positioning using Bluetooth low energy devices. In *2017 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2017*, pp. 1–6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 6 2018.
- [32] 星尚志, 石塚宏紀, 小林亜令, 南川敦宣. 動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案. *情報処理学会論文誌*, Vol. 60, No. 1, pp. 48–57, 2019.
- [33] Kei Nakatsuma. High Accuracy Position and Orientation Detection in Two-Dimensional Communication Network. *Work*, pp. 2297–2306, 2010.
- [34] Jongdae Jung, Seung Mok Lee, and Hyun Myung. Indoor Mobile Robot Localization and Mapping Based on Ambient Magnetic Fields and Aiding Radio Sources. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 7, pp. 1922–1934, 7 2015.
- [35] Isaku Nagai, Jun Sakai, and Keigo Watanabe. Indoor Self-Localization Using Multiple Magnetic Sensors. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31, No. 2, pp. 203–211, 4 2019.

- [36] Sunhong Park and S. Hashimoto. Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 7, pp. 2366–2373, 7 2009.
- [37] Emidio DiGiampaolo and Francesco Martinelli. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 10, pp. 3961–3970, 10 2012.
- [38] Eugene Paperno, Ichiro Sasada, and E. Leonovich. A new method for magnetic position and orientation tracking. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1938–1940, 7 2001.
- [39] Kosuke Watanabe, Kei Hiroi, Takeshi Kamiyama, Hiroyuki Sano, Masakatsu Tsukamoto, Masaji Katagiri, Daizo Ikeda, Katsuhiko Kaji, and Nobuo Kawaguchi. A Smartphone 3D Positioning Method using a Spinning Magnet Marker. *Journal of Information Processing*, Vol. 27, No. 0, pp. 10–24, 2019.
- [40] Hongbo Liu, Jie Yang, Simon Sidhom, Yan Wang, Yingying Chen, and Fan Ye. Accurate WiFi based localization for smartphones using peer assistance. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 13, No. 10, pp. 2199–2214, 2014.
- [41] Davide Dardari, Pau Closas, and Petar M. Djuric. Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, No. 4, pp. 1263–1278, 4 2015.
- [42] Anton Plotkin, Vladimir Kucher, Yoram Horen, and Eugene Paperno. A New Calibration Procedure for Magnetic Tracking Systems. *Current*, Vol. 44, No. 11, pp. 4525–4528, 2008.
- [43] 角哲也, 石田裕哉, 佐竹宣憲. アクティブタグ技術を応用した砂礫移動に関するトレーサ調査手法の開発. *水工学論文集*, Vol. 54, pp. 1123–1128, 2 2010.
- [44] Keunwoo Park, Daehwa Kim, Seongkook Heo, and Geehyuk Lee. MagTouch : Robust Finger Identification for a Smartwatch Using a Magnet Ring and a Built-in Magnetometer. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2020.
- [45] Shuichiro Hashi, Yuuki Tokunaga, Shin Yabukami, Masaharu Toyoda, Kazushi Ishiyama, Yasuo Okazaki, and Ken Ichi Arai. Development of Real-Time and Highly Accurate Wireless Motion Capture System Utilizing Soft Magnetic Core. *October*, Vol. 41, No. 10, pp. 4191–4193, 2005.
- [46] S Yabukami, H Kanetaka, S Hashi, K I Arai, and T Sato. Jaw Tracking System Using Resonated Wireless Markers. *October*, Vol. 45, No. 10, pp. 4880–4883, 2009.
- [47] S Hashi, S Yabukami, H Kanetaka, K Ishiyama, and K I Arai. Numerical Study on the Improvement of Detection Accuracy for a Wireless Motion Capture System. *Analysis*, Vol. 45, No. 6, pp. 2736–2739, 2009.
- [48] Anton Plotkin and Eugene Paperno. 3-D magnetic tracking of a single subminiature



- coil with a large 2-D array of uniaxial transmitters. *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 39, No. 5, p. 3295–3297, 9 2003.
- [49] Wan'an Yang, Chao Hu, M.Q.-H. Meng, Shuang Song, and Houde Dai. A Six-Dimensional Magnetic Localization Algorithm for a Rectangular Magnet Objective Based on a Particle Swarm Optimizer. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 8, pp. 3092–3099, 8 2009.
- [50] 奈良高明, 新家健太. 姿勢計測に基づくビーコン磁場の零点位置制御. 第 33 回センシングフォーラム予稿集, p. 208, 2016.
- [51] Pedro José Bernalte Sánchez, Mayorkinos Papaefias, and Fausto Pedro García Márquez. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Vol. 23, No. 2, pp. 105–114, 4 2020.
- [52] Clemens Arth, Christian Pirchheim, Jonathan Ventura, Dieter Schmalstieg, and Vincent Lepetit. Instant Outdoor Localization and SLAM Initialization from 2.5D Maps. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1309–1318, 11 2015.
- [53] Naohiko Kohtake and Shusuke Morimoto. Indoor and Outdoor Seamless Positioning using Indoor Messaging System and GPS. *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, No. September, pp. 21–23, 2011.
- [54] Yongliang Sun, Weixiao Meng, Cheng Li, Nan Zhao, Kanglian Zhao, and Naitong Zhang. Human localization using multi-source heterogeneous data in indoor environments. *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 812–822, 2017.
- [55] Min-Gyu Kim, Yeh-Sun Hong, and Eun-Joo Lim. Position and orientation detection of capsule endoscopes in spiral motion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 1, pp. 31–37, 2 2010.
- [56] Islam S. M. Khalil, Alaa Adel, Dalia Mahdy, Mina M. Micheal, Mohanad Mansour, Nabila Hamdi, and Sarthak Misra. Magnetic localization and control of helical robots for clearing superficial blood clots. *APL Bioengineering*, Vol. 3, No. 2, p. 026104, 6 2019.
- [57] 木村峻介, 松本卓人, 矢澤櫻子, 星野准一, 李昇姫, 浜中雅俊. 屋内位置検出を利用した子ども見守りサービスシステム. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 1, pp. 856–868, 2015.
- [58] 磯田達也, 井上創造, 花沢明俊, 野原康伸, 白水麻子, 杉山康彦, 平田真理, 町田京子, 中島直樹. 携帯センサと近接センサを用いた看護師業務分析. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 10, pp. 2197–2209, 2016.
- [59] 千葉昭宏, 奈良高明. 磁束密度のフーリエ成分に基づく回転磁気マーカの位置推定. 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 4, pp. 968–977, 2020.
- [60] A. Chiba and T. Nara. Three-dimensional localization of a rotating magnetic dipole from the Fourier integrals of its magnetic flux density with acceleration data. *AIP*

- Advances*, Vol. 10, No. 2, p. 025020, 2 2020.
- [61] MathWorks. MATLAB Mobile (<https://www.mathworks.com/products/matlab-mobile.html>).
- [62] Aichi Micro Intelligent Corporation.
- [63] Takaaki Nara, Hirofumi Takeda, and Shigeru Ando. Effect of ferromagnetic objects in rubble on rescue beacon searches. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, No. 1-2, pp. 61–66, 12 2016.
- [64] Pascal Haegeli, Markus Falk, Hermann Brugger, Hans-Jürg Etter, and Jeff Boyd. Comparison of avalanche survival patterns in Canada and Switzerland. *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne*, Vol. 183, No. 7, pp. 789–95, 4 2011.
- [65] Mark Pedley. Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. *Freescale Semiconductor Application Note*, p. AN3461, 2013.
- [66] Hiroyuki Takahashi, Takanori Gojou, Yoshiyuki Yakabe, Hiroshi Hashizume, and Takamitsu Shimada. M2M Smart Network Solutions utilizing 920MHz Wireless Modules. *OKI Technical Review October*, Vol. 81, No. 224, pp. 1–4, 2014.
- [67] 橋爪洋. 無線センサーネットワーク技術を利用した 暴走車両侵入通知システム. *OKI テクニカルレビュー*, Vol. 82, No. 226, pp. 16–19, 2015.
- [68] 吉川工業株式会社. RFID デバイス | ICT 分野 / RFID 製品・ソリューション | 製品・技術 | 吉川工業.
- [69] 博坂本, 裕之安田, Thong HUYNH, 佳織黒田, 洋三荘司, 幹雄長谷川. 機械学習を用いた Wi-SUN による位置推定手法の検討 (複雑コミュニケーションサイエンス) – (移動通信ワークショップ). 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報, Vol. 115, No. 475, pp. 63–66, 2016.
- [70] Sheng Huang, Oon Peen Gan, and Zi Qin Hwang. Passive UHF Far-field RFID Based Localization in Smart Rack. pp. 5026–5031, 2015.

## 付録 A

# $IQ$ 成分に基づく定位法

角周波数  $\omega$  のときの磁束密度の 1 次のフーリエ cos 係数とフーリエ sin 係数を

$$I_k = \int_0^{NT} B_k \cos \omega t dt, \quad Q_k = \int_0^{NT} B_k \sin \omega t dt \quad (\text{A.1})$$

とおく. ここで,  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  で,  $N$  は整数,  $k = x, y, z$  である. このとき, 式 (2.2), 式 (2.3) から,  $\theta_0$  を消去することができ,

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \frac{(I_x + Q_y)(I_y + Q_x) + (I_y - Q_x)(I_x - Q_y)}{(I_x + Q_y)(I_x - Q_y) - (I_y + Q_x)(I_y - Q_x)} \quad (\text{A.2})$$

が得られる. すなわち, 方位角  $\phi$  を  $B_x$  と  $B_y$  の回転周波数におけるフーリエ成分で表すことができる. 同様にして, 天頂角  $\psi$  についても,  $I_k, Q_k$  を用いて

$$\psi = \arctan \sqrt{\frac{(I_x - Q_y)^2 + (Q_x + I_y)^2}{I_z^2 + Q_z^2}} \quad (\text{A.3})$$

と表すことができる.

## 付録 B

# 双極子モーメントの振幅を変化させる方法

第2章では、磁気双極子モーメントの振幅は一定であると仮定していた。機械式のマーカの場合、双極子モーメントの振幅を制御することは困難であるが、電磁式のマーカの場合、コイルに流す電流を制御することで、比較的容易に双極子モーメントの振幅を制御することができる。本節では、電磁式双極子回転型電磁場源を想定し、回転する双極子モーメントの振幅を時間変化させることで、センサから見たマーカへの方位角を推定する手法を提案する。センサ側での積分の処理をせずに平均値を求めるだけで方位角を推定することが可能になる。これにより、マイクロコンピュータなどの比較的計算能力の低いコンピュータであっても方向推定が可能になる。

### B.1 問題設定

本節では、磁気双極子の磁気双極子モーメントの振幅が時間変化することを考える。磁気双極子モーメント  $\mathbf{p}(t)$  が次式で表されるとする。

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w(t) \cos(\omega t + \theta_0) \\ w(t) \sin(\omega t + \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

### B.2 振幅を変化させることによる定位

$w(t) = p \cos(\omega t + \theta_0)$  とすると、

$$\int_0^T B_x(r, \phi, t) |_{w(t)=p \cos(\omega t + \theta_0)} dt = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{p \frac{T}{2} \frac{1+3 \cos 2\phi}{2}}{r^3} \right) \quad (\text{B.2})$$

$$\int_0^T B_y(r, \phi, t) |_{w(t)=p \cos(\omega t + \theta_0)} dt = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{p \frac{T}{2} \frac{3 \sin 2\phi}{2}}{r^3} \right) \quad (\text{B.3})$$

となる。同様にして、 $w(t) = p \sin(\omega t + \theta_0)$  とすると、

$$\int_0^T B_x(r, \phi, t)|_{w(t)=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{p^2 \frac{3 \sin 2\phi}{2}}{r^3} \right) \quad (\text{B.4})$$

$$\int_0^T B_y(r, \phi, t)|_{w(t)=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{p^2 \frac{1-3 \cos 2\phi}{2}}{r^3} \right) \quad (\text{B.5})$$

となる。

式 (B.2) と式 (B.5) との差、および式 (B.3) と式 (B.4) との和より

$$\frac{\int_0^T B_y(r, \phi, t)|_{w=p \cos(\omega t + \theta_0)} + B_x(r, \phi, t)|_{w=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt}{\int_0^T B_x(r, \phi, t)|_{w=p \cos(\omega t + \theta_0)} - B_y(r, \phi, t)|_{w=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt} = \frac{\sin 2\phi}{\cos 2\phi} \quad (\text{B.6})$$

となり、方位角  $\phi$  に関する方程式を得られる。よって、

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\int_0^T B_y(r, \phi, t)|_{w=p \cos(\omega t + \theta_0)} + B_x(r, \phi, t)|_{w=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt}{\int_0^T B_x(r, \phi, t)|_{w=p \cos(\omega t + \theta_0)} - B_y(r, \phi, t)|_{w=p \sin(\omega t + \theta_0)} dt} \quad (\text{B.7})$$

より、方位角を求めることができる。

### B.3 シミュレーション

ここではマーカ側で振幅変調をかけることにより、方位角を推定する手法の有効性をシミュレーションにより確かめる。

まず、式 (B.7) を離散化し、

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N B_y(r, \phi, t_i)|_{w=p \cos(\omega t_i + \theta_0)} + B_x(r, \phi, t_i)|_{w=p \sin(\omega t_i + \theta_0)}}{\sum_{i=1}^N B_x(r, \phi, t_i)|_{w=p \cos(\omega t_i + \theta_0)} - B_y(r, \phi, t_i)|_{w=p \sin(\omega t_i + \theta_0)}} \quad (\text{B.8})$$

として、 $\phi$  を求めた。今回、 $N = 100$  とした。

観測点からソースに対する方位角  $\phi$  を  $0 \leq \phi \leq 2\pi$  で変化させたとき、観測点において図 B.1 に示すような荷重積分量が得られる。図 B.1 に示した荷重積分量から  $\phi$  を求めた結果を図 B.2 に示す。  $0 \leq \phi \leq \pi$  の範囲で、推定された値と真値が一致している。しかしながら、式 (B.7) の逆三角関数をとった結果が、 $2\phi$  として求まり、 $\pi \leq \phi \leq 2\pi$  の範囲では、 $0 \leq \phi \leq \pi$  と同様の積分量が計測されるため、 $0 \leq \phi \leq \pi$  の範囲と同様の値が推定されている。すべての範囲で正しい象限を判定するためには、別途位相に関する情報を考慮する必要があると考えられる。

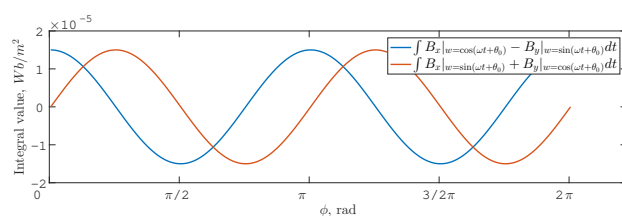


図 B.1:  $\phi$  を変化させたときの,  $B_x, B_y$  の荷重積分量

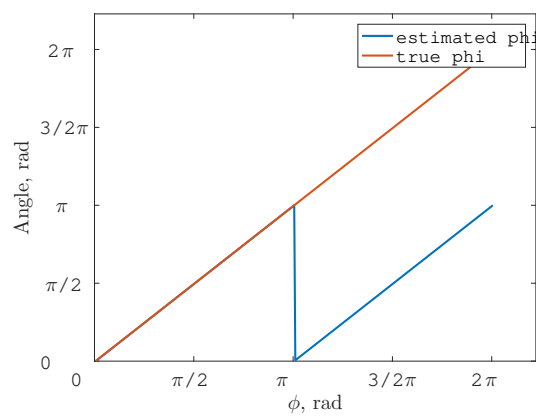


図 B.2: 方位角  $\phi$  の推定値と真値

## 付録 C

## 発表

### 原著論文

- 千葉昭宏, 奈良高明: 磁束密度のフーリエ成分に基づく回転磁気マーカの位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 4, 2020.
- A. Chiba and T. Nara, Three-dimensional localization of a rotating magnetic dipole from the Fourier integrals of its magnetic flux density with acceleration data, AIP Advances, vol. 10, no. 2, 025020, 2020. DOI: 10.1063/1.5130150

### 国際会議

- Akihiro Chiba and Takaaki Nara, Localization of Rotating Magnetic Marker from the Fourier components of its Magnetic Flux Density, Proceedings of MMM2019, pp. 762, Las Vegas, USA, Nov. 8, 2019.
- Akihiro Chiba and Takaaki Nara, Reconstruction of the Poynting vector from the measurements of the electric field for 920 MHz electromagnetic wave sources, pp. 198-199, Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Toyama, Japan, 1-4 August, 2018.
- Akihiro Chiba and Takaaki Nara, Searching an avalanche victim using a transmitter with a rotating magnetic dipole, 2018 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG), CV-10, Singapore, 2018.
- Akihiro Chiba and Takaaki Nara, Reconstruction of the Poynting vector from the measurements of the electric field for sub-GHz electromagnetic wave sources, SICE Annual Conference 2017, ThA08.3, pp. 903-905, Kanazawa, 2017.

### 国内会議

- 千葉昭宏, 奈良高明, 磁束密度のフーリエ係数を用いた回転磁気マーカの三次元位置推定, 第36回計測自動制御学会センシングフォーラム予稿集, pp. 243-247, 慶應大学矢上キャンパス (神奈川), 2019.[2019年度センシングフォーラム研究奨励賞受賞]

90 付録 C 発表

- 千葉昭宏, 中村晶洋, 奈良高明: 磁気モーメントの制御による磁気双極子探索の効率化, 第 34 回計測自動制御学会センシングフォーラム予稿集, pp. 180-183, 熊本大学 (熊本), 2017.
- 千葉昭宏, 奈良高明: Poynting ベクトルを用いた 920MHz 電磁波源の探索, 第 33 回計測自動制御学会センシングフォーラム予稿集, pp. 345-348, 近畿大学 (和歌山), 2016.

特許

- 特願 2018-032018, 探索システム及び探索方法