令和 6 年度　卒 業 研 究 論 文

主論文

無人航空機の実現を目的としたマイコン間通信の実装と慣性計測装置の利用に関する研究

工学部 電気電子工学コース

令和 3 年度入学

氏　　名　竹下　隼平

指導教員　平田　研二

令和 7 年 3 月 1 日提出

UNIVERSITY OF TOYAMA 富山大学

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1 研究背景と目的 1
1.2 論文構成 1

第 2 章　通信の構成 **3**
2.1 全体の構成 3
2.2 通信インターフェイス 5
2.2.1 同期式シリアル通信 5
2.2.2 非同期式シリアル通信 6

第 3 章　通信の実装 **9**
3.1 無人航空機に搭載するマイコン同士の通信の実装 9
3.2 PC から無人航空機上のマイコンへの通信の実装 12

第 4 章　IMU について **15**
4.1 慣性計測装置の構造 15
4.2 ICM20948 の加速度および角速度センサ 16
4.3 AK09916 の地磁気センサ 17
4.3.1 センサーキャリブレーション 19
4.4 クォータニオンの取得 28

第 5 章　姿勢推定 **31**
5.1 拡張カルマンフィルタについて 31

第 6 章　おわりに **35**

第 7 章　参考文献 **37**

付録 A　モーター **39**

付録 B　回転成分のキャリブレーション **41**

付録 C　地磁気センサの方位角の算出 **43**

謝辞 **45**

図 目 次

1.1 スラスタ機構を備えた無人航空機 1

2.1 無人航空機の全体の構成 3
2.2 通信の構成 4
2.3 I2C の構成 5
2.4 SPI の構成 6
2.5 UART のデータ構成 7
2.6 UART の構成 7

3.1 2800 を分割した場合 10
3.2 10000 を送信した様子 11
3.3 最終的なビット構成 12
3.4 PC と ESP32 の接続 13
3.5 Bluetooth で通信を行った様子 13
3.6 Wi-Fi で通信を行った様子 13

4.1 ICM20948 15
4.2 ICM20948 の構造 15
4.3 加速度がない状態 16
4.4 加速度がある状態 16
4.5 回転がない状態 16
4.6 回転がある状態 16
4.7 WHO_AM_I を取得した様子 17
4.8 I2C のアドレスを取得した様子 17
4.9 加速度と角速度データを取得した様子 17
4.10 ホール素子の原理 18
4.11 AK09916 とのアクセス方法 18
4.12 WHO_I_AM を読み取った様子 19
4.13 地磁気データを取得した様子 19
4.14 理想的な地磁気センサの出力分布 19
4.15 実際の地磁気センサの出力分布 19
4.16 最小二乗法で求めた直線 20

4.17 固有ベクトルでの結果 27
4.18 係数比較での結果 27
4.19 球の xy 座標の中心の様子 28
4.20 球の z 座標の中心の様子 28
4.21 キャリブレーションを行った結果 28
4.22 クォータニオンのグラフ 29
4.23 クォータニオンの軌跡 29

A.1 2212/920KV 39
A.2 モーターの構成 39

B.1 回転前のデータ 41
B.2 回転前のデータを y 軸から見た様子 41
B.3 固有ベクトルから求めた回転行列を適用した結果 41
B.4 y 軸から見た様子 (固有ベクトル) 41
B.5 係数比較から求めた回転行列を適用した結果 42
B.6 y 軸から見た様子 (係数比較) 42

C.1 地磁気センサを平面に置いた図 43

表 目 次

2.1 通信インターフェイスの比較 7

4.1 2 つの方法での結果の比較 26

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年，無人航空機（ドローン）は災害対応，農業，物流など多様な分野で活用されており，今後さらなる発展が期待されている．しかし，より高度な作業に対応するためには，一般的に普及している固定翼の無人航空機では対応しきれない可能性がある．本研究では，プロペラの傾きを調整し推力方向を可変とするスラスタ機構を備えた無人航空機 [1] の開発を目的とする．従来の無人航空機にはない，高度な機動性や姿勢の自由度度獲得できる．しかし，スラスタ機構を備えた無人航空機がほとんど生産されていないことや固定翼の無人航空機にはブラックボックスがあり，これにスラスタ機構を備えて制御することが難しいことから独自に設計開発を行う．一般的な固定翼の無人航空機の開発を行い，スラスタ機構を備えた無人航空機を開発するという手順で研究を行う．本研究では，無人航空機に搭載するマイコン間の通信，PC とマイコン間の無線通信，姿勢制御のための慣性計測装置の利用に関する研究を行う．

Fig. 1.1: スラスタ機構を備えた無人航空機

1.2 論文構成

1 章では，本研究の背景と目的について述べた．2 章では，シリアル通信インターフェイスについて述べる．3 章では，マイコン間通信の実装と無線通信について述べる．4 章では，慣性計測装置の利用について述べる．5 章では，拡張カルマンフィルタについて述べる．

第 2 章

通信の構成

本章では，本研究の通信の構成について述べ，利用する通信インターフェイスについて説明する．まず，2.1 節で通信の全体像について述べ，2.2 節で利用する通信技術について述べる．

2.1 全体の構成

本節では，無人航空機の全体の構成と通信の構成について述べる．

無人航空機の全体の構成を Fig. 2.1 に示す．無人航空機の外部では位置制御を行う．無人航空機の内部では状態推定と姿勢制御を行う．姿勢制御から出ている rpm を送信するために，通信の実装を行う．また，$\ddot{p}$,ω,ϕ を取得するために慣性計測装置を利用する．

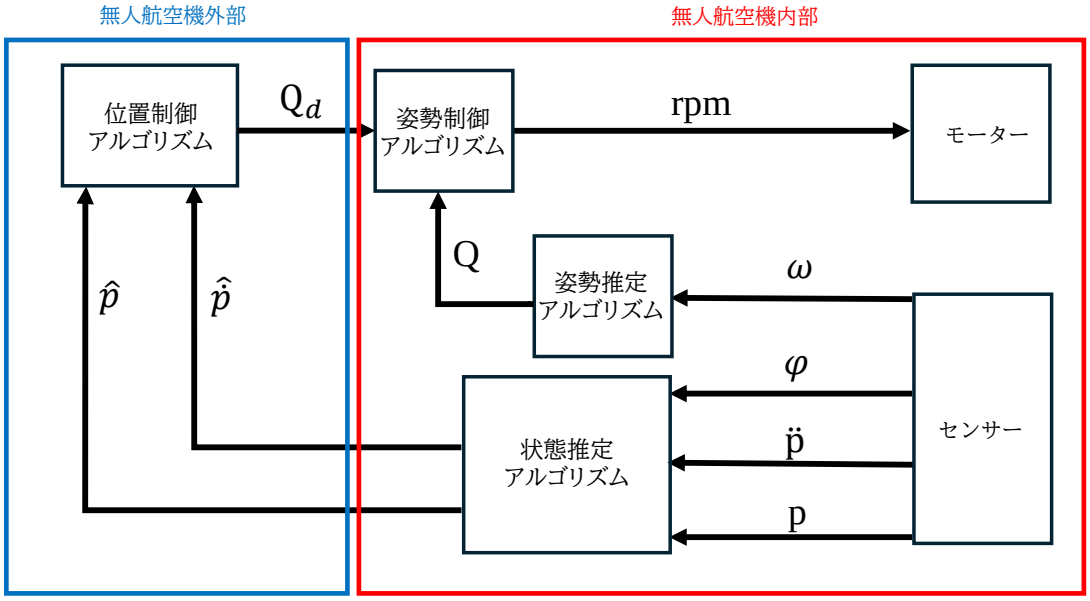

Fig. 2.1: 無人航空機の全体の構成

ここでは，Arduino IDE を利用して開発を行うことができる Espressif Systems 社によって開発された ESP-WROOM-32(以下，ESP32 とする)[2] と，Renesas Electronics 社が提供する 8/16 ビットマイコンである，RL78/G14[3] を利用する．通信の構成を Fig. 2.2 に示す．PC と ESP32 は無線通信を 3.2 節で説明を行う．ESP32 には各種センサを取り付け，RL78/G14 にはモーターを取り付ける．ESP32 と RL78/G14 間はシリアル通信を 3.1 節で説明を行う．また，2.2.1 節で，センサとモーターで利用する通信インターフェイスについて述べる．

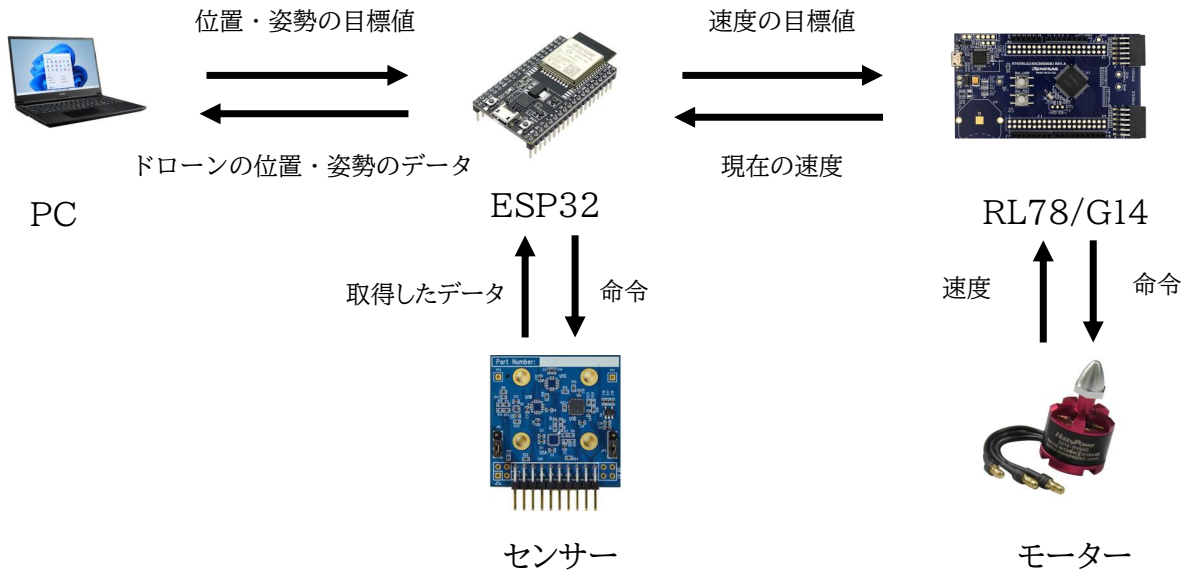

Fig. 2.2: 通信の構成

2.2 通信インターフェイス

本節では，2.2.1 項で，同期式シリアル通信である I2C と SPI について述べ，2.2.2 項で UART について述べる．

2.2.1 同期式シリアル通信

I2C(Inter-Integrated Circuit) は，短距離通信向けに設計された通信インターフェイスで，電子回路内のデバイス間通信に利用されます．1982 年にフィリップス社 (現 NPX セミコンダクターズ) によって開発され，多くのマイコンやセンサーで広く採用されています．

I2C では，データの送受信を行う SDA(Serial Data Line) と，クロック信号を送信する SCL(Serial Clock Line) の 2 本の信号線を使用して，クロックに同期させることによって，通信を行います．また、通信する場合，マスタとスレーブのように役割を分け，マスタ側からスレーブ側に送受信の命令をします．

I2C の通信は，次の手順で行われます。

①マスターから通信開始の合図である，スタートコンディションをスレーブに送信する．
②マスターは，通信相手となるスレーブデバイスを指定するために，スレーブアドレスを送信する．
③スレーブからマスターへスタンバイ完了の合図である，アクノリッジを返す．
④データの通信を行う．

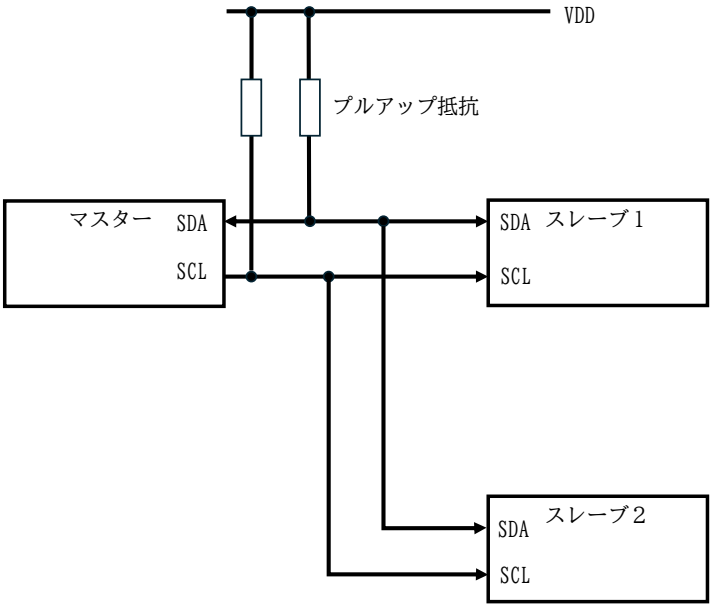

Fig. 2.3: I2C の構成

SPI(Serial Peripheral Interface) は，主にマイクロコントローラーや周辺デバイス間での，高速データ転送を実現するために設計された通信インターフェイスです．1980 年代にモトローラによって提案され，多くの組み込みシステムで採用されています．

SPI では，マスターが生成するクロック信号を送信する SCLK(Serial Clock) と，マスターからスレーブへデータ送信を行う MODI(Master Out Slave In)，スレーブからマスターへのデータ送信を行う MISO(Master In Slave Out)，個別のスレーブを選択するための CS(Chip Select) これら 4 本の信号線を使用して，クロックに同期させることで，通信を行います．

SPI の通信は，次の手順で行われます。

①マスターは，通信対象のスレーブの CS を LOW の状態にします．LOW になっているデバイスだけが通信に参加します．

②マスターはクロックを生成し，すべての通信を同期します．

③マスターは，SCLK に同期して，データを MOSI に送信します．

④同時に，スレーブは SCLK に同期してデータを MISO に送信します．

⑤データの通信を MOSI と MISO で同時に繰り返し行う．

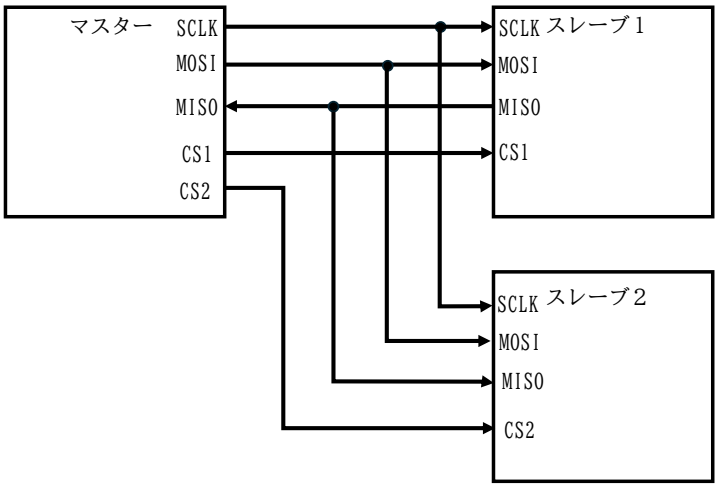

Fig. 2.4: SPI の構成

2.2.2 非同期式シリアル通信

UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)[4] は，非同期通信を実現するためのハードウェアモジュール，または通信インターフェイスを指します．シリアル通信の一種でデータを 1 ビットずつ逐次送受信を行います．非同期とは，送信側と受信側でクロック信号を共有せずに通信を行うことを意味します．そのため，双方が同じ通信条件を設定しておく必要があります．

UART では，データの送信を行う TX と受信を行う RX の 2 本の信号線を使用して，通信を行う．データはフレーム形式に構成される．スタートビットが通信の開始を示す．データビットは送信するデータを表すビットで．パリティビットは誤り検出を行うビットで，奇数パリティと偶数パリティの 2 種類があり，データビットの 1 の個数を奇数パリティでは奇数になるように，偶数パリティでは偶数になるように 0 か 1 を付加します．パリティビットによってデータ送信時にデータが変わっている場合，送信側と受信側で矛盾が生じるため，誤りに気付くことができます．ストップビットは通信の終了を示します．

スタートビット	データビット	パリティビット	ストップビット
1bit	5bit ～ 9bit	1bit	1bit ～ 2bit

Fig. 2.5: UART のデータ構成

UART の通信は，次の手順で行われます。
①データの送信の開始を示すために，TX を Low にします.
②データフレームを送信します.
③RX が High から Low に変化したら，スタートビットを検出します.
④送信されたデータを確認し，ストップビットを確認して，データの受信が終了します.

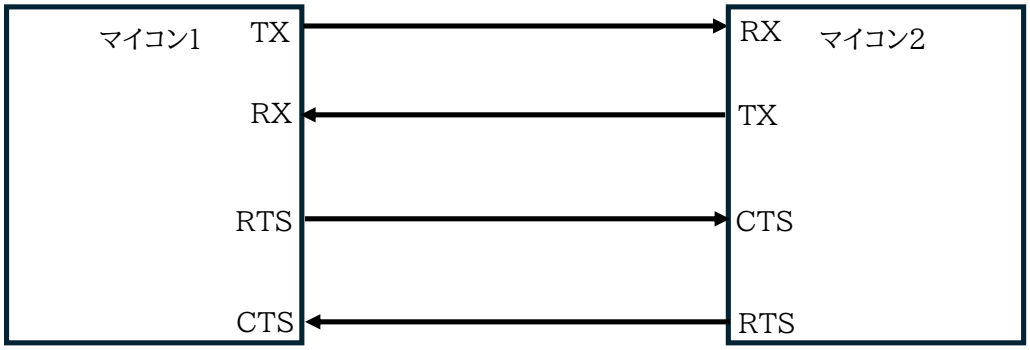

Fig. 2.6: UART の構成

3 つの通信インターフェイスを比較すると，Table 2.1 となる.

Table 2.1: 通信インターフェイスの比較

	I2C	SPI	UART
クロック信号	必要	必要	不要
通信速度	中速	高速	低速～中速
配線本数	2	4	2
同時接続数	1 対多	1 対多	1 対 1

第 3 章

通信の実装

本章では，3.1 節でマイコン間通信について述べ，3.2 節で PC とマイコン間の通信について述べ，??節でモータについて述べる．

3.1 無人航空機に搭載するマイコン同士の通信の実装

本節では，2.1 節で述べた，全体の構成の一部である ESP32 と RL78/G14 の通信について述べる．

ESP32 と RL78/G14 の通信では，モーターの速度の目標値を送受信することを目的とする．通信インターフェイスとしては UART を用いる．UART は非同期通信であるためクロックに合わせて同期をとるのではなく，双方のデータ伝送速度を決め，一致させる必要があります．1 秒あたりに送信されるデータのビット数を表したものをボーレートと呼び，これを一致させることによって通信を行う．ESP32 のボーレートは 300〜115200bps で設定することができる．本研究では，115200bps を使って通信を行う．RL78/G14 は (3.1) 式に従ってボーレートが決定される．SDR(Serial Data Register) は 16 ビットの章樹脂尿データレジスタで，下位 8 ビットまたは 9 ビットが送受信用のバッファとして機能し，上位 7 ビットは動作クロックの分周設定レジスタとして機能します．

$$f_{baud} = f_{MCK} \div (SDR + 1) \div 2 \tag{3.1}$$

f_{baud}: ボーレート　f_{MCK}: 動作クロック　SDR: シリアルデータレジスタ

ボーレートを 115200bps に設定するので， Fig. 3.1 の $f_{baud} = 115200$ とすると

$$115200 = f_{MCK} \div (SDR + 1) \div 2$$
$$(SDR + 1) = f_{MCK} \div 230400$$

動作クロック $f_{MCK} = 8\,\mathrm{MHz}$ とすると

$$SDR = 33.7$$

$SDR = 34$ として，ボーレートを計算すると 114285.7bps．115200bps との誤差は-0.793% である．ESP32 のボーレートは 115200bps に設定すると 2.12% の誤差があり，実際のボーレートは 117647.1bps となる．ESP32 と RL78/G14 の相対誤差は 2.91% となる．UART において許容される相対誤差は 4% 程度であるので，許容誤差範囲内に収まっている．

UART のデータ構成 (Fig. 2.5) のスタートビットを 1bit，データフレームを 8bit，偶数パリティ，ストップビットを 1bit とする．モーターの目標値を送信するときにデータフレーム 8bit の場合，最

大 $2^8 - 1 = 255$ まで送信ができるが，モーターの目標値としては不十分である．そのため本実験では 10000 を送信できることを目標とする．10000 を送信するためにはビットの分割が必要となる．ビットの分割では論理積 (AND 演算) とシフトを用いる．論理積は 2 つの論理値を比較し，両方が真のときのみ真を返す演算．シフトは 2 進数のビットを左右に移動させる演算．数値を右シフトは $\frac{1}{2}$ 倍，左シフトは 2 倍に操作である．この二つの操作を使って最大 16bit の送信を行う．2800 を分割する例を Fig. 3.1 に示す．上位ビットを 8bit の右シフトを用いて取り出し．下位ビットを 0b11111111 と論理積をとることによって取り出す．このような操作をすることによって最大 $2^16 - 1 = 65536$ まで送信することが可能となった．

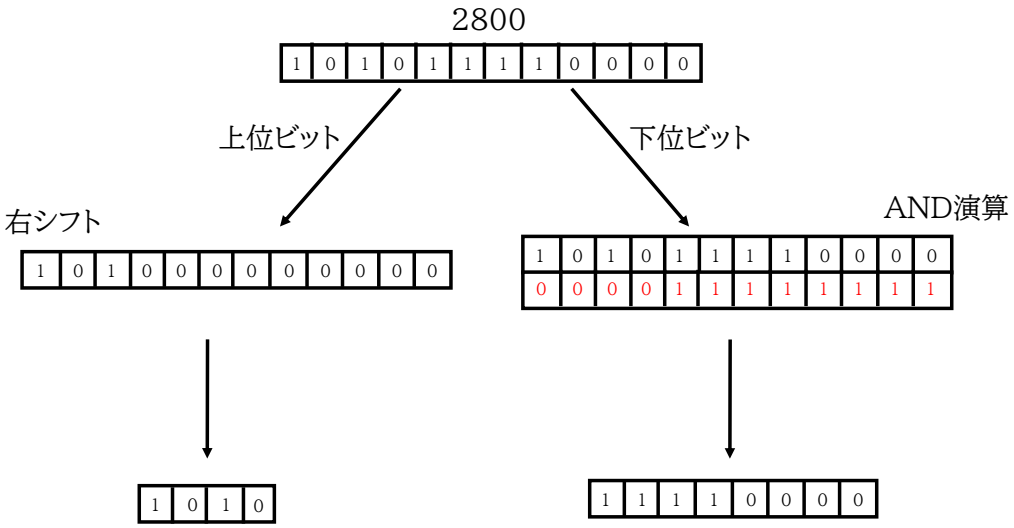

Fig. 3.1: 2800 を分割した場合

実際に実験を行う．実験としては ESP32 から RL78/G14 への 10000 の送信を行う．RL78/G14 は受信を確認できた場合，LCD ディスプレイに受信した内容を表示する．実験の手順としては双方のマイコンのボーレートを 115200bps に設定する．RTS を Low にすることで通信開始を合図する．ESP32 が 10000 を送信をする．RL78/G14 が受信を確認して LCD ディスプレイに表示という手順である．Fig. 3.2 は実際に送受信を行った様子である．

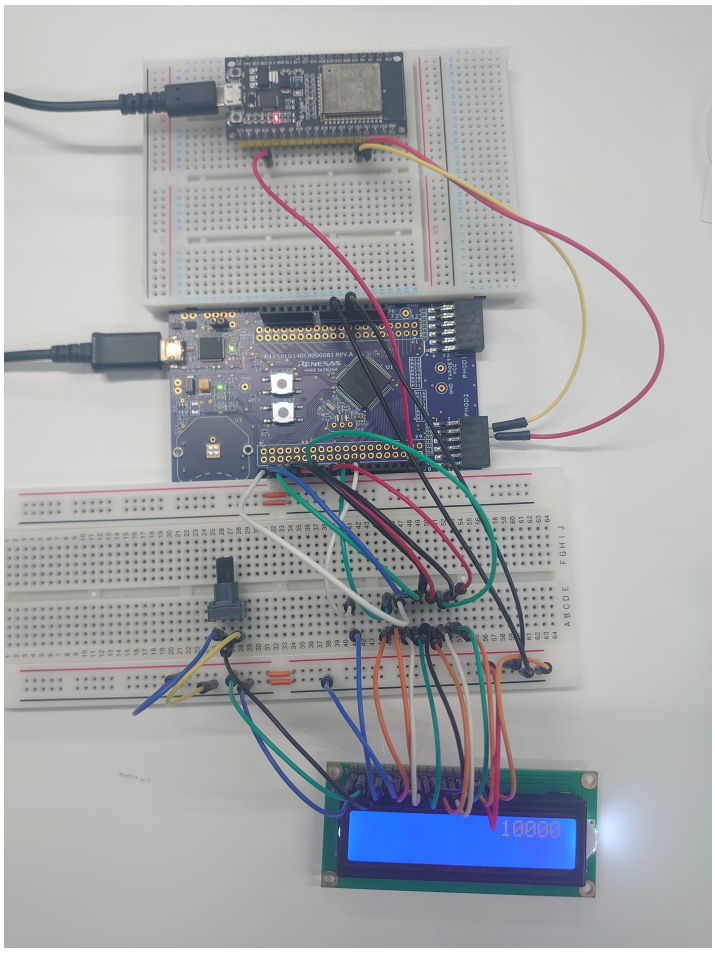

Fig. 3.2: 10000 を送信した様子

速度の目標値を送信することはできたが，無人航空機のモータを選択することができない．モーターの選択はビットの構成によって解決する．最終的なビットの構成を Fig. 3.3 に示す．パケット 2 からパケット 0 の順番で送信が行われる．パケット 2 にモーター番号を付加する．また，各パケットにはパケット番号を付加することで受信時に誤りを発見する．

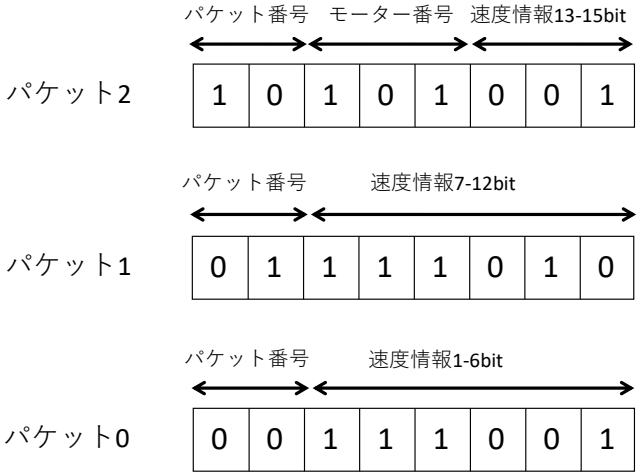

Fig. 3.3: 最終的なビット構成

3.2 PC から無人航空機上のマイコンへの通信の実装

ESP32 は，マイコンの機能として Bluetooth と Wi-Fi に接続して，無線で通信を行うことができる．本節では，PC と ESP32 間の無線通信について述べる．

Bluetooth とは，2.4GHz 帯の無線周波数を利用した近距離無線通信規格です．特徴としては低消費電力，短距離通信などが挙げられます．Bluetooth の規格は Bluetooth Classic と Bluetooth Low Energy の 2 つに分類でき，ESP32 では Bluetooth Classic のバージョン 4.2 を使用している．
Bluetooth では，親機のことをセントラル，子機のことをペリフェラルと呼びます．セントラルからの接続待ちの仕組みをアドバタイズと呼びます．アドバタイズとは，不特定多数の相手にデータを送信する一方通行の通信方式です．ペリフェラル機器が接続待ちの間，定期的にアドバタイズを発信します．アドバタイズによって機器の名前や属性データを発信し，セントラル機器はそれをスキャンすることで，ペリフェラル機器を認識することが出来ます．セントラル機器は認識したペリフェラル機器の中から 1 対 1 の通信したい相手を選択し，接続要求を送信することが出来ます．ペリフェラル機器が接続要求を受信すると，アドバタイズをやめて 1 対 1 の通信に切り替えます．この通信のことを GATT (Generic attribute profile) 通信と呼びます．まずは Bluetooth を用いて，PC と ESP32 の通信を行う．Bluetooth を用いて無線通信を行い，”Hello World!”を送信して，受信した場合 LCD ディスプレイにそれを表示する．実験した様子を Fig. 3.4,Fig. 3.5 に示す．Fig. 3.4 は PC と ESP32 が接続されている様子．Fig. 3.5 は受信した様子である．

Fig. 3.4: PC と ESP32 の接続

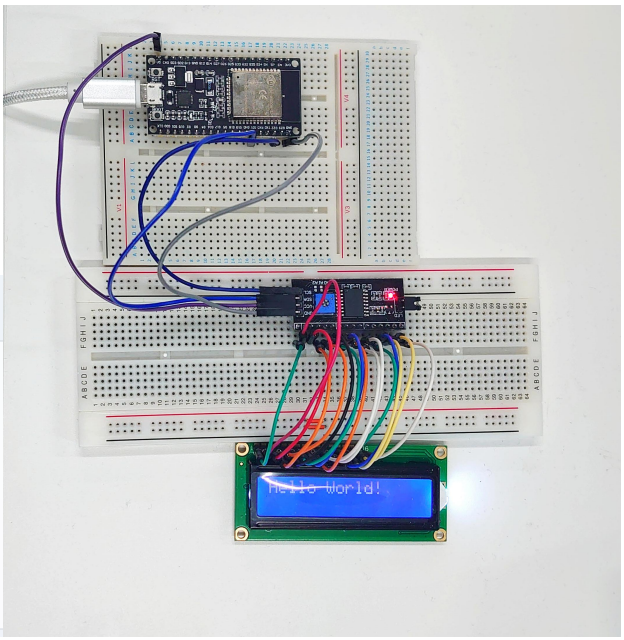

Fig. 3.5: Bluetooth で通信を行った様子

続いて，Wi-Fi による通信を行う．ここではソケット通信を用いる．まずは，TCP/IP について説明を行う．TCP/IP は，Transmission Control Protocol/Internet Protocol の略称で，コンピューターネットワークにおいて，もっとも広く利用されているインターネットプロトコルです．コンピューター同士が通信する際，データの形式や順番，エラー対処方法といった規格をお互いに把握していくために利用されています．TCP/IP は通信プロトコルの集合体であり，階層モデルそれぞれでルールやプロトコルが適用される条件を設けることで，異なるデバイス間やアプリ間の通信を可能にし，効率よくデータ転送を行っています．階層モデルでは 4 つの層に分けられ，アプリケーション層，トランスポート層，インターネット層，ネットワークインターフェース層に分けられます．ソケット通信とは，インターネットやネットワークを使って，コンピュータ同士がデータをやり取りする仕組みで，通信には「ソケット」と呼ばれる接続口を使い，サーバーとクライアントがつながります．例えば，Web サイトの表示やオンラインゲーム，ビデオ通話などで使われており，私たちの身近な技術です．

PC から ESP32 へ Wi-Fi を用いて，無線通信を行う．PC から ESP32 へ”Hello World!”を 5 回送信する．Fig. 3.6 に受信したシリアルモニタの様子を示す．

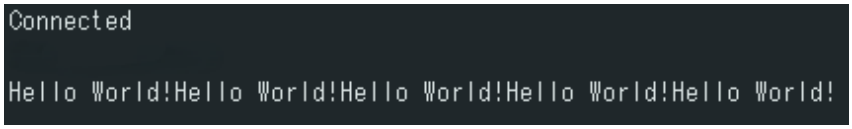

Fig. 3.6: Wi-Fi で通信を行った様子

第 4 章

IMU について

4.1 慣性計測装置の構造

無人航空機の姿勢を制御するためには，センサの値を用いて現在の姿勢を推定する必要がある．本節では，本研究で使用する慣性計測装置 (以下，IMU(Inertial Measurement Unit) と略す)，ICM20948 の構造について述べる．

Fig. 4.1 は，本研究で使用する ICM20948 である．ICM20948 は，TDK 社が開発した IMU で，3 軸加速度センサ，3 軸角速度センサ，3 軸地磁気センサを有し，省電力かつ高精度で，Arduino のようなマイコンと I2C や SPI で通信することで，データを取得することができる．

ICM20948 の構造を，Fig. 4.2 に示す．Fig. 4.2 の赤色で囲った部分が，加速度センサと角速度センサ．黄色で囲った部分が地磁気センサとなっている．これは ICM20948 の地磁気センサが，旭化成エレクトロニクスの AK09916 を使用しているためである．加速度センサと角速度センサ，地磁気センサが分かれていることは，データの取得に影響する．詳しくは，4.2 節と 4.3 節で述べる．

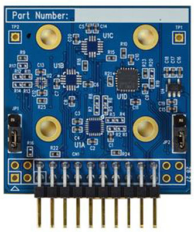

Fig. 4.1: ICM20948

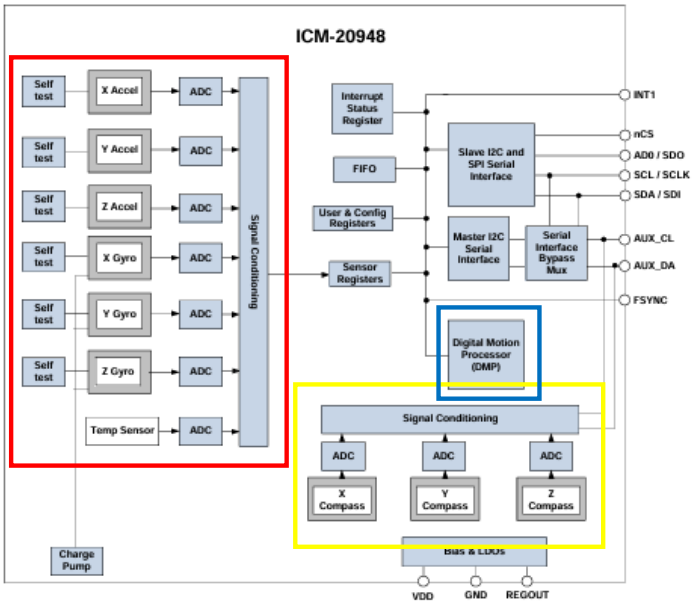

Fig. 4.2: ICM20948 の構造

4.2 ICM20948 の加速度および角速度センサ

本節では，加速度センサと角速度センサの構造と，実際に加速度と角速度のデータを取得する方法と取得した結果について述べる．

ICM20948[5] では，加速度センサおよび角速度センサは MEMS(Micro Electro Mechanical System) 方式が採用されている．MEMS は，微細加工技術を用いて作られた，小型の機械構造と電子回路を一体化したデバイスのことを指します．本項では，MEMS 方式の基本原理となる静電容量方式について解説する．

静電容量方式の加速度センサでは，Fig. 4.3 重りが検出電極の中心にあり，検出電力との距離が等しい状態になります．Fig. 4.4 のように，加速度が加わると，加速度と反対方向に慣性力が生じ，重りがずれます．重りがずれることによって，検出電極と重りの間の静電容量に差が生じます．静電容量の差を測定することで慣性力を検出して加速度を算出します．

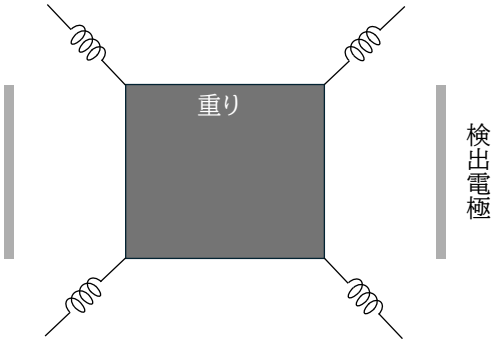

Fig. 4.3: 加速度がない状態

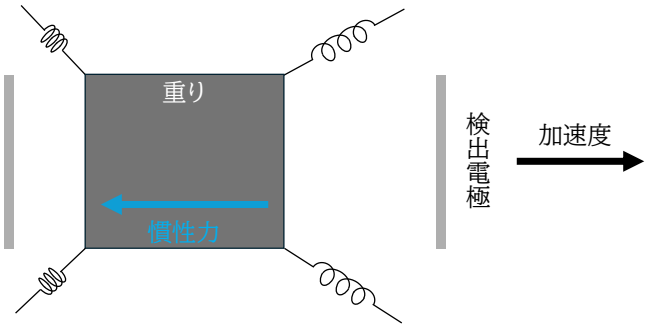

Fig. 4.4: 加速度がある状態

静電容量方式の角速度センサでは，Fig. 4.5 のような無回転の状態で、振動子を一定周期で振動させておきます．この時，振動子と検出電極の静電容量は等しい状態になります．Fig. 4.6 のように，回転を加えるとコリオリ力が発生し，振動子が動きます．検出電極と振動子の間の静電容量に差が生じます．静電容量の差を測定することでコリオリ力を検出して角速度を算出します．

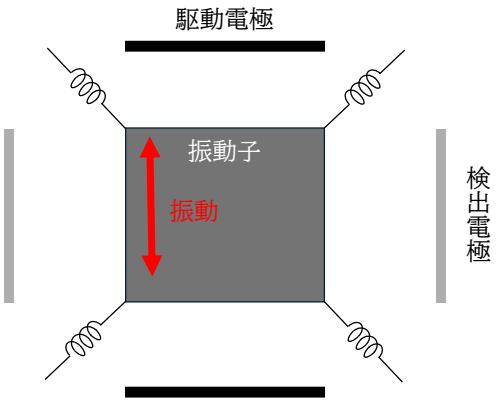

Fig. 4.5: 回転がない状態

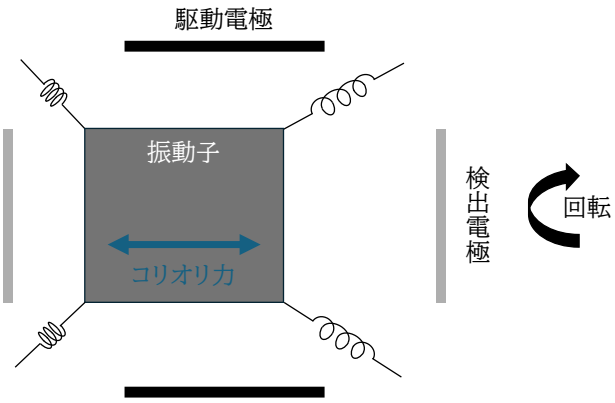

Fig. 4.6: 回転がある状態

ICM20948 の加速度と角速度のデータの取得を行う．ESP32 と ICM20948 間の通信は 2.2.1 項で述べた I2C を利用する．まず，ICM20948 が接続されているかを確認する．ICM20948 が正しく接

続されているかを確認するためには，WHO_AM_I レジスタを読み込むことで接続が確認できる．また，I2C のアドレスを読み込みをすることでも，接続を確認することができる．実際に ESP32 と ICM20948 を接続し，WHO_AM_I レジスタである 0xEA と I2C アドレスである 0x0C を取得する．Fig. 4.7，Fig. 4.8 は ICM20948 の WHO_AM_I レジスタと I2C アドレスを取得した様子である．

```
WHO_AM_I: 0xEA
```

Fig. 4.7: WHO_AM_I を取得した様子

```
Scanning...
I2C device found at address 0x0C  !
I2C device found at address 0x68  !
done
```

Fig. 4.8: I2C のアドレスを取得した様子

ICM20948 の接続が確認できたので，加速度と角速度のデータを取得する．データを出力する時には，Arduino IDE のシリアルモニタを利用した．Fig. 4.9 が実際に取得した加速度と角速度データである．

```
AcX=-0.44,AcY=-0.13,AcZ=10.04,GyX=0.06,GyY=0.00,GyZ=-0.02
AcX=-0.42,AcY=0.01,AcZ=10.04,GyX=0.03,GyY=0.01,GyZ=0.03
AcX=-0.50,AcY=0.10,AcZ=10.03,GyX=0.07,GyY=0.01,GyZ=-0.03
AcX=-0.40,AcY=-0.07,AcZ=10.12,GyX=0.05,GyY=-0.01,GyZ=0.03
AcX=-0.45,AcY=-0.03,AcZ=10.04,GyX=0.05,GyY=-0.05,GyZ=-0.04
AcX=-0.36,AcY=-0.04,AcZ=9.92,GyX=0.02,GyY=-0.01,GyZ=-0.02
AcX=-0.29,AcY=-0.14,AcZ=10.08,GyX=0.06,GyY=-0.06,GyZ=-0.03
AcX=-0.39,AcY=-0.12,AcZ=10.18,GyX=0.03,GyY=-0.08,GyZ=-0.04
AcX=-0.36,AcY=-0.00,AcZ=10.02,GyX=0.01,GyY=-0.03,GyZ=0.02
AcX=-0.37,AcY=-0.08,AcZ=10.08,GyX=0.03,GyY=0.02,GyZ=-0.01
AcX=-0.33,AcY=0.00,AcZ=10.01,GyX=0.04,GyY=0.00,GyZ=-0.00
AcX=-0.30,AcY=0.04,AcZ=10.05,GyX=0.04,GyY=-0.04,GyZ=-0.01
AcX=-0.41,AcY=0.04,AcZ=10.00,GyX=0.05,GyY=0.05,GyZ=-0.01
AcX=-0.49,AcY=-0.01,AcZ=10.02,GyX=0.04,GyY=-0.01,GyZ=-0.02
AcX=-0.26,AcY=0.00,AcZ=10.01,GyX=0.02,GyY=0.04,GyZ=0.03
```

Fig. 4.9: 加速度と角速度データを取得した様子

4.3 AK09916 の地磁気センサ

本節では，地磁気センサの構造と地磁気データの取得，4.3.1 項で地磁気センサのキャリアブレーションについて述べる．

ICM20948 内部に搭載されている地磁気センサである，AK09916[6] はホール素子を用いた地磁気センサとなってる．まず，地磁気センサの基本原理について述べる．ホール素子は磁場を検出する半導体装置であり，ホール効果を利用する．ホール効果とは，磁場がかかった導体や半導体内の移動する電子が，ローレンツ力を受けて進行方向が曲がり，電圧（ホール電圧が発生する現象です．この電圧を測定することによって，磁場の大きさを検出することができる．

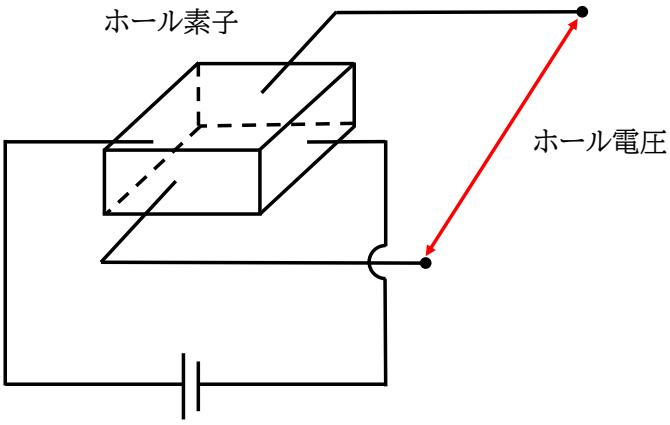

Fig. 4.10: ホール素子の原理

4.1 節で，ICM20948 の構造について述べた．Fig. 4.2 から，地磁気センサは SDA，SCL の結線から直接アクセスすることが出来ない．地磁気センサにアクセスする方法は 3 つ考えられる．

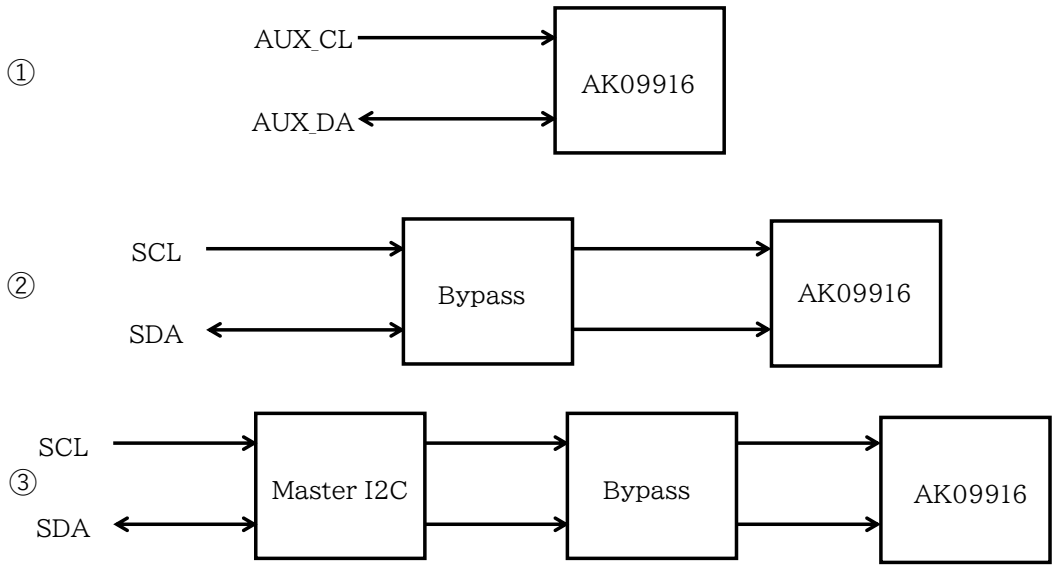

Fig. 4.11: AK09916 とのアクセス方法

①AUX_CL と AUX_DA を用いて、地磁気センサと直接通信する方法。
②バイパスを使って地磁気センサと通信する方法。
③Master I2C Serial Interface をマスター，地磁気センサをスレーブとして，地磁気センサと通信する方法があります。
③の方法で地磁気センサへのアクセスを行う．Fig. 4.12 に実際に読み取った様子を示す．

AK09916 の接続が確認できたので，地磁気のデータを取得する．Arduino IDE のシリアルモニタを利用した．Fig. 4.13 が実際に取得した地磁気データである．

```
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
1001000 1001
```

Fig. 4.12: WHO_I_AM を読み取った様子

```
magx=-24.60,magy=-10.20,magz=-72.60
magx=-24.75,magy=-9.75,magz=-74.25
magx=-24.15,magy=-9.15,magz=-73.95
magx=-24.00,magy=-10.50,magz=-73.80
magx=-25.05,magy=-10.95,magz=-73.35
magx=-23.40,magy=-9.90,magz=-73.50
magx=-24.00,magy=-9.30,magz=-72.60
magx=-26.70,magy=-8.70,magz=-74.40
magx=-25.20,magy=-10.20,magz=-72.00
magx=-24.45,magy=-9.45,magz=-73.35
magx=-24.15,magy=-9.15,magz=-73.35
magx=-23.25,magy=-10.05,magz=-73.65
magx=-24.00,magy=-9.90,magz=-73.50
magx=-23.10,magy=-9.60,magz=-72.60
magx=-23.85,magy=-9.15,magz=-72.15
magx=-23.55,magy=-11.55,magz=-74.55
magx=-24.30,magy=-9.30,magz=-73.20
magx=-24.30,magy=-12.00,magz=-74.10
magx=-23.85,magy=-10.65,magz=-73.35
magx=-24.45,magy=-8.45,magz=-73.65
```

Fig. 4.13: 地磁気データを取得した様子

4.3.1 センサーキャリブレーション

地磁気センサは，地球を取り巻く地磁気を検出するセンサであるため，理想的な場合，Fig. 4.14 のような球となる．球となる理由としては，地磁気センサは北の方向を知るためのセンサであり，各方向のノルムが一定となるためである．しかし，Hard iron offset と呼ばれる，デバイス内の磁性体によって発生するオフセットにより，球が平行移動する．soft iron offset と呼ばれる，周囲の金属によって発生するオフセットによって楕円なり，回転が発生する．

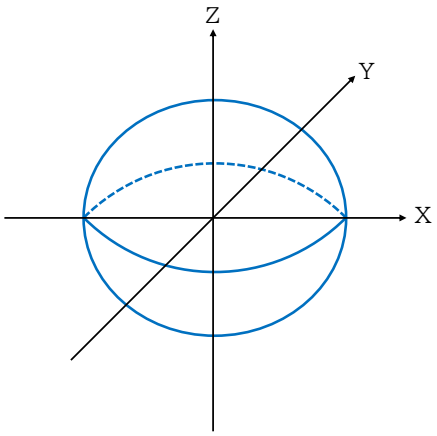

Fig. 4.14: 理想的な地磁気センサの出力分布

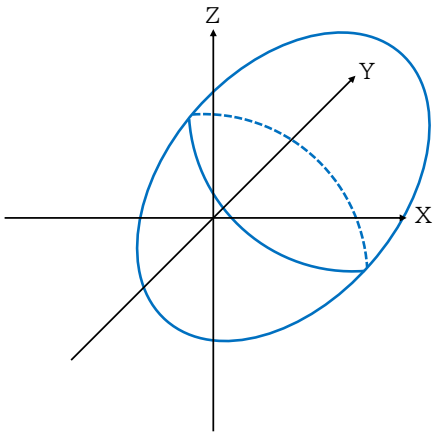

Fig. 4.15: 実際の地磁気センサの出力分布

本研究では，地磁気センサのキャリブレーション [7][8] を固有ベクトルを用いた方法と，係数比較を用いた方法の 2 つ行う．最小二乗法とは，n 個のデータ (x_1, y_1),(x_2, y_2),・・・(x_n, y_n) の散布図に対して，データの状況を $y = ax + b$ で表したい，予測された値と実データ間の乖離が最小となるように傾き a と切片 b を推定する．F を最小にする a,b を求めることで，最小二乗法によって直線が得る．

$$F = \sum_{k=1}^{n} \{y_k - (ax_k + b)\}^2 \tag{4.1}$$

例えば，(-1, 2), (5, 6), (-5, 1), (2, 5), (9, 8), (4, 5), (6, 3) の回帰直線を最小二乗法によって求める．評価関数 F を最小とするには，各パラメータで偏微分を行い 0 となるパラメータを求める問題とである．

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \sum_{k=1}^{n} 2\{y_k - (ax_k + b)\}x_k = 0 \tag{4.2}$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \sum_{k=1}^{n} 2\{y_k - (ax_k + b)\} = 0 \tag{4.3}$$

行列の形に書き直すと，(4.4) 式となる．

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n} x_k^2 & \sum_{k=1}^{n} x_k \\ \sum_{k=1}^{n} x_k & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{n} x_k y_k \\ \sum_{k=1}^{n} y_k \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

これを解いて，グラフにプロットすると Fig. 4.16 となる．

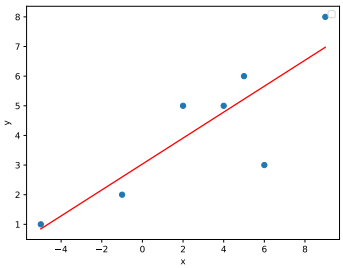

Fig. 4.16: 最小二乗法で求めた直線

最小二乗法を用いた，地磁気センサのキャリブレーションについて考える．
回転，平行移動，伸縮を含んだ楕円体の方程式は (4.5) 式のようになる．

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fxz + Gx + Hy + Iz - 1 = 0 \tag{4.5}$$

評価関数 J を最小にするパラメータを求める．

$$f(x,y,z) = Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fxz + Gx + Hy + Iz - 1 \tag{4.6}$$

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\{f(x,y,z)\}^2 \tag{4.7}$$

評価関数 J を最小とするには，各パラメータで偏微分を行い 0 となるパラメータを求める問題となる．

$$\frac{\partial J}{\partial A} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)x_n^2 = 0 \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial J}{\partial B} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)y_n^2 = 0 \tag{4.9}$$

$$\frac{\partial J}{\partial C} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)z_n^2 = 0 \tag{4.10}$$

$$\frac{\partial J}{\partial D} = \sum_{k=1}^{n} 2f(x_n,y_n,z_n)xy = 0 \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial J}{\partial E} = \sum_{k=1}^{n} 2f(x_n,y_n,z_n)yz = 0 \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial J}{\partial F} = \sum_{k=1}^{n} 2f(x_n,y_n,z_n)xz = 0 \tag{4.13}$$

$$\frac{\partial J}{\partial G} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)x = 0 \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial J}{\partial H} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)y = 0 \tag{4.15}$$

$$\frac{\partial J}{\partial I} = \sum_{k=1}^{n} f(x_n,y_n,z_n)z = 0 \tag{4.16}$$

この方程式を行列で表現すると，(4.17) 式〜(4.20) 式となる．

$$\boldsymbol{a}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{4.17}$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} A & B & C & D & E & F & G & H & I \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4.18}$$

$$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} x_n^4 & x_n^2y_n^2 & x_n^2z_n^2 & 2x_n^3y_n & 2x_n^2y_nz_n & 2x_n^3z_n & x_n^3 & x_n^2y_n & x_n^2z_n \\ x_n^2y_n^2 & y_n^4 & y_n^2z_n^2 & 2x_ny_n^3 & 2y_n^3z_n & 2x_ny_n^2z_n & x_ny_n^2 & y_n^3 & y_n^2z_n \\ x_n^2z_n^2 & y_n^2z_n^2 & z_n^4 & 2y_nz_n^2 & 2x_ny_nz_n^3 & 2x_nz_n^3 & x_nz_n^2 & y_nz_n^2 & z_n^3 \\ x_n^3y_n & x_ny_n^3 & x_ny_nz_n^2 & 2x_n^2y_n^2 & 2x_ny_n^2z_n & 2x_n^2y_nz_n & x_n^2y_n & x_ny_n^2 & x_ny_nz_n \\ x_n^2y_nz_n & y_n^3z_n & y_nz_n^3 & 2x_ny_n^2z_n & 2y_n^2z_n^2 & 2x_ny_nz_n^2 & x_ny_nz_n & y_n^2z_n & y_nz_n^2 \\ x_n^3z_n & x_ny_n^2z_n & x_nz_n^3 & 2x_n^2y_nz_n & 2x_ny_nz_n^2 & 2x_n^2z_n^2 & x_n^2z_n & x_ny_nz_n & x_nx_n^2 \\ x_n^3 & x_ny_n^2 & x_nz_n^2 & 2x_n^2y_n & 2x_ny_nz_n & 2x_n^2z_n & x_n^2 & x_ny_n & x_nz_n \\ x_n^2y_n & y_n^3 & y_nz_n^2 & 2x_ny_n^2 & 2y_n^2z_n & 2x_ny_nz_n & x_ny_n & y_n^2 & y_nz_n \\ x_n^2z_n & y_n^2z_n & z_n^3 & 2x_ny_nz_n & 2y_nz_n^2 & 2x_nz_n^2 & x_nz_n & y_nz_n & z_n^2 \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

$$\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 & x_ny_n & y_nz_n & x_nz_n & x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4.20}$$

A から I のパラメータは (4.21) 式で求めることができる．

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{a}^{-1}\boldsymbol{b} \tag{4.21}$$

楕円体の方程式を行列を使って表現すると，(4.23) 式〜(4.26) 式となる．

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fxz + Gx + Hy + Iz - 1 = 0 \tag{4.22}$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{x} - 1 = 0 \tag{4.23}$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4.24}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} A & D & F \\ D & B & E \\ F & E & C \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} G & H & I \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

行列 $\aleph$ の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$，固有値に対応する大きさ 1 の固有ベクトルをそれぞれ $\boldsymbol{p_1}, \boldsymbol{p_2}, \boldsymbol{p_3}$ とする．行列 $\boldsymbol{P}$ を (4.28) 式とすると，行列 $\aleph$ の対角行列 $\boldsymbol{\Lambda}$ は (4.27) 式となる．

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\aleph\boldsymbol{P} = \boldsymbol{\Lambda} \tag{4.27}$$

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p_1} & \boldsymbol{p_2} & \boldsymbol{p_3} \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \tag{4.29}$$

$\boldsymbol{x}$ を $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}$ を用いて回転させると，(4.30) 式となる．

$$\boldsymbol{x}' = \boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \tag{4.30}$$

(4.23) 式を (4.27) 式, (4.30) 式を用いて，書き換えると (4.31) 式となる．

$$\boldsymbol{x}'^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{x}' + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}' - 1 = 0 \tag{4.31}$$

(4.31) 式を展開すると，(4.32) 式となる．

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_1}x' + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_2}y' + \boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_3}z' - 1 = 0 \tag{4.32}$$

(4.32) 式を平方完成すると，(4.33) 式となる．

$$\lambda_1(x' + \frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_1}}{2\lambda_1})^2 + \lambda_2(y' + \frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_2}}{2\lambda_2})^2 + \lambda_3(z' + \frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_3}}{2\lambda_3})^2 = 1 + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_1})^2}{4\lambda_1} + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_2})^2}{4\lambda_2} + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_3})^2}{4\lambda_3} \tag{4.33}$$

ここで楕円体の中心座標を x_c, y_c, z_c とすると，中心座標は (4.34) 式〜(4.36) 式となる．

$$x_c = -\frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_1}}{2\lambda_1} \tag{4.34}$$

$$y_c = -\frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_2}}{2\lambda_2} \tag{4.35}$$

$$z_c = -\frac{\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_3}}{2\lambda_3} \tag{4.36}$$

平行移動を行った座標を X, Y, Z とすると，(4.33) 式は (4.37) 式,(4.38) 式となる．

$$\lambda_1 X^2 + \lambda_2 Y^2 + \lambda_3 Z^2 = W \tag{4.37}$$

$$W = 1 + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_1})^2}{4\lambda_1} + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_2})^2}{4\lambda_2} + \frac{(\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{p_3})^2}{4\lambda_3} \tag{4.38}$$

(4.37) 式を楕円体の標準形に直すと，(4.39) 式となる．

$$\frac{X^2}{(\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}})^2} + \frac{Y^2}{(\sqrt{\frac{W}{\lambda_2}})^2} + \frac{Z^2}{(\sqrt{\frac{W}{\lambda_3}})^2} = 1 \tag{4.39}$$

それぞれの方向の半径は (4.40) 式〜(4.42) 式となる．

$$x\text{ 軸方向}\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}} \tag{4.40}$$

$$y\text{ 軸方向}\sqrt{\frac{W}{\lambda_2}} \tag{4.41}$$

$$z\text{ 軸方向}\sqrt{\frac{W}{\lambda_3}} \tag{4.42}$$

最も長い軸に半径を合わせるとして，x 軸方向が最も長い軸とすると，伸縮校正後の座標を X', Y', Z' とすると，(4.43) 式〜(4.46) 式となる．

$$X' = X \tag{4.43}$$

$$Y' = \frac{\sqrt{\frac{W}{\lambda_2}}}{\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}}}Y = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}Y \tag{4.44}$$

$$Z' = \frac{\sqrt{\frac{W}{\lambda_3}}}{\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}}}Z = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_3}}Z \tag{4.45}$$

$$\tag{4.46}$$

(4.43) 式〜(4.46) 式を (4.39) 式に代入して整理すると，半径 $\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}}$ の球に校正することができる．

$$X'^2 + Y'^2 + Z'^2 = (\sqrt{\frac{W}{\lambda_1}})^2 \tag{4.47}$$

係数比較を用いた，地磁気センサのキャリブレーションについて考える．最小二乗法で A から I を求める過程は同様で，A から I のパラメータを回転行列と平行移動を含む楕円体の方程式の係数と比較して回転行列や中心，半径を求めます。
楕円体の方程式の標準形は

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \tag{4.48}$$

xyz 軸まわりの回転行列を

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{4.50}$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.51}$$

これらの回転行列を乗算したものは，(4.52) 式となる．

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \tag{4.52}$$

回転，平行移動を行った後の座標を x',y',z' とすると

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{bmatrix} \tag{4.53}$$

展開を行うと

$$x' = r_{11}(x - x_c) + r_{12}(y - y_c) + r_{13}(z - z_c) \tag{4.54}$$
$$y' = r_{21}(x - x_c) + r_{22}(y - y_c) + r_{23}(z - z_c) \tag{4.55}$$
$$z' = r_{31}(x - x_c) + r_{32}(y - y_c) + r_{33}(z - z_c) \tag{4.56}$$

これを (4.48) 式に代入して，係数比較を行うと

$$A = \frac{r_{11}^2}{a^2} + \frac{r_{21}^2}{b^2} + \frac{r_{31}^2}{c^2} \tag{4.57}$$
$$B = \frac{r_{12}^2}{a^2} + \frac{r_{22}^2}{b^2} + \frac{r_{32}^2}{c^2} \tag{4.58}$$
$$C = \frac{r_{13}^2}{a^2} + \frac{r_{23}^2}{b^2} + \frac{r_{33}^2}{c^2} \tag{4.59}$$
$$D = \frac{2r_{11}r_{12}}{a^2} + \frac{2r_{21}r_{22}}{b^2} + \frac{2r_{31}r_{32}}{c^2} \tag{4.60}$$
$$E = \frac{2r_{12}r_{13}}{a^2} + \frac{2r_{22}r_{23}}{b^2} + \frac{2r_{32}r_{33}}{c^2} \tag{4.61}$$
$$F = \frac{2r_{11}r_{13}}{a^2} + \frac{2r_{21}r_{23}}{b^2} + \frac{2r_{31}r_{33}}{c^2} \tag{4.62}$$
$$\tag{4.63}$$

$$G = -\frac{2r_{11}(r_{11}x_c + r_{12}y_c + r_{13}z_c)}{a^2} - \frac{2r_{21}(r_{21}x_c + r_{22}y_c + r_{23}z_c)}{b^2} - \frac{2r_{31}(r_{31}x_c + r_{32}y_c + r_{33}z_c)}{c^2} \tag{4.64}$$
$$H = -\frac{2r_{12}(r_{11}x_c + r_{12}y_c + r_{13}z_c)}{a^2} - \frac{2r_{22}(r_{21}x_c + r_{22}y_c + r_{23}z_c)}{b^2} - \frac{2r_{32}(r_{31}x_c + r_{32}y_c + r_{33}z_c)}{c^2} \tag{4.65}$$
$$I = -\frac{2r_{13}(r_{11}x_c + r_{12}y_c + r_{13}z_c)}{a^2} - \frac{2r_{23}(r_{21}x_c + r_{22}y_c + r_{23}z_c)}{b^2} - \frac{2r_{33}(r_{31}x_c + r_{32}y_c + r_{33}z_c)}{c^2} \tag{4.66}$$

(4.57) 式〜(4.66) 式の方程式の近似解を求めることによって，回転行列と中心，半径を求めることができる。

屋内で計測したデータと屋外で計測したデータでキャリブレーションを行う。屋外では外乱が少なく，回転がほとんどないので，無視することができる。屋外のデータを用いて，中心と半径のキャリブレーションを行う。

Table 4.1: 2 つの方法での結果の比較

	x 軸の半径	y 軸の半径	z 軸の半径	x 座標	y 座標	z 座標
最小二乗法	52.321	50.061	53.678	-2.596	-7.6778	23.883
最小二乗法コスト関数	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0034	-0.0207	0.0283
係数比較	46.485	47.016	44.998	3.929	-6.723	19.963
係数比較コスト関数	0	0	0	0.0227	-0.0011	0.0166

実際に 2 つの方法で図示した結果が，Fig. 4.17 と Fig. 4.18 である．係数比較で推定した結果が少し小さい球になっていることが確認できる．

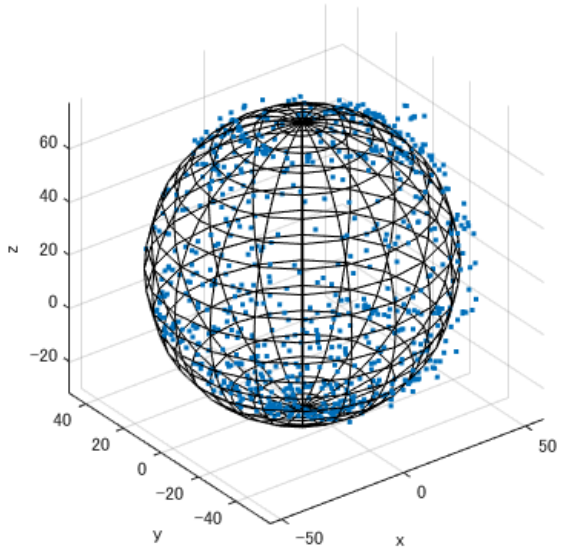

Fig. 4.17: 固有ベクトルでの結果

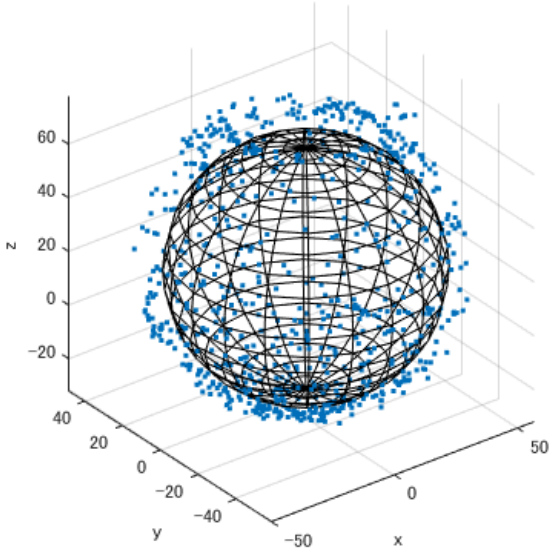

Fig. 4.18: 係数比較での結果

これらの結果を用いて，実際にキャリブレーションを行い，屋外でデータを取得した結果が Fig. 4.21 となる．Fig. 4.19,Fig. 4.20 より，z 軸と x 軸から見ても球に補正できていることが確認できる．

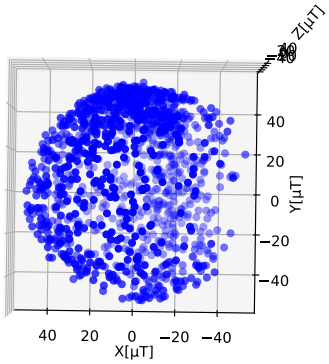

Fig. 4.19: 球の xy 座標の中心の様子

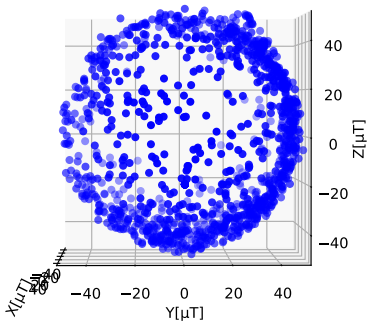

Fig. 4.20: 球の z 座標の中心の様子

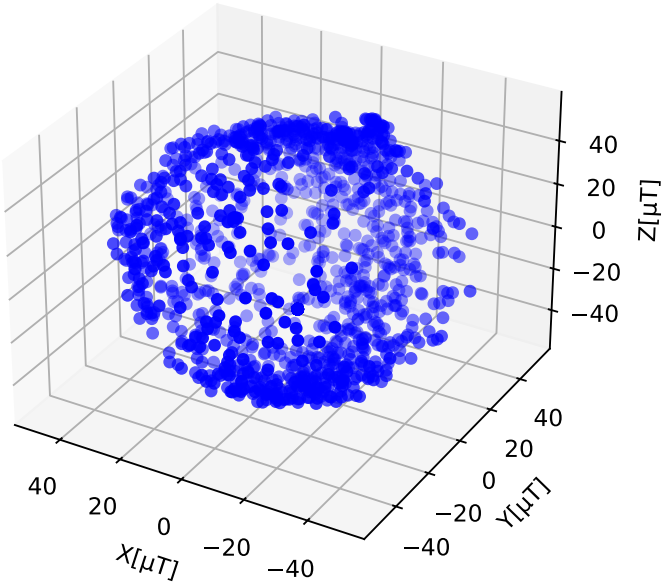

Fig. 4.21: キャリブレーションを行った結果

4.4 クォータニオンの取得

小型航空機の姿勢はクォータニオンやオイラー角によって表現される．本研究では，姿勢を表現する際にはクォータニオンを用いる．Fig. 4.2 の青色で囲った部分が，Digital Motion Processor(以下，DMP とする)[5] と呼ばれる，ICM20948 内部の組み込みプロセッサで，モーション処理アルゴリズムにより，加速度，角速度，地磁気のデータからクォータニオンやオイラー角を取得することができる．また，DMP が計算を肩代わりすることによって全体の消費電力を抑えることができる．

DMP は TDK 社が持つ独自の技術であり，内部アルゴリズムや具体的な処理の詳細については，公開されている情報が限られており，不明な点が多い．具体的には，DMP が使用するフィルタリン

グの正確な実装や，クォータニオンやオイラー角の計算過程などは，マーカーによる詳細な技術仕様として明示されていない．そのため，一般に公開されているデータシートは完全なものではなく，データシートに記載されていないレジスタマップや機能が存在する．そこでクォータニオンの取得のために利用したのが「SparkFun ICM-20948 Arduino Library」で，これは SparkFun Electronics という電子部品メーカーが提供する、さまざまなハードウェアを簡単に利用できるようにしたオープンソースのソフトウェアライブラリです。

DMP を利用して，クォータニオンの取得を行う．ICM20948 を用いて x 軸を起点に 90° 回転させて元に戻した．Fig. 4.22 が取得したクォータニオンのグラフ，Fig. 4.22 が軌跡を描いた様子である．

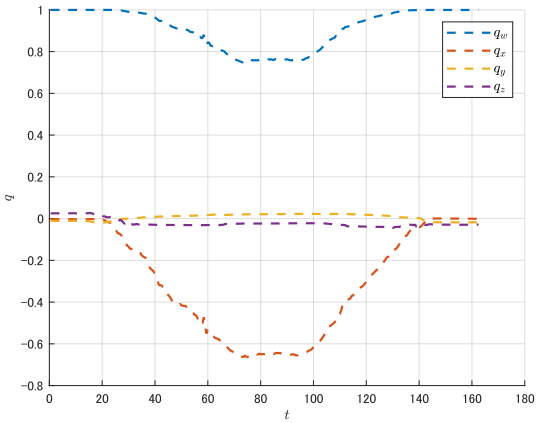

Fig. 4.22: クォータニオンのグラフ

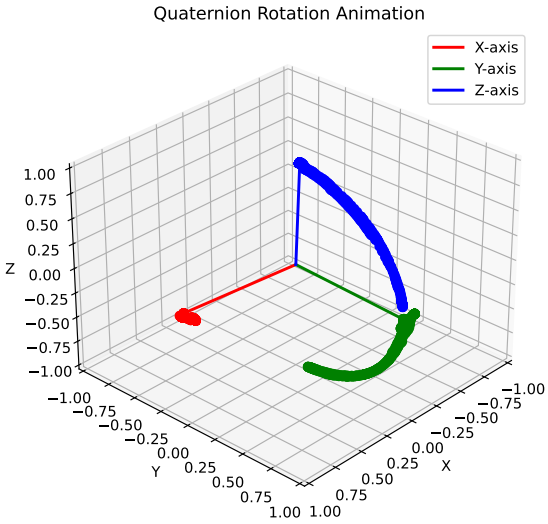

Fig. 4.23: クォータニオンの軌跡

第 5 章

姿勢推定

第 4 章，4.4 節で説明したクォータニオンの取得では，内部でどのようなアルゴリズムが実装されているか不明であると述べた．本章では，状態推定の代表的なアルゴリズムである，拡張カルマンフィルタについて述べる．

5.1 拡張カルマンフィルタについて

拡張カルマンフィルタを理解するには，まずカルマンフィルタを理解する必要がある．本節ではカルマンフィルタについて述べたのち，拡張カルマンフィルタについて述べる．

カルマンフィルタとは，何らかのシステムの真の状態が直接観測できない場合に，ノイズを含む複数の情報を用いてその真の状態を推定するためのアルゴリズムです．システムの予測モデルと観測モデルを統合し，状態推定をリアルタイムで更新します．動的システムの現在の位置や速度などを推定し，ノイズや誤差を最小化するように設計されています．また，システムの状態推定と観測ノイズがガウス分布に従うことを仮定しています．

ブレーキとアクセルによって与えられる加速度を $a_k[m/s^2]$，車の位置を $p_k[m]$，車の速度を $v_k[m/s]$ とする，車が直線運動するモデルを考える．モデルは以下となる．

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k \tag{5.1}$$

$$\hat{y}_k = C\hat{x}_k \tag{5.2}$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \hat{p}_k \\ \hat{v}_k \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & t_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}t_s^2 \\ t_s \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, u_k = a_k \tag{5.4}$$

このモデルに対して，カルマンフィルタの予測ステップは次のように表される．

$$\hat{x}_{k+1|k} = A\hat{x}_{k|k} + Bu_k \tag{5.5}$$

$$P_{k+1|k} = AP_{k|k}A_k^{\mathrm{T}} + Q \tag{5.6}$$

カルマンフィルタの，更新ステップは次のように表される．

$$S_k = CP_{k|k-1}C_k^{\mathrm{T}} + R \tag{5.7}$$

$$K_k = P_{k|k-1}C_k^{\mathrm{T}}S_k^{-1} \tag{5.8}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - C\hat{x}_{k|k-1}) \tag{5.9}$$

$$P_{k|k} = (I - K_kC)P_{k|k-1} \tag{5.10}$$

カルマンフィルタの予測ステップでは，(5.5) 式で次のステップでの状態量の計算を行っている．予測誤差の共分散 P((5.6) 式,(5.10) 式) は推定値を精度を表す行列である．プロセスノイズ共分散 Q((5.6) 式) はモデルの不確実性と予測段階での誤差を表す行列である．

更新ステップでは，予測値と観測データを統合して，状態推定値を修正し，予測誤差の共分散を更新する．イノベーション共分散 S((5.7) 式) はモデルの予測と実際の観測値との間の誤差を表す．カルマンゲイン K((5.8) 式) は予測された状態と，観測されたデータをどの程度信頼するかを決定する役割を果たす．観測ノイズ共分散 R((5.7) 式) はセンサーの観測値に含まれるノイズを表す．

カルマンフィルタでは，このような予測ステップと更新ステップを行うことで，モデルの状態を推定します．また，カルマンフィルタではノイズの確率密度は平均が 0 の白色ガウス分布であることを仮定します．しかし，非線形のモデルではノイズが白色ガウス分布に従わないため，カルマンフィルタを用いることができない．姿勢推定をする際には，非線形のモデルが使用される．非線形のモデルの推定を行うために拡張カルマンフィルタを導入する．

クォータニオンを以下のように設定する．

$$q = a + bi + cj + dk \tag{5.11}$$

$$\|q\| = 1 \tag{5.12}$$

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \tag{5.13}$$

$$R = \begin{bmatrix} a^2+b^2-c^2-d^2 & 2bc-2ad & 2bd+2ac \\ 2bc+2ad & a^2-b^2+c^2-d^2 & 2cd-2ab \\ 2bd-2ac & 2cd+2ab & a^2-b^2-c^2+d^2 \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

クォータニオンの微分を以下の式で表す．

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q Q(\vec{\omega}) \tag{5.15}$$

$$Q(\vec{\omega}) = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k \tag{5.16}$$

(5.15) 式を離散化すると

$$\dot{q} = \frac{q_{k+1} - q_k}{T_s} \tag{5.17}$$

$$q_{k+1} = q_k + \frac{1}{2} T_s q Q(\vec{\omega}) \tag{5.18}$$

$$q_{k+1} \leftarrow \frac{q_{k+1}}{\|q_{k+1}\|} \tag{5.19}$$

慣性系と非慣性系から観測された時間微分を考える．$\vec{v}$ の時間微分を考える場合，関係式は以下となる．

$$\left[\frac{d\vec{v}}{dt}\right]_w = \left[\frac{d\vec{v}}{dt}\right]_b + \vec{\omega}_w \times \vec{v}_w \tag{5.20}$$

5.17 から重力加速度と地磁気について考えると，

$$\dot{\vec{g}}^b = \vec{\omega}^b \times \vec{g}^b \tag{5.21}$$

$$\dot{\vec{\phi}}^b = \vec{\omega}^b \times \vec{\phi}^b \tag{5.22}$$

(5.21) 式,(5.22) 式を離散化すると,

$$\vec{g}^b_{k+1} = T_s(\vec{\omega}^b_k \times \vec{g}^b_k) + \vec{g}^b_k \tag{5.23}$$

$$\vec{\phi}^b_{k+1} = T_s(\vec{\omega}^b_k \times \vec{\phi}^b_k) + \vec{\phi}^b_k \tag{5.24}$$

ドローンにかかる力とトルクは未知であるため，角速度と加速度は以下の式に近似する.

$$\vec{\omega}^b_{k+1} = \vec{\omega}^b_k \tag{5.25}$$

$$\ddot{\vec{p}}^b_{k+1} = \ddot{\vec{p}}^b_k \tag{5.26}$$

(5.17) 式,(5.21) 式,(5.22) 式,(5.25) 式,(5.26) 式より，拡張カルマンフィルタを利用する際のモデルを以下のように設定する.

$$x_k = \begin{bmatrix} \vec{q}_k^{\mathrm{T}} & (\vec{\omega}^b_k)^{\mathrm{T}} & (\ddot{\vec{p}}^b_k)^{\mathrm{T}} & (\vec{g}^b_k)^{\mathrm{T}} & (\vec{\phi}^b_k)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{5.27}$$

$$x_{k+1} = f(x_k) \tag{5.28}$$

$$f(x_k) = \begin{bmatrix} q_k + \frac{1}{2}T_s q_k Q(\vec{\omega}^b_k) \\ \vec{\omega}^b_k \\ \ddot{\vec{p}}^b_k \\ T_s(\vec{\omega}^b_k \times \vec{g}^b) + \vec{g}^b \\ T_s(\vec{\omega}^b_k \times \vec{\phi}^b) + \vec{\phi}^b \end{bmatrix} \tag{5.29}$$

観測データに関する式は IMU より以下となる.

$$y_k = h(x_k) + \vec{\epsilon_k} \tag{5.30}$$

$$h(x_k) = \begin{bmatrix} \vec{\omega^b_k} \\ \ddot{\vec{p}}^b_k + R_k \vec{g}^w \\ R_k \vec{\phi}^w \end{bmatrix} \tag{5.31}$$

$$\vec{\epsilon_k} = \begin{bmatrix} \vec{\epsilon_{\omega,k}} \\ \vec{\epsilon_{p,k}} \\ \vec{\epsilon_{\phi,k}} \end{bmatrix} \tag{5.32}$$

拡張カルマンフィルタでは，非線形なモデルを現在の推定値で線形化を行い，線形化を行った結果をカルマンフィルタで使用することによって，推定を行う．(5.28) 式,(5.31) 式の偏微分をとることで線形化，x_k で評価することによって線形化した行列を得ることができる.

$$F_k = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{\hat{x}_{k-1|k-1}} \tag{5.33}$$

$$H_k = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{\hat{x}_{k|k-1}} \tag{5.34}$$

線形化された行列 (5.33) 式,(5.34) 式を用いると，拡張カルマンフィルタの予測ステップは以下の式で表す.

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}) \tag{5.35}$$
$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^{\mathrm{T}} + Q \tag{5.36}$$

拡張カルマンフィルタの更新ステップは以下の式で表す.

$$\tilde{y}_k = y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) \tag{5.37}$$
$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^{\mathrm{T}} + R \tag{5.38}$$
$$K_k = P_{k|k-1} H_k^{\mathrm{T}} S_k^{-1} \tag{5.39}$$
$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \tag{5.40}$$
$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \tag{5.41}$$

このようなプロセスで，拡張カルマンフィルタは，システムの推定を行う．センサーの情報を用いて，未知の情報を推定することをセンサーフュージョンと呼ぶ.

第 6 章

おわりに

本研究では，無人航空機に搭載するマイコン間の通信と PC とマイコン間の通信の実装，慣性計測装置による加速度，角速度，地磁気の測定，地磁気センサのキャリブレーション，DMP によるクォータニオンの取得を行った．2 章で述べた，通信インターフェイスを用いて，3 章 のマイコン間の通信の実装を行った．また，4 章では，慣性計測装置のデータの取得やキャリブレーション，クォータニオンの取得を行った．今後の展望としては，DMP によるクォータニオンの取得は内部アルゴリズムが不明瞭な状態であるため，5 章で述べた，拡張カルマンフィルタのような状態推定アルゴリズムを用いた姿勢推定を行うことが考えられる．

第 7 章

参考文献

[1] Sharifah Mastura Syed Mohd Daud, Mohd Yusmiaidil Putera Mohd Yusof, Chong Chin Heo, Lay See Khoo, Mansharan Kaur Chainchel Singh, Mohd Shah Mahmood, Hapizah Nawawi, Applications of drone in disaster management: A scoping review, Science Justice, Volume 62, Issue 1, 2022, Pages 30-42, ISSN 1355-0306,

[2] Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual, Version 5.1," Espressif, 2024. [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/support/download/documents

[3] Renesas Electronics Corporation, "RL78/G14 User' s Manual: Hardware," 2023. [Online]. Available: https://www.renesas.com/ja

[4] Electronics Hub, "Basics of UART Communication," 2024. [Online]. Available:https://www.electronicshub.org/basics-uart-communication/

[5] TDK InvenSense, "World' s Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking™ Device," 2017. [online]. Available:https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/06/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf

[6] AsahiKASEI, "AK09916 3-axis Electronic Compass," 2015.[online]. Available:https://www.y-ic.es/datasheet/78/SMDSW.020-2OZ.pdf

[7] T. Ozyagcilar, Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft Iron Interference, Freescale Semiconductor, Application Note AN4246, Rev. 4.0, Nov. 2015.

[8] D. Tedaldi, A. Pretto, and E. Menegatti, A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014, pp. 3042-3049, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907297.

付録 A

モーター

無人航空機に使用するモーターは，Fig. A.1 に示した 2212/920KV である．これは直径 22mm × 高さ 12mm のブラシレスモーターであり，1v の電圧をかけたときに 920rpm で回転する．また，通信インターフェイスは 2.2.1 節で述べた SPI を用いる．

Fig. A.1: 2212/920KV

実際に無人航空機を作成する場合，複数のモーターが必要となる．モーターの構成を Fig. A.2 に示す．SPI では，Chip Select 以外の信号線を共有することができる．そのため Chip Select を増やすことによってモータの台数を増やすことができる．

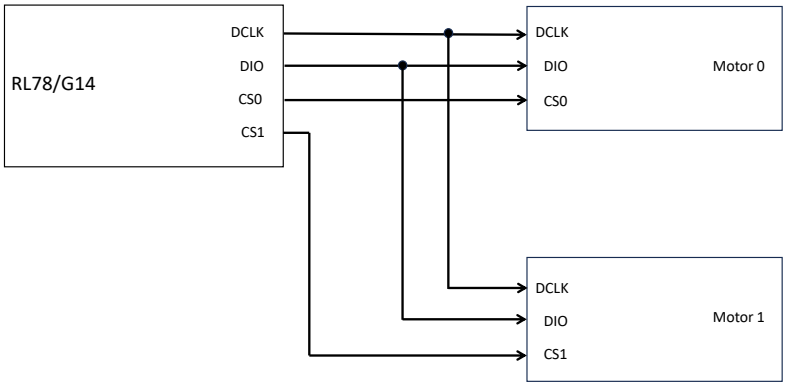

Fig. A.2: モーターの構成

付録 B

回転成分のキャリブレーション

本論では，主に平行移動と伸縮のキャリブレーションを行った．ここでは固有ベクトルと係数比較を用いた方法の 2 つで回転成分がどのように補正できたかを述べる．Fig. B.1,Fig. B.2 に ICM20948 を水平に回した様子である．Fig. B.3,Fig. B.4 に固有ベクトルから求めた回転行列を適用した様子を示す．また，Fig. B.3,Fig. B.4 に係数比較で求めた回転行列を適用した様子を示す．Fig. B.4,Fig. B.4 から回転は補正されていることがわかるが，同様の結果になっていないことがわかる．回転の補正についてはまだ課題が残る結果となった．

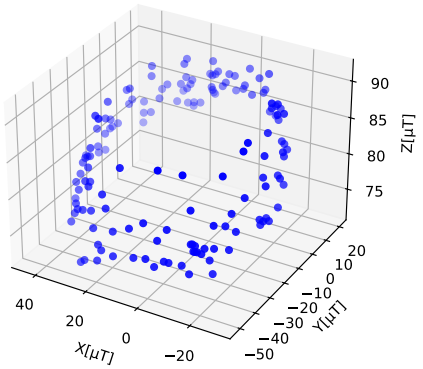

Fig. B.1: 回転前のデータ

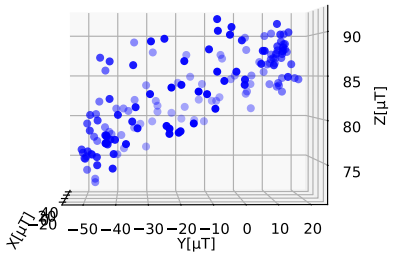

Fig. B.2: 回転前のデータを y 軸から見た様子

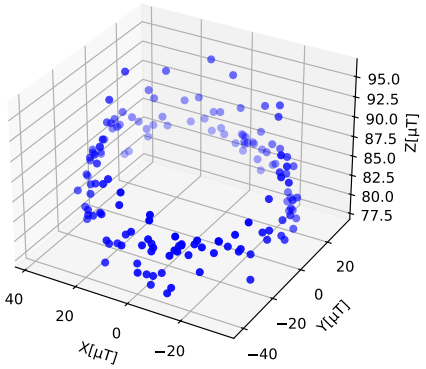

Fig. B.3: 固有ベクトルから求めた回転行列を適用した結果

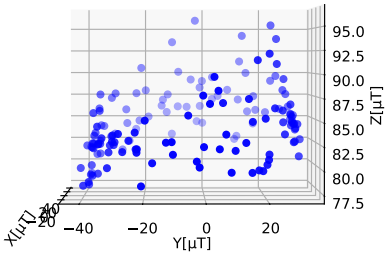

Fig. B.4: y 軸から見た様子 (固有ベクトル)

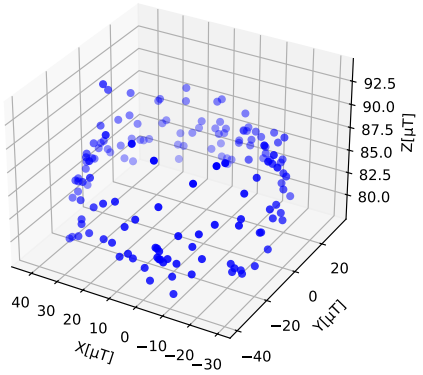

Fig. B.5: 係数比較から求めた回転行列を適用した結果

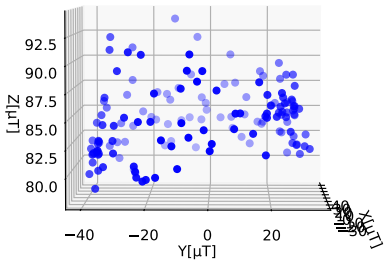

Fig. B.6: y 軸から見た様子 (係数比較)

付録 C

地磁気センサの方位角の算出

実際に測定した結果から，地磁気センサの傾きを考慮して，方位角を算出する必要がある．地磁気センサがどの程度傾いているかを計算するために，重力加速度を基準として，ロール，ピッチの回転角を求めます．

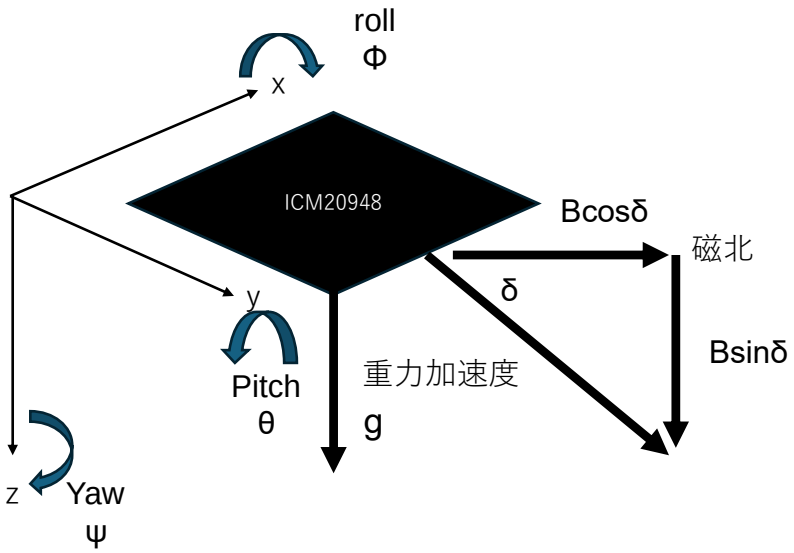

Fig. C.1: 地磁気センサを平面に置いた図

地磁気センサが傾いているときの加速度をそれぞれ a_x,a_y,a_z とすると，Fig.Fig. C.1 より

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{C.1}$$

$$R_y(-\theta)R_x(-\phi)\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = R_z(\psi)\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{C.2}$$

これを展開すると

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\phi & \sin\theta\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{C.3}$$

式 (C.3) より，ロールの回転角は

$$a_y \cos\phi - a_z \sin\phi = 0 \tag{C.4}$$

$$\tan\phi = \frac{a_y}{a_z} \tag{C.5}$$

式 (C.3) より，ピッチの回転角は

$$a_x \cos\theta + a_y \sin\theta\sin\phi + a_z \sin\theta\cos\phi = 0 \tag{C.6}$$

$$\tan\theta = \frac{-a_x}{a_y \sin\phi + a_z \cos\phi} \tag{C.7}$$

ロールとピッチの回転角が計算できたので，ヨーの回転角を求める．
ヨーの回転角がセンサの向き，つまり方位角となる．地磁気センサが傾いているときの B_{px},B_{py},B_{pz} とすると，Fig.**??**より

$$B_p = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)B \begin{bmatrix} \cos\delta \\ 0 \\ \sin\delta \end{bmatrix} \tag{C.8}$$

$$R_y(-\theta)R_x(-\phi) \begin{bmatrix} B_{px} \\ B_{py} \\ B_{pz} \end{bmatrix} = R_z(\psi) \begin{bmatrix} B\cos\delta \\ 0 \\ B\sin\delta \end{bmatrix} \tag{C.9}$$

これを展開すると

$$\begin{bmatrix} B_{px}\cos\theta + B_{py}\sin\theta\sin\phi + B_{pz}\sin\theta\cos\phi \\ B_{py}\cos\phi - B_{pz}\sin\phi \\ -B_{px}\sin\theta + B_{py}\cos\theta\sin\phi + B_{pz}\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B\cos\psi\cos\delta \\ -B\sin\psi\cos\delta \\ B\sin\delta \end{bmatrix} \tag{C.10}$$

式 (C.10) より，ヨーの回転角は

$$\tan\psi = \frac{B\sin\psi\cos\delta}{B\cos\psi\cos\delta} = \frac{B_{pz}\sin\phi - B_{py}\cos\phi}{B_{px}\cos\theta + B_{py}\sin\theta\sin\phi + B_{pz}\sin\theta\cos\phi} \tag{C.11}$$

3 軸の地磁気センサでは，加速度の情報を用いて，地磁気センサの傾きを補正して，方位角を算出することができる．

謝辞

大学での研究生活において, 終始暖かいご指導を賜りました，富山大学 平田 研二 先生に心より感謝の意を表します.

様々な面でご協力賜りました，富山大学 Tam W. Nguyen 先生に厚く御礼申し上げます.

また, 日々の研究生活で多くのご協力を頂きました研究室の先輩方，後輩方，学友の皆様に心から感謝いたします.

最後に，これまでの学生生活を支え，暖かく見守っていただいた父母や祖父母をはじめとする皆様に心より感謝いたします．本当にありがとうございました.

2025 年 3 月